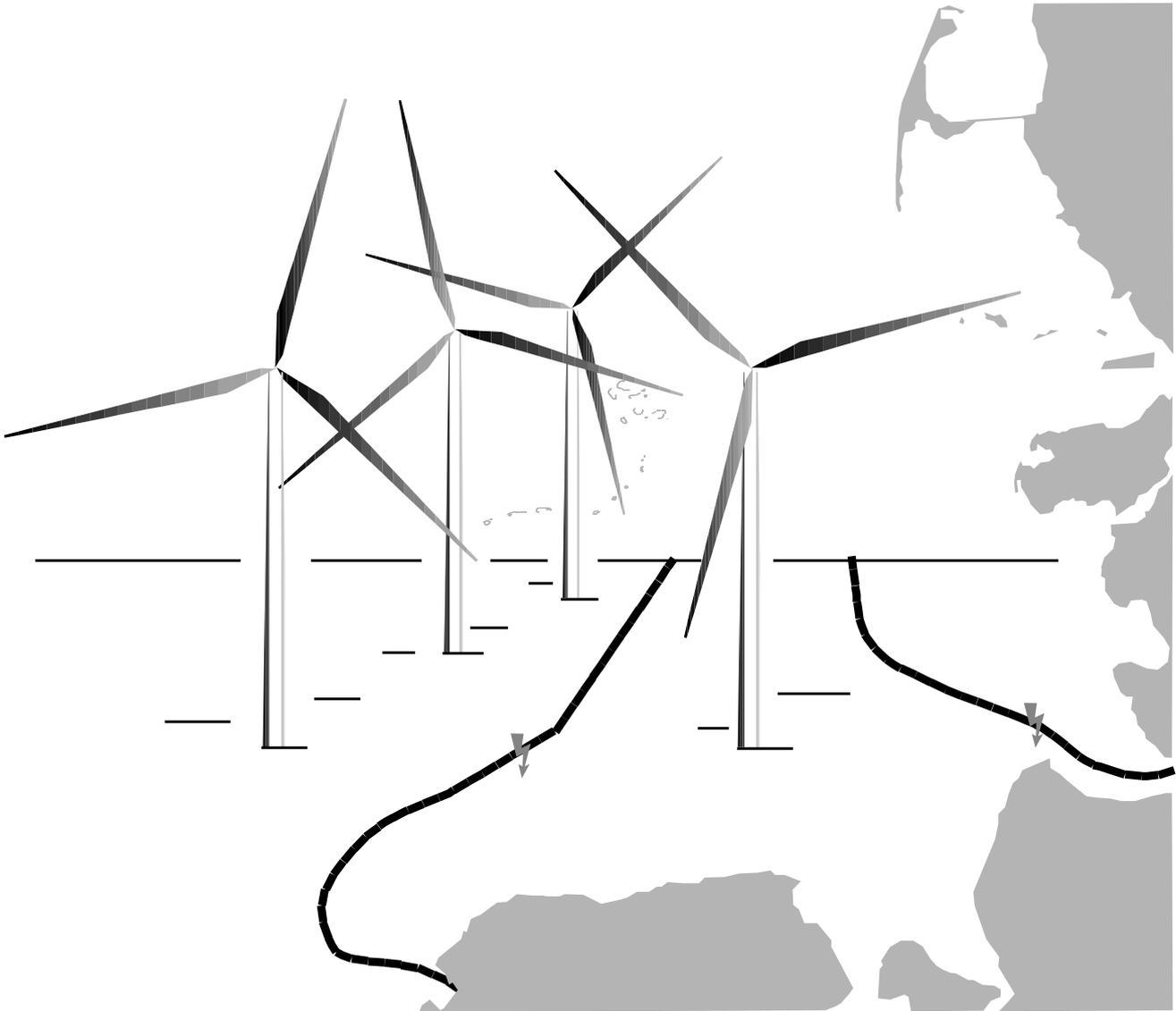


Thomas Merck & Henning von Nordheim

Technische Eingriffe in marine Lebensräume

Tagungsband



BFN - SKRIPTEN 29



BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2000

Technische Eingriffe in marine Lebensräume

Workshop des
Bundesamtes für Naturschutz
Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
27. - 29. Oktober 1999

Thomas Merck & Henning von Nordheim



Bundesamt für Naturschutz 2000

Adresse:

Dr. H. v. Nordheim
T. Merck

Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Außenstelle Vilm
Internationale Naturschutzakademie (INA)
18581 Lauterbach
e-mail: bfn.ina.vilm.@t-online.de

Die BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich.

Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz (BfN)
Konstantinstr. 110, D-53179 Bonn
Telefon: 0228-8491-0
Fax: 0228-8491-200
e-mail: RothertB@bfn.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in dem Beitrag geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit Genehmigung des BfN.

Druck: BMU-Druckerei

Gedruckt auf 100% Altpapier

Bonn-Bad Godesberg 2000

Vorwort.....	3
--------------	---

Elektrokabel im Meer

Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen (aquatischen) Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand. Teil I.

UWE KULLNICK & STEPHAN MARHOLD.....	4
-------------------------------------	---

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

STEPHAN MARHOLD & UWE KULLNICK.....	19
-------------------------------------	----

Vorläufige Ergebnisse von Felduntersuchungen an einer Elektrode in der Ostsee

LUTZ DEBUS, HELMUT WINKLER & MICHEAL L. ZETTLER.....	31
--	----

Auswirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Meeresfische in der Nord- und Ostsee

RONALD FRICKE.....	41
--------------------	----

Magnetische Richtungsorientierung des Aales im Labor und Anzeichen einer solchen Orientierung bei Aal-Verfolgungsexperimenten. Sind alternative Orientierungsmechanismen möglich?

FRIEDRICH-WILHELM TESCH.....	62
------------------------------	----

Effect of HVDC cables on eel orientation

HÅKAN WESTERBERG.....	70
-----------------------	----

Kabelbauarten sowie Verlegemethoden und ihre Auswirkungen auf magnetische und elektrische Felder im Meer

KLAUS KRAMER.....	77
-------------------	----

Offshore-Windenergieanlagen

Mögliche Probleme von Offshore-Windenergieanlagen aus Naturschutzsicht

THOMAS MERCK & HENNING VON NORDHEIM..... 88

Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung potentiell negativer Auswirkungen von Offshore-WKA auf Natur, Umwelt und Landschaftsbild

UWE THOMAS CARSTENSEN..... 100

Mögliche Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf See- und Wasservögel der Deutschen Nord- und Ostsee

STEFAN GARTHE..... 113

Impact assessment studies of offshore wind parks on seabirds with special reference to the Tunø Knob wind park

IB CLAUSAGER..... 120

The effects of offshore windfarms on birds

JAN VAN DER WINDEN, HANS SCHEKKERMANN, INGRID TULP & SJOERD DIRKSEN..... 126

Offshore-Windenergie - Technik und Potentiale

GERHARD GERDES & KNUT REHFELDT..... 136

Hydro- und morphodynamische Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen

WERNER ZIELKE..... 147

Impact studies of sea-based windpower in Sweden

HÅKAN WESTERBERG..... 163

Potentieller Einfluß von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Säuger

KLAUS LUCKE..... 169

Teilnehmerliste..... 181

Vorwort

Die europäischen Meere werden außer durch die Fischerei mit all ihren Facetten in vielfältiger anderer Weise genutzt. So sind Öl- und Gasplattformen mit den entsprechenden Pipelines oder unterseeische Telephonkabel ebenso wie die Schifffahrt oder die Entnahme von Sanden und Kiesen seit langem gewohnte menschliche Inanspruchnahmen der Meeresumwelt und -natur. In zunehmendem Maß kommen weitere großflächige technische Eingriffe hinzu. Insbesondere der Transport von Energie in verschiedenen Formen wie Öl, Gas aber auch Strom über große Distanzen nimmt in den letzten Jahren stetig zu. Unterwasserpipelines für den Transport von russischem Gas nach Mitteleuropa oder unterseeische Elektrokabel zur Einspeisung von skandinavischem Wasserkraftstrom ins deutsche Stromnetz sind hier nur zwei Beispiele. Ein besonderer Stellenwert kommt neuerdings Offshore-Anlagen zur Nutzung der Windenergie zu. Mit dem "Erneuerbare Energien-Gesetz" ist die ökonomische Basis hierfür gesichert und allein für den deutschen Teil der Nordsee gibt es Pläne über viele Hundert Windräder, die küstennah oder auch küstenfern im Meeresgebiet aufgestellt werden sollen.

Diese 'technischen Eingriffe' in den Meereshaushalt nehmen stetig zu. Eine Berücksichtigung der möglichen ökologischen Folgen im Zuge des Vorsorgeprinzips, zu dem sich die Bundesrepublik Deutschland als Vertragsstaat der Oslo-Paris- und der Helsinki-Konventionen zum Meeresschutz verpflichtet hat, ist in vielen Fällen jedoch aus Ökosystemschuttsicht nicht ausreichend geregelt. Ferner liegen für die meisten Eingriffe keine hinreichenden naturwissenschaftlichen Bewertungsgrundlagen vor.

Um diesen Mangel sichtbar zu machen, zu analysieren und zu beheben wurde am Bundesamt für Naturschutz, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm, vom 27. - 29. Oktober 1999 der Workshop "Technische Eingriffe in marine Lebensräume" abgehalten. Auf der Tagung sollten für die Themen "Offshore-Windenergieanlagen" und "Elektrokabel im Meer" die bislang vorliegenden Erkenntnisse über mögliche ökologische Auswirkungen zusammengetragen, ausgewertet und gegebenenfalls Forschungsbedarf formuliert werden. Ziel war es auch, Empfehlungen für die Bewertung derartiger Eingriffe aus Naturschutzsicht zu erarbeiten.

Der Workshop fand unter Beteiligung von über 50 Vertretern von Bundes- und Landesbehörden, Naturschutzverbänden, Betreiberfirmen, Planungsbüros und der Wissenschaft statt. Die hier abgedruckten Beiträge, die während des Workshops von in- und ausländischen Referenten präsentiert wurden, helfen dabei, zu einer ersten Einschätzung der möglichen ökologischen Auswirkungen dieser Eingriffe auf die marine Umwelt zu kommen. Sie zeigen aber auch auf, wo besonders dringender Bedarf an grundlegender Forschung wie auch an eingriffsbegleitenden Untersuchungen besteht.

Prof. Dr. Vogtmann

Präsident des Bundesamtes für Naturschutz

Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen (aquatischen) Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand. Teil I.

Uwe Kullnick⁽¹⁾ & Stephan Marhold⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2, D-47475 Kamp Lintfort/Universität Duisburg, kullnick@imst.de

⁽²⁾ Zoologisches Institut der J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main, AG Magnetoneurbiologie, Siesmayerstr. 70, D-60323 Frankfurt, Germany, marhold@zoology.uni-frankfurt.de

Einleitung

Die Aufgabe war, vorhandenes Wissen oder Nichtwissen in der Weise aufzuarbeiten, daß eine Abschätzung erfolgen soll, ob und welche Einflüsse elektrische und magnetische Felder auf aquatische Ökosysteme haben können. Hierbei werden wir nicht die sensorische Seite der Reizaufnahme beleuchten, sondern die möglichen oder absehbaren und wahrscheinlichen Folgen für verschiedene Tiere in wichtigen Teilbereichen der aquatischen Biosphäre diskutieren.

Dies wurde in den vergangenen Jahren von Kullnick (1992, 1994 a, b, c, 1995, 1999) in Form von Gutachten schon einige Male gemacht. Wir sind uns wohl bewußt, dabei mit dieser Abschätzung auf recht dünnem Eise zu gehen, da im Gegensatz zu stofflichen biotischen und abiotischen Einflüssen, die immerhin schon seit einigen Jahrzehnten mit großem Erkenntniserfolg erforscht werden, die Beschäftigung mit elektromagnetischen Feldern in aquatischen Lebensräumen eher ein Zwergendasein führt. Eine kleine Ausnahme bildet die Beschäftigung mit Themen der Elektro- bzw. der Magnetorientierung. Hier ist immerhin schon einiges an den Tag gekommen, was hilfreich bei der Einordnung der Wirkung von elektromagnetischen Feldern (EMF) in marine Systeme sein kann. Doch immer wieder stößt man auf Fragezeichen statt auf Antworten. Die drängenden Fragen nach Verletzbarkeit der aquatischen Biosphäre durch die fortschreitende Technisierung der Umwelt werden mehr, je weiter sie fortschreitet und je mehr Feldqualitäten und -quantitäten in die Ökosysteme eintreten.

Dieser Beitrag wird sich in disproportionaler Weise mit folgenden Subsystemen beschäftigen. Zum aquatischen Ökosystem gehören die limnologische Biosphäre, bestehend

aus Pfützen, Seen und Flüssen. Die marine Biosphäre besteht aus Meeren und Brackwasserbereichen der Flüsse. In diesen Sphären tauchen immer stärker technisch erzeugte elektrische und magnetische Felder auf, deren biologische Potenz im wesentlichen unbekannt ist. Sie aus dem Bereich des unbekanntes zu entreißen ist eine Aufgabe der Forschung und wir wollen darstellen, wie weit sie damit bisher gediehen ist.

Wir werden versuchen die physikalischen Eigenschaften des technischen Systems im Lebensraum zu erfassen und festzustellen, ob sie auf die dort beheimateten Lebewesen Wirkungen ausüben können; ob sie in der Lage sind sie in ihren Lebensäußerungen zu beeinflussen.

Physikalische Einflußgrößen im Bereich der limnischen und marinen Ökosysteme zu identifizieren ist nicht einfach. Entweder ist die technische Anwendung elektromagnetischer Felder in diesen Lebensräumen nur auf wenige Systeme beschränkt oder sie führen ein eher unerkanntes Dasein. Unsere Darstellung erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wir werden nur auf Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Kabel (HGÜ-Kabel) und deren mögliche Wirkungen eingehen. Auf die Besprechung von stromführenden Telekommunikationskabeln, Unterwasserkommunikationseinrichtungen, riffbildende elektrolytische Verfahren uva. verzichten wir. Ebenso lassen wir die natürlichen Felder außer Betracht, die z.B. in Form von unendlich vielen Blitzen gigantische Energien auf das Meer schleudern.

Seit einiger Zeit werden HGÜ-Kabel zwischen Ländern verlegt, die den Austausch von Strom über große Entfernungen ermöglichen sollen. Solche Kabel liegen schon in den Meeren bzw. Flüssen Europas und Asiens. Bei Betrieb eines Kabels mit Gleichspannung und Gleichstrom tritt in der Außenwirkung primär nur ein magnetisches Gleichfeld auf. Das elektrische Feld baut sich innerhalb des Isoliermaterials des Kabels auf und tritt nicht nach außen. Beim Ein- und Ausschalten des Kabels sowie bei Stromänderungen verändert sich das äußere Magnetfeld entsprechend und verbleibt dann statisch in dem jeweiligen Zustand. Der Betrag des natürlichen magnetischen Gleichfeldes der Erde beträgt im geographischen Raum der Ost- und Nordsee etwa 40 A/m, was einer magnetischen Flußdichte von etwa 50 Micro-Tesla [μT] entspricht. Allerdings werden durch einen physikalischen Seiteneffekt elektrische Felder entstehen. Die Bewegung der Wassermassen in den ozeanischen Strömen wirkt wie ein riesiger Generator, da das Wasser einen Leiter darstellt, der sich durch das Erdmagnetfeld hindurch bewegt. Die natürliche Stromdichte im Meer hängt vom Magnetfeld und von der Geschwindigkeit der Wasserverschiebung ab und schwankt demzufolge erheblich. Die geoelektrischen Felder, die im Meer durch ozeanische Ströme wie beispielsweise den Golfstrom entstehen, erreichen Intensitäten bis etwa 0,5 $\mu\text{V}/\text{cm}$ (Eckert 1986). Dies entspricht einem Spannungsabfall von etwa 1,0 V/20 km (bzw. 0,00005 V/m = 50 $\mu\text{V}/\text{m}$), in Einzelfällen, z.B. bei Strömungen in Meerengen, können auch noch deutlich höhere Werte auftreten.

Das Magnetfeld des Kabels entspricht dem Magnetfeld eines langgestreckten stromdurchflossenen Leiters. Es ist direkt an der Oberfläche des Kabels am größten und fällt sehr stark mit dem Abstand vom Kabel ab (nach der Funktion $1/x$). Das Magnetfeld ist dem Kabelstrom linear proportional. Bei zwei parallel verlegten Kabeln mit entgegengesetzter Stromrichtung (Hin- und Rückleiter), sind die jeweiligen Einzelmagnetfelder unter Beachtung ihrer Richtung zu addieren. Die Kabel werden jedoch manchmal baubedingt bis zu 1.000 Metern voneinander getrennt verlegt. Dadurch kommt es zur Ausprägung zweier entgegengesetzt polarisierter magnetischer Felder.

HGÜ Kabel werden auch monopolar verlegt, das heißt, es werden See-Elektroden verlegt, um beispielsweise den Meeresboden der Ostsee als Rückleiter zu verwenden. Dies geschieht beim BALTIC-Cable zwischen Deutschland und Schweden, das seit 1995 am Netz ist. Durch diese Technik entstehen natürlich im Bereich der im Wasser liegenden Elektroden neben Elektrolyseprodukten auch elektrische Felder, an die bei einer Diskussion gedacht werden muß.

Fragestellung

Kommt es durch elektrische und magnetische Felder bei der Nutzung des geplanten HGÜ-Kabels von der Elbmündung durch die Nordsee nach Norwegen (VIKING Cable) zu Störungen des Migrationsverhaltens und/oder zu Umweltkrankheiten? Sind Veränderungen der energetischen oder informationellen Umweltinhalte Grund für ein verändertes Verhalten oder Leben? Wir möchten das am Beispiel des Lebensraums Wattenmeer und einiger seiner Schlüsselorganismen diskutieren.

Das europäische Wattenmeer hat eine große ökologische Bedeutung, es ist:

- Lebensraum vieler Organismen,
- Laich- und Aufwuchsgebiet,
- Rast-, Mauser- und Brutgebiet.

Es wird aber auch von den Menschen genutzt, hier ist es:

- Fischereigebiet
- Erdgasgewinnungsareal
- Trasse für Stromkabel
- Erholungsgebiet

Dieses Ökosystem soll unbedingt erhalten und geschützt werden. Es stellen sich die Fragen: In welchem Zustand befindet sich das Ökosystem und was wurde bereits im weitesten Sinne vom Menschen beeinflusst? Welche Rolle spielen elektrische und magnetische Felder dabei? Offenbar ist insgesamt noch recht wenig bekannt. Zur Zeit beschäftigen sich kein

Forschungsprojekt mit der Bestandsaufnahme elektromagnetischer Feldquellen in deutschen Meeren oder deren Wirkung auf Lebewesen z.B. des Wattenmeers.

Im Fall der geplanten Verlegung eines HGÜ Kabels ist folgenden konkreten Fragen nachzugehen:

1. Gibt es Hinweise auf direkte oder indirekte Störungen der Gesundheit oder Fortpflanzungsfähigkeit der Lebewesen durch elektrische oder magnetische Felder?
2. Kann das elektrische bzw. magnetische Feld des Kabels Tiere von ihrem bisherigen Aufenthaltsorten direkt oder indirekt vertreiben?
3. Bildet das magnetische Gleichfeld des Kabels eine teilweise oder totale Migrationsbarriere für wandernde oder ziehende Tiere?

Die Wanderung der Aale oder der Lachse durch Flüsse und Meere über zum Teil viele tausend Kilometer ist ohne die Fähigkeit zur Orientierung nicht denkbar. Wir wollen kurz die prinzipiellen Möglichkeiten sich anhand des Erdmagnetfeldes und natürlicher elektrischer Felder zu orientieren und die Störmöglichkeiten durch technische Felder diskutieren. Von den vergleichsweise wenigen bisher untersuchten migrierenden bzw. navigierenden Tierarten ist bekannt, daß verschiedene sensorische Systeme (und damit verschiedene Orientierungsparameter in einer Art multifaktoriellem System) benutzt werden, wobei eines oder mehrere Systeme dominieren, wenn die Bedingungen für den Gebrauch anderer Faktoren weniger günstig sind.

In den Literaturstudien von Kullnick 1995 und Poleo & Harboe 1996 sind bereits die in der Literatur bekannten Größenordnungen elektrischer und magnetischer Felder bei marinen Organismen zusammengetragen, die diese entweder nachweislich perzipieren können oder die zu Meide- bzw. Anlockreaktionen führen. Zusammenfassend wird der Schwellenwert für die Wahrnehmung von elektrischen Feldern, soweit bekannt, bei Neunaugen von etwa 0,1-1 mV/m, bei Haien bis hinunter auf 0,5 μ V/m angegeben. Über Magnetfelder ist bekannt, daß einige Tierarten die Vertikal- und/oder auch die Horizontalkomponente im Bereich der natürlichen Größenordnung (Mitteleuropa Totalintensität um 50 μ T) zur Orientierung nutzen. Sollte die Magnetperzeption auf Magnetit beruhen, wie mehrfach angenommen, könnte ein solches System theoretisch auf Magnetfeldänderungen von rund 500 nT reagieren (Kirschvink & Gold 1981; Yorke 1981).

Nun ist ein quer durch die Nordsee verlegtes Gleichstrom-Kabel als eine neue magnetische Anomalie aufzufassen. Es kam zu Befürchtungen, wandernde Tiere könnten von diesem neuen Feld in ihrer Migration abgelenkt oder gar abgeschreckt werden (man bedenke, daß das Magnetfeld eines HGÜ-Kabels je nach Wassertiefe bis zur Oberfläche hinaus reichen kann).

Diesen Befürchtungen muß mehrgleisig nachgegangen werden.

1. Durch eine Analyse der Literatur und

2. durch experimentelle Forschung, die speziell der Fragestellung der Barrierenbildung nachgeht.

Es muß sicherlich nicht betont werden, daß eine Abschreckung des Aals oder der Lachse auf ihren angestammten Wanderwegen eine tiefgreifende Veränderung nicht nur für marine sondern auch für limnische Ökosysteme bedeutet.

Aale

Aale (*Anguilla anguilla*) wachsen in den Binnengewässern heran. Als katadrome Wanderfische wandern Aale zur Laichablage vom Süßwasser der Flüsse ins offene Meer. Die Aale aus dem Elbebereich wandern zunächst nordwestlich, queren die britischen Inseln und schwimmen dann im Atlantik einen südwestlichen Kurs (Tesch 1972, 1974b). Die Laichgründe befinden sich in der westatlantischen Sargassosee. Die Aallarven wandern aus den Laichgebieten in die Flüsse ein und schließen auf diese Weise den Lebenszyklus, d.h. sie begeben sich nach einigen Jahren wieder auf die Wanderung zur Sargassosee, um abzulaichen.

Elektrische Felder könnten für die Orientierung der Aale eine Rolle spielen. Sie haben in ihrem Seitenliniensystem empfindliche Elektrorezeptoren. Damit könnten sie beispielsweise indirekt die großen Meeresströmungen auffinden, die sie für ihre Wanderungen nutzen (Deelder 1952). Eine solche Elektrosensitivität zur Magnetfeldwahrnehmung sowie die Nutzung während der Migration konnte jedoch bis heute nicht explizit nachgewiesen werden. Allerdings gibt es andere nicht reproduzierte Verhaltensbelege (z.B. die einer Bradykardie - Verlangsamung des Herzschlags) mit denen gezeigt wurde, daß die Aale noch auf elektrische Feldstärken von 0,067 mV/m reagieren. Eine andere Untersuchung ermittelte eine Auslöseschwelle für Bradykardie bei europäischen Aalen erst bei 40 mV/m.

Es gibt mehrere Hinweise, daß sich Aale anhand magnetischer Felder orientieren können. Erste Hinweise von Gelbaalen, der stationären Süßwasserform zeigten ein bimodales Verhalten, d.h. sie bevorzugten zwei entgegengesetzte Himmelsrichtungen. Unter lokalen Magnetfeldbedingungen bevorzugten die Aale spontan eine Ost-West-Richtung, bei kompensiertem Magnetfeld trat keine Richtungspräferenz mehr auf. Dies legte den Schluß nahe, daß die Tiere magnetische Faktoren zur Richtungsbestimmung nutzen (Branover *et al.* 1971). Auch Souza *et al.* (1988) kamen bei Versuchen mit Gelbaalen zu ähnlichen Ergebnissen, während die Versuche von Tesch *et al.* (1992) eher keine klaren Belege für einen möglichen Magnetfeldkompaßgebrauch ergaben. In einer weiteren Studie an amerikanischen Silberaalen (das sind Tiere, die sich zum Ablachen auf der Wanderung zur Sargassosee befinden) zeigten die Tiere ebenfalls ein gerichtetes Schwimmverhalten in Richtung Sargassosee, ohne daß sie auf Himmelsfaktoren zurückgreifen konnten (Miles 1968). Auch dieses Ergebnis konnte aber in neueren Versuchen, zumindest an einer baltischen Population von Silberaalen,

nicht vollständig reproduziert werden (Karlsson 1985). Da es jedoch mehrere positive Belege in Hinblick auf eine magnetische Richtungspräferenz gibt (wenn auch ein eindeutiger, zweifelsfreier Nachweis fehlt), erscheint es wahrscheinlich, daß Aale das Magnetfeld zumindest als einen von mehreren Faktoren zur Orientierung nutzen können.

Insbesondere beim Aal, als einem über weite Strecken migrierenden Fisch, ist anzunehmen, daß sein Orientierungsvermögen auf mehreren Faktoren aufbaut. Könnten Aale tatsächlich allein nur auf das Magnetfeld zurückgreifen, so bestünde eine große Wahrscheinlichkeit, daß sie durch kleinste natürliche Anomalien oder Magnetstürme im Bereich ihrer Wanderungsstrecke soweit vom Kurs abkämen, daß sie nicht mehr in der Lage wären, ihr eigentliches Migrationsziel zu erreichen. Dies hätte möglicherweise dramatische Auswirkungen für diese Art zur Folge. Die bisherige intraspezifische Konstanz des Wanderwegs (d.h. die Konstanz innerhalb der Art), spricht beim Aal gegen einen Migrationsmechanismus, der allein auf einem Faktor beruht. Es ist bekannt, daß Glasaale (Richtung Flußmündungen wandernde Form) negativ phototaktisch, Gelbaale im Bereich der Mündung positiv rheotaktisch (entgegen der Strömung schwimmen) und Silberaale, die sich auf den Weg zur Sargassosee begeben, negativ rheotaktisch reagieren. Aufgrund dieser Hinweise ist anzunehmen, daß auch Aale ein multifaktorielles Orientierungssystem entwickelt haben, so daß ihr Orientierungsvermögen allein durch das künstliche Feld im Bereich des HGÜ-Kabels vielleicht nicht ernsthaft beeinträchtigt sein wird.

Ganz neue experimentelle Ergebnisse zeigen im Freiland eine eher kleine Veränderung frei ziehender Aale in Richtung Sargassosee. In Experimenten von Westerberg 1999 (unveröffentlicht) weisen Blankaale beim Überschwimmen eines HGÜ-Kabels (BALTIC Cable) durch die Ostsee eine geringe Verlagerung ihrer Wanderstrecken nach Norden auf. Es handelt sich nach Westerberg bei der überwiegenden Zahl der Tiere um eine Verschiebung um ca. 100 Meter nach Norden. Ein Teil der Versuche war jedoch nicht geglückt oder wenig auswertbar. Allerdings gab es auch Tiere, die einen starken Versatz nach Süden zeigten.

Von Kullnick initiierte Forschungen zeigten Gelbaale in einem Versuch, der die Situation abbildete, wie sich aus dem Sargassomeer kommende Jungfische, die in der Nordsee ein HGÜ Kabel überschwimmen müssen, verhalten. Die Ergebnisse zeigten, daß sich die untersuchten Tiere vom anliegenden Magnetfeld nicht wesentlich davon abhalten ließen, daß Kabel zu überschwimmen. Allerdings gab es auch hier einen Anteil von Tieren, der das Kabel nicht überschwommen hat. Darüber hinaus gab es Hinweise für eine Polarisationswahrnehmung des anliegenden Magnetfeldes. Hier konnte die Befürchtung einer echten Barrierebildung durch einen Magnetwall zumindest etwas relativiert werden.

Auch wenn die Einschätzung der Migration als Produkt einer multifaktoriellen Orientierung richtig ist, kann eine Beeinflussung der Migration nicht völlig ausgeschlossen werden.

Inwieweit feldbedingte Zugvariationen über das normale Maß des genetischen Zugplanes innerhalb des evolutiven Rahmens hinausgehen, ist noch völlig ungeklärt.

Zooplankton

Basaler Teil der Meere ist das Zooplankton. Es umfaßt alle im Wasser schwebenden tierischen Lebewesen, die keine größere Eigenbewegung ausführen und daher passiv durch Wasserbewegungen verdriftet werden. Dazu zählen unterschiedlich große Organismen vom nur wenige Tausendstel Millimeter kleinen Einzeller, über Kleinkrebse in der Millimeter- oder Zentimetergrößenklasse, bis hin zu Quallen mit einem Durchmesser von einem Meter. Es gibt Hinweise für eine Vertikalwanderung, besser für ein Verbleiben am Ort entgegen der Strömung unter Nutzung des Erdmagnetfeldes. Forschungen werden an der Biologischen Anstalt Helgoland/Senkenberg Stiftung Hamburg angestrebt. Das Elbästuar, das Wattenmeergebiet und die offene Nordsee weisen bezüglich ihrer Zooplanktonzusammensetzung zwar Unterschiede auf, gemeinsam ist beiden jedoch eine hohe Bestandsdichte an *Copepoden* (Ruderfußkrebse).

Über die Wirkung von elektrischen Feldern auf das Orientierungsverhalten des Zooplankton sind derzeit keine Erkenntnisse in der Literatur belegt. Ähnlich sieht es bezüglich magnetischer Felder aus. Außer den allgemeinen Erkenntnissen zu Bewegungs- bzw. Orientierungsmechanismen des Zooplanktons gibt es kaum Kenntnis darüber, ob auch das Erdmagnetfeld, beispielsweise in Form einer Magnetotaxis, zur Orientierung herangezogen wird. Nur über eine parasitisch lebende Miracidienart, dem Plattwurm, *Philophthalmus gralli*, ist belegt, daß er im Labor eine nördliche Richtungspräferenz zeigt, die vermutlich auf einer Magnetotaxis beruht (Stabrowski & Nollen 1985). Ein solcher Mechanismus könnte diese Miracidienart unterstützen, das Habitat zu finden, in dem geeignete Wirtstiere vorkommen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist insgesamt nicht klar, inwieweit und ob überhaupt das Zooplankton aktiv navigiert. Eine Veränderung der Planktonverteilung aufgrund eines technischen Magnetfeldes wäre hier besonders folgenreich. Aber selbst wenn tatsächlich einige der Organismen des Zooplankton/Meiobenthos durch das künstliche Magnetfeld des HGÜ-Kabels in ihrem Orientierungsvermögen beeinträchtigt sein sollten, sind wohl keine bedeutsamen negativen Auswirkungen zu erwarten. Erstens ist hinreichend belegt, daß eine Reihe anderer Faktoren (Licht, Strömung, Temperatur etc.) die Verteilung des Zooplanktons im Wasser steuern und zweitens wäre der Anteil des möglicherweise betroffenen Zooplanktons in dem magnetisch relevanten Korridor um die Kabeltrasse im Verhältnis zum Gesamtvorkommen unbedeutend klein.

Makrozoobenthos

Makrozoobenthos ist der Sammelbegriff für alle auf oder im Gewässerboden lebenden Tiere, die größer sind als 2 mm (Hentschel & Wagner 1990). Im wesentlichen fallen aber in diese Kategorie die größeren, Tiere, wie z.B. Anneliden (Ringelwürmer - z.B. Polychaeten), Mollusken (Muscheln und Schnecken), Echinodermen (Stachelhäuter) sowie verschiedene Crustaceen (Krebstiere). Diese relativ ortsständige Bodenfauna kann natürlichen und anthropogenen Veränderungen und Belastungen kaum ausweichen und ist somit in vielen Fällen Indikator für veränderte Umweltverhältnisse (Lozan 1990).

Das Orientierungsvermögen der Vertreter dieser Gruppe ist bis auf wenige Ausnahmen kaum untersucht. Bei etwa 5 Arten, des Zoobenthos (Mollusca und Crustacea) konnte bisher magnetisches Material (möglicherweise Magnetit) in Geweben identifiziert werden. Dies allein kann jedoch nicht als Beleg für die Fähigkeit der Magnetfeldorientierung gelten, da Magnetit auch andere Funktionen haben kann, die nicht mit der Magnetfeldperzeption in Verbindung stehen (z.B. Härtung von Raspelzähnen bei einer Schneckenart). Allerdings gelang bei einigen anderen Arten der Nachweis eines Magnetkompaßgebrauchs. Sowohl bei einer marinen Nacktschneckenart, *Tritonia diomedea* (Lohmann & Willows 1987) als auch bei fünf verschiedenen Krebsarten. Es konnte der Gebrauch des Magnetfelds als einer von mehreren genutzten Parametern zur Orientierung nachgewiesen werden.

Über die Wirkung von elektrischen Feldern auf das Orientierungsverhalten von Schnecken oder der Wattschnecke im besonderen sind derzeit kaum Erkenntnisse in der Literatur belegt. Bei Versuchen mit Schnirkelschnecken, *Cepaea nemoralis*, konnte jedoch ausgeschlossen werden, daß, zumindest bei dieser Art, mögliche Magnetfeldwirkungen durch die Induktion elektrischer Ströme zustande kamen. Außerdem konnten Prato *et al.* 1996 zeigen, daß solche Magnetfeldwirkungen auch nicht auf einer Wechselwirkung mit Magnetit basierten.

Hinsichtlich der magnetischen Felder gibt es jedoch einige wenige Hinweise auf die mögliche Beteiligung solcher Felder bei bestimmten Verhaltensweisen, wenn auch nicht speziell bezüglich der Wattschnecke. Bei einer marinen Nacktschneckenart *Tritonia diomedea* zeigten Lohmann & Willows (1987), daß diese bestimmte Himmelsrichtungen für ihre Ruhepositionen bevorzugt.

Sollte bei einzelnen Vertretern der marinen Schnecken tatsächlich das Erdmagnetfeld zur Orientierung eine Rolle spielen, ist aber auch bei dieser Gruppe aufgrund ihres bekannten sinnesphysiologischen Repertoires anzunehmen, daß dies nicht der einzige Faktor innerhalb des Orientierungssystems darstellt.

Crustacea

Tagsüber liegen Garnelen ruhend auf den Sandböden des Wattenmeers, während sie nachts auf Beutefang gehen. Sie ernähren sich von Algen, Schnecken und kleinen Würmern.

Garnelen laichen mehrmals im Jahr und stellen einen wesentlichen Bestandteil der Nahrung für eine große Anzahl von Fisch- und Vogelarten dar. Wirtschaftliche Bedeutung haben sie für die traditionell von April bis November stattfindende „Krabbenfischerei“. Mit Abnahme der Temperatur führen die Garnelen Wanderungen in Richtung tieferer Gewässer durch. Im März/April, wenn die Erwärmung wieder einsetzt, kehren sie wieder zurück (Lozan 1994). Die Tiere müßten im Elbästuar dabei das Kabel überqueren und Schwierigkeiten dabei könnten zu unbekanntem Entwicklungen im Ökosystem führen.

Über die Wirkung von elektrischen Feldern auf das Orientierungsverhalten von Crustaceen sind derzeit keine Erkenntnisse in der Literatur dokumentiert. Hinsichtlich der magnetischen Felder gibt es jedoch einige Belege, wenn auch nicht speziell über *Crangon crangon*. Ein Magnetkompaßgebrauch konnte bei acht zur Klasse der Malacostraten gehörenden Arten nachgewiesen werden: *Talitrus saltator* (Arendse 1978; Scarpini & Quochi 1992), *Orchestia cavimana* (Arendse & Barendregt 1981), *Talochestia martensii* (Pardi *et al.* 1985, 1988), *Panulirus argus* (Lohmann 1985), *Idotea baltica* (Ugolini & Pezzani 1992) und *Talorchestia tricornuta* (Ugolini *et al.* 1999b). Sowohl über die Strandflöhe (*Talitrus*) als auch über den Hummer *Panulirus argus* gibt es fundiertere Kenntnisse über das Orientierungssystem. Bei der im Westatlantik lebenden Hummerart *P. argus* konnte in Verhaltensexperimenten gezeigt werden, daß diese Art die Polarität des Erdmagnetfeldes vermutlich zum Heimfinden in ihr Revier nutzt (Lohmann *et al.* 1995).

Hummer unternehmen auch Migrationen von bis zu 50 Kilometern, wobei sich mehrere 1000 Individuen in einer Linie anschließen. In einer frühen Feldstudie konnte jedoch auch gezeigt werden, daß sich nicht migrierende Tiere in ihrem Richtungsverhalten durch am Abdomen aufgeklebte Magnete nicht irritieren ließen (Walton & Herrnkind 1977). Dies deutet ebenfalls an, daß Hummer offensichtlich noch andere als magnetische Faktoren zur Orientierung nutzen und daher aller Wahrscheinlichkeit nach auch ein auf mehreren Faktoren basierendes Orientierungssystem entwickelt haben.

Säuger

Die bekanntesten und beliebtesten Tiere der Meere sind die Meerssäuger wie Delphine und Wale. Nur wenige marine Säugetierarten kommen in der Nordsee vor. Nachweise über Funde von magnetischem Material im Gewebe (möglicherweise Magnetit) gibt es bei etwa 6 verschiedenen Säugetierarten, darunter auch bei Delphinen und Menschen. Der erste klare Nachweis, daß auch Säugetiere in der Lage sind, das Magnetfeld zur Orientierung zu nutzen, gelang Burda *et al.* (1990) an einer subterranean, d.h. permanent in unterirdischen Gangsystemen lebenden Nagetierart. In neuesten Untersuchungen konnte der Magnetkompaßgebrauch auch für eine weitere subterranean lebende Nagetierart von meinem Kollegen Marhold belegt werden.

Die Schweinswale der Nordsee (*Phocaena phocaena*) gehören mit einer Maximallänge von 2 m zu den kleinsten Vertretern der Zahnwale und erreichen ein Alter von 17 bis 20 Jahren. Generell wird dem Schweinswal eine sommerliche Zu- und winterliche Abwanderung von den Küsten, ein sogenanntes „Inshore-Offshore“-Wanderungsmuster, zugeschrieben. Beobachtungen belegen, daß die Walart auch das Wattenmeer aufsucht (Lozan 1994). Die Wale, die den Sommer vor der Wattenküste Schleswig-Holsteins und vor Westjütland verbringen, wandern zum Jahresende nach Norden.

Bei marinen Säugetieren konnte bisher nicht gezeigt werden, daß magnetische oder elektrische Parameter eine Rolle für die Orientierung spielen. Jedoch gibt es einige Hinweise bei Walen hierauf. Hier gilt jedoch ebenfalls generell, daß auch Säugetiere aller Wahrscheinlichkeit nach ihr Orientierungsvermögen auf multifaktoriellen Systemen aufbauen. Doch solange die prinzipielle Nutzung des Erdmagnetfeldes kaum untersucht und nicht belegt wurde, ist dies eine Vermutung. Für Seehunde und Kegelrobben gilt das gleiche. Eine Vertreibung aus den angestammten Plätzen in der Elbmündung wäre bei der ohnehin gefährdeten Seehundpopulation ein ökologischer und naturschützerischer Tiefschlag. Gleiches gilt für die letzten Wale. Hier knackt es sowieso schon lange im Gebälk der verschiedenen Lebensgemeinschaften.

Vögel

Vögel gelten als die hinsichtlich der Magnetfeldorientierung am besten untersuchte Tiergruppe. Bei rund 16 verschiedenen Vogelarten konnte bis heute der Gebrauch des Magnetfeldes zur Orientierung nachgewiesen werden (Wiltschko & Wiltschko 1995, 1999). Dabei handelt es sich jedoch in keinem Fall um See- oder Wasservögel. Die Vögel der Trave werden im allgemeinen keinen Kontakt mit dem Magnetfeld des dort liebenden VIKING Cables haben. Nur die tauchenden Arten wie der Kormoran kommen in den Bereich von Feldern von Magnetfeldstärke oder darüber. In dieser Tauchphase ist jedoch eine Verwendung des Erdmagnetfeldes als Orientierungshilfe nahezu ausgeschlossen.

Umwelterykrankungen

Gerade aus den Meeren vor unserer Haustür, wie Nord- und Ostsee sind Umweltkrankheiten in allzu guter bzw. schlechter Erinnerung. Erinnerung sei an die Umweltkatastrophen der großen und kleinen Ölschiffe und die Folgen stetiger Einleitung giftiger Stoffe in die Meere mit ihren schlimmen Folgen für die Gesundheit dieser zum Teil geschwürgeplagten Fische.

Zu diesen offensichtlichen Umweltbeeinflussungen kamen Vermutungen hinzu, daß elektrische und magnetische Felder ebenfalls negative Wirkungen hervorrufen können. Es werden mögliche Beeinträchtigung der Gesundheit bzw. der Fortpflanzungsfähigkeit von aquatischen Meereslebewesen vermutet. Bei der Beantwortung dieser Frage und der sich

daraus ergebenden Bedeutung für aquatische Ökosysteme stellten wir sehr schnell fest, daß für Wasserlebewesen sehr wenig bekannt ist. Die vorhandene Fachliteratur, über die mögliche gesundheitsrelevante Wirksamkeit elektrischer und magnetischer Felder ergibt für die Intensitäten, die in der Umgebung der Tiere und Pflanzen zu erwarten sind weder Hinweise auf negative gesundheitliche noch auf Fertilitätsbeeinträchtigungen. Allerdings gibt es auch kaum Untersuchungen zu diesen Themen.

Reaktionen von Fischen durch stärkere künstliche elektrische Felder finden sich bei der Nutzung von Strom als Fischfanghilfe. Hierbei hat man Reaktionen ab 1 V/m festgestellt. Schädliche Einwirkungen treten erst bei erheblich höheren Feldern auf (Halsband 1967, Lamarck 1999). Allerdings werden für den Fischfang niederfrequente elektrische Felder benutzt. Über eine andere Nutzung als diese ist uns nichts bekannt ist.

Statische Felder im Bereich von einigen Tausend Volt finden bei der Fischzucht Anwendung. Hierbei wird Fischbrut in ein statisches elektrisches Feld gebracht und für den Zeitraum seiner Entwicklung dort belassen. Es wurde eine gesteigerte Fitness festgestellt, verbunden mit einer niedrigeren Mortalitätsrate. Ob diese Methode über die Patentierung hinaus wirklich angewendet wird, ist uns nicht bekannt.

Hinweise auf die Schädlichkeit sehr starker elektrischer Felder werden von einigen Autoren berichtet. Die verwendeten Felder sind so stark, daß sie für die Betrachtung der bisher bekannten Felder in aquatischen Systemen ausgeklammert bleiben können. Weiterhin zeigten Untersuchungen an bestehenden Seeelektroden eines Kabels von Dänemark zur Insel Laeso keine schädlichen Auswirkungen. Auch wurde kein Meideverhalten der benthischen Tiere beobachtet.

Gesundheitsschädigungen durch elektrische Felder in den Größenordnungen der betrachteten technischen Systeme sind z.B. bei tauchenden Vögeln aus der Trave nicht bekannt geworden.

Gesundheitsschädigungen durch elektromagnetische Felder sind natürlich auch für Meeressäuger eine mögliche Bedrohung. Hier kommen prinzipiell Seehunde und Wale in Betracht. Die umfangreiche Literatur zur Wirkung von elektrischen Feldern in Luft geht von Schädigungen erst bei sehr hohen Feldstärken im Kilovoltbereich aus (SSK 1998). Für die Sicherheit von Schwimmern im Wasser geht man von einem Wert von 3 V/m aus (Berechnung von STATKRAFT, pers. Mitteilung F. Koops). Diese Werte treten jedoch im Bereich genannter Systeme bei weitem nicht auf.

Co-Faktoren

Schließlich ist noch zu untersuchen, ob und wie durch das Kabel entstandene lokale Veränderungen der Nordsee als Co-Faktoren auf die Gesundheit der betroffenen Tierwelt wirken können. Ein Co-Faktor ist eine Einflußgröße, die bestehende Wirkungen elektrischer oder

magnetischer Felder des Kabels verstärken oder vermindern oder unterschwellige Reizwirkungen verstärken kann. Hier kommen Temperatureinträge oder chemische Veränderungen als sekundäre Folgen der Temperaturerhöhung z.B. eines Seekabels in Frage. Die Beantwortung der Frage ist noch offen.

Resümee

Die bisher genannten Beispiele elektrischer und magnetischer Felder auf ausgewählte große aquatische Ökosysteme vernachlässigen die Bereiche niederfrequenter und hochfrequenter Felder. Sie vernachlässigen ebenso die aquatischen Pflanzen. Ein Blick in die Fachliteratur bietet hier ein trauriges Bild, das die Primärproduzenten unserer Erde nicht verdient haben. Andererseits machen sie deutlich, wie schwierig die Beschäftigung mit diesem Thema ist, wenn man nach konkreten Anhaltspunkten fragt und nicht nur Vermutungen äußert. Das persönliche Schicksal einer Tierart ist uns durch seine Auswahl zum Experimentalobjekt manchmal bekannt. Wir wissen immerhin etwas über seine Reaktionen meistens in Experimentalsituationen und meinen seine individuellen Beeinflussungen zu kennen.

Neben den individuellen Folgen negativer Feldwirkungen sind die ökologischen Resultate von besonderer Bedeutung. Was würde es beispielsweise bedeuten, wenn im Wattboden eine oder mehrere Arten besser oder schlechter als vorher gediehen? Was bedeutet das völlige Ausscheiden aus der Lebensgemeinschaft im Einflußbereich eines elektrischen oder magnetischen Feldes? Was bedeutet es, wenn die Aale aus dem Sargassomeer es nicht mehr in die Elbe oder andere Flüsse östlich der verlegten Kabel schaffen, oder in die falschen Flüsse umgeleitet würden. Ist etwas dran, wenn behauptet wird, über einem Fluß hängende Hochspannungskabel würden stromaufziehende Fische abschrecken und was bedeutet dies für das Flußsystem? Was, wenn Meeressäuger wie die Wale auf ihren langen Zügen fehlgeleitet würden? Sind die Massenstrandungen dieser Tiere eine Folge durch elektromagnetische Felder hervorgerufener Fehlorientierung?

Hierauf verlässliche Antworten zu finden, ist einen Schritt zu weit gegangen. Zumindest gilt das für unser jetziges Wissen über Ökosysteme, aber erst recht über unsere Erkenntnisse über Einflüsse elektromagnetischer Felder auf aquatische Lebewesen. Andererseits sei nicht verschwiegen, daß das Risiko durch elektromagnetische Felder nachhaltig aquatische Ökosysteme zu beeinflussen wahrscheinlich nicht das größte und wichtigste sei. Es reiht sich ein in die vom Menschen durchgeführte willentliche oder versehentliche Wasserverschmutzung. Es ist eine zusätzliche Komponente zur Überfischung und zur Faunenverfälschung der Seen, Flüsse und Meere die unsere Beachtung verdient.

Literatur

- Arendse, M.C. (1978): Magnetic field detection is distinct from light detection in the invertebrates *Tenebrio* and *Talitrus*. *Nature* 274: 358-362.
- Arendse, M.C. & A. Barendregt (1981): Magnetic orientation in the semi-terrestrial amphipod *Orchestria cavimana*, and its interrelationship with photo-orientation and water loss. *Physiol. Entomol.* 6: 333-342.
- Branover, G.G., Vasilyev, A.S., Gleizer, S.I. & A.B. Tsinober (1971): A study of the behavior of the eel in natural and artificial magnetic field and an analysis of its reception mechanism. *J. Ichthyol.* 11: 608-614.
- Burda, H., Marhold, S., Westenberger, T., Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1990): Magnetic compass orientation in the subterranean rodent *Cryptomys hottentotus* (Bathyergidae). *Experientia* 46: 528-530.
- Delder, C.L. (1952). On the migration of the elver (*Anquilla vulgaris* Turt.) at sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 18: 187-218.
- Eckert, R. (1986): Tierphysiologie. Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 697 pp.
- Karlsson, L. (1985): Behavioural responses of European silver eels (*Anguilla anguilla*) to the geomagnetic field. *Helgol. Meeresunters.* 39: 71-81.
- Kirschvink, J.L. & J.L. Gould (1981): Biomagnetic magnetite as a basis for magnetic field detection in animals. *Biosystems.* 13: 181-201.
- Kullnick, U. (1992): Kurzbericht über die Ergebnisse einer Literatur-Recherche zur Fragestellung: Sind Wirkungen statischer Magnetfelder in der Größenordnung 0,1-4 mT auf marine Lebewesen bzw. auf den Menschen aus der Literatur bekannt? *Zool. Inst. TU, Braunschweig. Stellungnahme zur Thematik im Auftrag der PreussenElektra, Hannover* 6 pp.
- Kullnick, U. (1994a): Einschätzung der Wirkung technisch erzeugter, schwacher, statischer Magnetfelder (Baltic Cable) auf die Fauna des Süß-, Brack- und Meerwassers. *Zool. Inst. TU, Braunschweig. Gutachten im Auftrag der PreussenElektra, Hannover*, 16 pp.
- Kullnick, U. (1994b): Versuch der Beurteilung des möglichen Magnetfeldeinflusses des Baltic Cable auf das Benthos als Teil des Lebensraumes der Untertrave. *Zool. Inst. TU, Braunschweig. Gutachterliche Stellungnahme im Auftrag der PreussenElektra, Hannover*, 4 pp.
- Kullnick, U. (1994c): Gutachterliche Stellungnahme zur Auflage 5.8 des naturschutzrechtlichen Bescheides der unteren Naturschutzbehörde vom 26.03.1993 i. d. F. des naturschutzrechtlichen Abhilfebescheides vom 07.07.1993 und in der Gestalt des Widerspruchbescheides des Landesamtes für Naturschutz und Landschaftspflege Schles-

- wig Holstein, Kiel vom 21.03.1994. Zool. Inst. TU, Braunschweig. Gutachterliche Stellungnahme im Auftrag der PreussenElektra, Hannover, 16 pp.
- Kullnick, U. (1995): Einschätzung der Wirkung technisch erzeugter, schwacher, statischer Magnetfelder (Viking Cable) auf an der Trasse lebende Meerestiere der Nordsee. Zool. Inst., TU, Braunschweig. Gutachten im Auftrag der PreussenElektra, 10 pp.
- Kullnick, U. & S. Marhold (1999): Abschätzung direkter und indirekter biologischer Wirkungen der elektrischen und magnetischen Felder des EuroKabel / Viking Cable HGÜ-Bipols auf Lebewesen der Nordsee und des Wattenmeeres.
- Lohmann, K.J. (1985): Geomagnetic field detection by the Western Atlantic spiny lobster, *Panulirus argus*. Mar. Behav. Physiol. 12: 1-17.
- Lohmann, K.J. & O.D. Willows (1987): Lunar-modulated geomagnetic orientation by a marine mollusc. Science 235: 331-334.
- Lohmann, K.J., Pentcheff, N.D., Nevitt, G.A., Stetten, G.D., Zimmerfaust, R.K., Jarrard, H.E. & L.C. Boles (1995): Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean - experiments with undersea coil systems. J. Exp. Biol. 198: 2041-2048.
- Lozán, J.L. (Hrsg.) (1990): Warnsignale aus der Nordsee. Verlag Paul Parey, Berlin.
- Lozán, J.L. (Hrsg.) (1994): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell-Wiss.-Verl., Berlin.
- Miles, S.G. (1968): Laboratory experiments on the orientation of the adult American eel, *Anguilla rostrata*. J. Fish. Res. Board Can. 25: 2143-2155.
- Pardi, L., Ercolini, A., Ferrara, F. & F. Scapini (1985): Orientamento zonale solare e magnetico in Crostacei Anfipodi litorali di regioni equatoriali. Att. Accad. Lincei Rend. Sci. Fis. Mat. Nat. 76: 312-320.
- Poleo, A.B.S. & M. Harboe (1996): Hochspannungsgleichstrom Übertragungs-(HGÜ)-Seekabel und Unterwasserelektroden: Auswirkungen auf die Tierwelt des Meeres. Eine Literaturstudie für Kabelprojekte. Im Auftrag der EUROKABEL / VIKING CABLE. Oslo, 47 pp.
- Prato, F.S., Kavaliers, M. & J.J.L. Carson (1996): Behavioural evidence that magnetic field effects in the land snail, *Cepaea nemoralis*, might not depend on magnetite or induced electric currents.
- Scarpini, F. & G. Quochi (1992): Orientation in sandhoppers from Italian populations - have they magnetic orientation ability? Bull. Zool. 59: 437-442.
- Souza, J.J., Poluhowich, J.J. & R.J. Guerra (1988): Orientation responses of American eels, *Anguilla rostrata*, to varying magnetic fields. Comp. Biochem. Physiol. A 90: 57-61.
- Stabrowski, A. & P.M. Nollen (1985): The response of *Philophthalmus gralli* and *P. megalurus* to light, gravity and magnetic fields. Int. J. Parasitol 15: 551-555.
- Tesch, F.W. (1972): Versuche zur telemetrischen Verfolgung der Laichwanderung von Aalen (*Anguilla anguilla*) in der Nordsee. Helgol. Wiss. Meeresunters. 23: 165-183.
- Tesch, F.W. (1974 b): Speed and direction of silver and yellow eels, *Anguilla anguilla*, released and tracked in the open North Sea. Ber. Dt. Wiss. Komm. Meeresforsch. 23:

81-197.

- Tesch, F.W., Wendt, T. & L. Karlsson (1992): Influence of geomagnetism on the activity and orientation of the eel, *Anguilla anguilla* (L.), as evident from laboratory experiments. Ecol. Freshwater Fish 1: 52-60.
- Ugolini, A. & A. Pezzani (1992): Learned solar orientation in *Idotea baltica*. Mesogee (Bull. Mus. Hist. Nat., Marseille) 52: 77.
- Walton, A.S. & W.F. Herrenkind (1977): Hydrodynamic orientation of spiny lobster, *Panulirus argus* (Crustacea: Palinuridae): wave surge and unidirectional currents. Mar. Sci. Res. Lab. Tech. Rep. 20: 184-211.
- Westerberg, H. (1999): Telemetrierverfolgung von Blankaal am Polkabel von Baltic Cables 1997 und 1998. Jahresbericht Version 0 vom 20.05.99, Fiskeriverket, Schweden. Aus dem Schwedischen, 30 pp.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1995): Magnetic orientation in animals. Springer Vlg., Berlin, Heidelberg, New York, 297 pp.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1999): The orientation systems of birds - II. Homing and navigation. J. Ornithol. 140: 129-164.
- Yorke, E.D. (1981): Sensitivity of pigeons to small magnetic field variations. J. Theor. Biol. 89: 533-537.

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

Stephan Marhold ⁽¹⁾ & Uwe Kullnick ⁽²⁾

⁽¹⁾ Zoologisches Institut der J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main, AG Magneto-neurobiologie, Siesmayerstr. 70, D-60323 Frankfurt, Germany, marhold@zoology.uni-frankfurt.de

⁽²⁾ Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2, D-47475 Kamp-Lintfort/Universität Duisburg, kullnick@imst.de

Einführung und Datenbasis

Der Teil II unserer Präsentation beschäftigt sich mit der Frage, welche Erkenntnisse über mögliche Auswirkungen elektrischer und/oder magnetischer Felder auf das Orientierungssystem von Organismen vorliegen. Dies unter besonderer Berücksichtigung der Fauna im Bereich des deutschen Festlandssockels der Nordsee (s. Teil I).

Die im folgenden geschilderten Erkenntnisse basieren auf einem für EuroKabel / Viking Cable von Kullnick & Marhold (1999) erstellten Gutachten. Dieses baut wiederum auf mehreren Einzelgutachten der Jahre 1992-1995 auf sowie auf einem Gutachten von Koops (1995) und einer von Poleo & Harboe (1996) angefertigten Literaturstudie. In das aktuelle Gutachten ist zusätzlich die Auswertung der aktuellen Literatur folgender Datenbanken oder Literatursammlungen mit eingeflossen:

- Literatursammlung des Arbeitskreises Magnetoneurobiologie am Zoologischen Institut der J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main
- Sammlung des Zoologischen Instituts der TU Braunschweig
- R. & W. Wiltschko: "Magnetic Orientation in Animals", Springer 1995
- Internet-Recherche nach ausgewählten Stichworten
- Medline
- Current Contents
- Biological Abstracts
- WBLDB TH Aachen
- EMF-Database

Nutzung magnetischer oder elektrischer Felder zur Orientierung

Eine von mehreren Zielsetzungen des o.g. Gutachtens war die Klärung der folgenden Frage: *Bei welchen Tiergruppen wurde bisher in der Literatur ein Gebrauch elektrischer und/oder magnetischer Felder zur Orientierung dokumentiert?*

Zur Klärung dieser Frage wurden insbesondere (aber nicht ausschließlich) die Tiergruppen / Tierarten berücksichtigt, die sich in der Nordsee im Bereich des Deutschen Festlandssockels vorübergehend oder dauerhaft aufhalten (s.o.). Die Literaturanalyse war im wesentlichen auf Tierarten folgender Organismengruppen fokussiert: Zooplankton/Meiobenthos, Makrozoobenthos, Fischfauna, Avifauna, Marine Säugetiere. Wenn bei speziellen Fragestellungen¹ keine Erkenntnisse über diese Arten in der Literatur vorlagen, wurde nach entsprechenden Informationen verwandter oder ähnlich lebender Arten gesucht.

Die Analyse ergab Belege oder deutliche Hinweise eines Gebrauchs magnetischer und/oder elektrischer Felder zur Orientierung bei Vertretern aus den folgenden Tiergruppen: **Makrozoobenthos (Crustacea, Malacostraca: z.B. Strandflöhe), Fischfauna (Osteichthyes: Aale, Lachse, Forellen, evtl. Schollen; Chondrichthyes: Haie, Rochen), Avifauna (z.B. Möwen) und marine Säugetiere (nur Hinweise aber keine Nachweise bei Walen).**

Orientierung als multifaktorieller Prozeß

Ein Nachweis des Gebrauchs magnetischer oder elektrischer Faktoren reicht aber alleine nicht aus, um auf eine tatsächliche Beeinträchtigung der Orientierungsfähigkeit durch künstliche Felder schließen zu können. Daher wurde in einer weiteren Betrachtung analysiert, welche potentiellen Faktoren zur Orientierung bekannt sind (Tabelle 1) und welche Rolle dabei magnetische und/oder elektrische Faktoren in bezug auf das Gesamtsystem spielen.

Alle in Tabelle 1 genannten Faktoren können theoretisch in Orientierungsprozessen involviert sein. Je nach Lebensraum, Lebensweise oder Lebensabschnitt steht einem Individuum jedoch nur ein Teil der oben aufgelisteten Parameter zur Verfügung. Um eine Orientierungsleistung im Sinne einer Navigation vollbringen zu können, genügt es nicht, alleine den Kompaßkurs zu kennen. Hierfür muß die Kompaßrichtung des Zielortes in bezug auf den Ausgangsort bestimmt werden (d.h. in Analogie eines menschlichen Navigationsprozesses, die Benutzung von Karteninformation). Zusätzlich muß der entsprechende Kurs, der zum Zielort führt, festgelegt werden (d.h. der Gebrauch von Kompaßinformation).

¹ Mit speziellen Fragestellungen sind hier Organismen gemeint, die (aufgrund ihrer Bedeutung) als sog. Schlüsselarten definiert wurden.

Tabelle 1: Orientierungsrelevante Faktoren.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Chemische Information (Geruch, Geschmack, Salinität, Hormone/Pheromone)▪ Taktile Information (Erschütterungen, Kontaktreize, Luft- und Wasserströmungen)▪ Akustische Information (Geräuschquellen, Sonar, Infra-, Ultraschall)▪ Physikalische Information (Temperatur, Gravitation, Druckgradienten)▪ Magnetische Information (Polarität, Inklination, Induktion, Gradienten, Anomalien)▪ Elektrische Information (Perzeption elektrischer Felder, Wasserströmungsmuster)▪ Kinästhetische Information (Erfassen der eigenen Bewegung über propriozeptive Rückkopplung)▪ Visuelle Informationen (Hell-/Dunkel-, Bildsehen [Landmarken/Seemarken], Himmelfaktoren, Spektralmuster) |
|---|

Dieses sogenannte Karte-Kompaß-Prinzip als ein Zwei-Schritte-Prozeß wurde erstmals von Kramer (1952, 1953) beschrieben und liegt auch heute noch allen theoretischen Überlegungen über den Ablauf eines Orientierungs- bzw. Navigationsprozesses von Tierarten zugrunde. Die Orientierungsfaktoren, die für einen derartigen Prozeß herangezogen werden, können je nach Tierart aber auch Tierpopulation unterschiedlicher Natur sein (Wiltschko *et al.* 1987; Wiltschko & Wiltschko 1989). Als Kompaßfaktoren sind im Tierreich, soweit bisher untersucht, sowohl der Sonnenkompaß² (Kramer 1950) oder bei nachtaktiven Tieren der Sternkompaß (Emlen 1967a, b) als auch der Magnetkompaß (Merkel & Wiltschko 1965; Wiltschko 1968) weit verbreitet. In der Regel werden mehrere verfügbare Kompaßinformationsquellen redundant benutzt und/oder dienen der gegenseitigen Eichung sowie Kalibrierung (Wiltschko *et al.* 1983; Wiltschko & Wiltschko 1990).

Die Nutzung der sogenannten kartenrelevanten Faktoren scheint weniger einheitlich zu sein. Grundsätzlich eignen sich alle adäquaten Parameter, die in irgendeiner Weise Gradienten aufweisen. Eine verfrachtete Taube beispielsweise nutzt dabei sowohl Weginformation (die Information, die sie während der Verfrachtung aufnehmen kann) als auch Ortsinformation (direkt am Auflaßplatz). Der Gebrauch beider Informationsquellen muß dabei erlernt werden (Wiltschko & Wiltschko 1993; R. Wiltschko & Wiltschko 1999). Auch bei vielen anderen Tierarten zeigen sich, soweit das Verhaltensrepertoire vergleichbare Versuche zuläßt, teilweise ähnliche Orientierungsmechanismen und -strategien, jedoch können die genutzten Faktoren je nach Lebensraum und -weise erheblich voneinander abweichen.

² Der Sonnenkompaß als ein orts- (Breitengrad) und zeitabhängiges System setzt ein präzises Zeitempfinden voraus, eine sogenannte innere Uhr, die durch circadiane und circannuale Rhythmen synchronisiert wird (Schmidt-König 1960). Nur bei entsprechender Integration des Sonnenstandes über die Zeit wird es möglich, die Sonne als Richtungsgeber bzw. Kompaß zu nutzen.

Häufig werden lokal begrenzt auftretende Faktoren als sogenannte Landmarken genutzt. Allgemein spielt beim Erkunden neuer Gebiete das Prinzip der Wegumkehr eine wichtige Rolle (Rekapitulierung des Hinwegs in umgekehrter Folge). Hierbei können Landmarken dazu dienen, erfolgreich zurückzukehren und Fehler zu vermeiden. Auch magnetische Faktoren spielen bei einer Reihe von untersuchten Tierarten eine Rolle (meist als Kompaßmechanismus), werden aber nach bisherigen Erkenntnissen nicht exklusiv, sondern im Verbund mit anderen Faktoren genutzt. Dies haben u.a. sogenannte Konkurrenzexperimente, bei denen mehrere sich in ihrer Information widersprechende Faktoren in Konkurrenz zueinander gesetzt werden, gezeigt (z.B. Wiltshko & Wiltshko 1995). Der einzige Beleg für das ausschließliche Nutzen magnetischer Faktoren existiert für eine bestimmte Bakteriengruppe (*Magnetospirillum*), die mit diesem Mechanismus in der Lage ist, in für sie günstige (schlammreiche) Gebiete zu kommen (Blakemore 1975). Dieser Mechanismus ist allerdings ein rein passiver, d.h. er funktioniert auch bei abgetöteten Bakterien, da er auf inkorporierten Magnetpartikeln (Magnetit) basiert.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß es sich bei den Orientierungssystemen „höherer“ Tierarten (soweit bisher untersucht und belegt) ausnahmslos um multifaktorielle Systeme handelt, d.h. mehrere zur Verfügung stehende Orientierungsparameter werden z.T. redundant genutzt. Daraus läßt sich folgern, daß die magnetische oder elektrische Information nur einen Parameter unter mehreren Faktoren darstellt. Die Frage, inwieweit dieser eine Faktor möglicherweise je nach Tierart und/oder Orientierungsleistung unterschiedliche (möglicherweise entscheidende) prozeßspezifische Bedeutung hat, läßt sich hiermit allerdings nicht grundsätzlich beantworten. Die (z.T.) redundante Nutzung mehrerer Faktoren hat im Falle des Ausfalls eines oder mehrerer Orientierungsparameter prinzipiell eine größere Prozeßsicherheit zur Folge. Die damit erreichte Stabilisierung des Orientierungsprozesses hat sich daher vermutlich im Verlauf der Evolution durch entsprechende Selektionsmechanismen herausgebildet.

Beispiel eines anadromen Wanderfisches (Lachs)

Lachse besiedeln hauptsächlich küstennahe Gewässer (z.T. aber auch die offene See) und schwimmen zum Laichen bis in die Oberläufe von Flüssen. Der Laich wird an überströmten Stellen abgelegt, die Larven schlüpfen je nach Wassertemperatur nach 70 bis 200 Tagen. Die Junglachse ziehen nach 1 bis 3 Jahren ins Meer, wo sie heranwachsen bis sie geschlechtsreif werden. Als adulte Tiere wandern die Lachse wieder in ihre Heimatflußsysteme, in denen sie vor Jahren ausgeschlüpft sind. Viele Lachse sterben nach dem Ablachen. Einige unternehmen aber auch die Wanderung ein zweites Mal (Vilcinskas 1996).

Es gibt mehrere Belege in der Literatur, daß Lachse sich zumindest in bestimmten Lebensphasen anhand magnetischer Felder orientieren können. Quinn (1980) konnte z.B. an Jungtieren der nordamerikanischen Blaurückenlachsart *Oncorhynchus nerka* zeigen, daß sie, wenn ihnen kein anderer Faktor zur Verfügung stand, auf eine künstliche Veränderung der Horizontalkomponente des Magnetfelds mit einer entsprechenden Abweichung in ihrer Präferenzrichtung reagierten (Tabelle 2). Dieselben Tiere zeigten allerdings keine Veränderung, wenn sie zusätzlich Sicht auf den Himmel hatten. Dies zeigt, daß ähnlich wie beispielsweise bei Vögeln, mehrere Faktoren eine Rolle spielen und daß in dem dargestellten Fall visuelle Faktoren offensichtlich über magnetische dominieren. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend, welche Faktoren in welchem Lebensabschnitt des Lachses nachweislich eine Rolle spielen oder zumindest als Orientierungsfaktoren vermutet werden. Die mit Fragezeichen versehenen Faktoren konnten bisher nicht nachgewiesen werden, werden aber als richtungsweisende Faktoren vermutet. Modifiziert nach Groot (1982).

Tabelle 2: Nachgewiesene bzw. vermutete (?) Orientierungsfaktoren beim Blaurückenlachs (*Oncorhynchus nerka*).

Migration	Lebensphase	Faktoren
Vom Laichplatz zur „Kinderstube“ (Oberlauf)	erste Tage nach dem Schlüpfen	Strömung Gerüche/Geschmack Land/Seemarken (?) Erdmagnetfeld Himmelsfaktoren
Vom Oberlauf flußabwärts Richtung Meer	Jungfisch	Strömung Land/Seemarken (?) Erdmagnetfeld Himmelsfaktoren
Im Ozean	Jugendfisch	Meeresfaktoren (?) Erdmagnetfeld (?) Himmelsfaktoren (?)
Heimatküste und Mündungsgebiet	Erwachsener Fisch	Räumliche Karte (?) Erdmagnetfeld (?) Himmelsfaktoren (?) Gerüche/Geschmack
Innerhalb des Geburtsflußsystems flußaufwärts zu den Laichplätzen	Erwachsener Fisch (geschlechtsreif, zum Ablachen bereit)	Strömung Gerüche/Geschmack Erdmagnetfeld (?) Himmelsfaktoren (?)

Offensichtlich sind Lachse also in der Lage, das Magnetfeld zur Orientierung zu nutzen. Auch wenn bisher kein direkter Nachweis bei in der Nordsee vorkommenden Atlantiklachsen (*Salmo salar*) gelang (s. Rommel & McCleave 1973; Varanelli & McCleave 1974), ist es wahrscheinlich, daß auch diese Art in der Lage ist, magnetische Faktoren zur Orientierung heranzuziehen. Wie gezeigt werden konnte, stellt das Erdmagnetfeld aber nicht den einzigen Faktor dar. In einer neueren Untersuchung konnte ebenfalls an Blaurückenlachsen gezeigt werden, daß diese ihre Heimatflüsse vom offenen Meer aus sowohl durch visuelle, als auch durch Geruchsfaktoren finden (Ueda 1998). In einer anderen Untersuchung wurde der Frage nachgegangen, ob sich Lachse der Art *Oncorhynchus keta* durch Magnetfelder, die etwa der 12fachen Intensität des Erdmagnetfelds entsprechen, in ihrem Richtungsverhalten beeinflussen lassen. Dabei gab es im Vergleich zur Kontrolle ohne künstliches Feld weder Effekte in der horizontalen noch in der vertikalen Bewegungsrichtung. Interessanterweise reduzierten aber die Tiere, sowohl wenn das künstliche Feld an war, als auch wenn es abgeschaltet war, vor jeder Richtungsänderung signifikant die Schwimmggeschwindigkeit (Yano *et al.* 1997).

Freilandversuche

Insgesamt gibt es nur eine vergleichsweise geringe Anzahl aussagekräftiger Freilandstudien, die das Orientierungsverhalten mariner Tierarten in bezug auf magnetische und/oder elektrischer Felder analysieren. Unter den Fischen sind wandernde Arten diesbezüglich noch am besten untersucht. Es gibt eine aktuelle Untersuchung von Westerberg & Begout-Anras (1999) speziell über mögliche Einflüsse künstlicher Magnetfelder auf das Wanderverhalten von Silberaalen. Diese Studie wurde von Fiskeriverket (Fischereiamt) in Schweden (bei Trelleborg) im Auftrag von Vattendomstolen zwischen 1997 und 1998 durchgeführt. Hierbei sollte untersucht werden, ob die vom BALTIC Cable erzeugten Magnetfelder einen Einfluß auf das Wanderverhalten von Aalen haben können, die diesen Bereich durchschwimmen. Das BALTIC Cabel verbindet Deutschland und Schweden. Es fließt ein maximaler Strom von 1330 Ampere in einer Wassertiefe von bis zu 45 Metern. Ein Teil des Kabels führt durch die Trave.

Bei den untersuchten Silberaalen handelte es sich um Weibchen zwischen 1 und 1,5 kg Körpermasse, die im Bereich des Kabels telemetrisch verfolgt wurden. Die Aale wurden zunächst 20 bzw. 40 km östlich des Kabels gefangen, mit Ultraschallsendern versehen und dann in 3-4 km Entfernung zum Kabel (östlich des Kabels) in einer Tiefe zwischen 12 und 15 Meter wieder ausgesetzt. Die natürliche Wanderoute der Aale zeigt in diesem Bereich einen westlichen bis südwestlichen Verlauf. Anhand von Augengröße, Farbe und Aktivitätsstatus ließen sich die Aale als wanderungswillig identifizieren. Daher kann mit großer Wahrchein-

lichkeit davon ausgegangen werden, daß sich die untersuchten Aale tatsächlich auf der Migration befanden.

Die Mehrzahl der Tiere zeigte entsprechend eine über mehrere Kilometer westwärts gerichtete Schwimmrichtung. In zwei zeitlich voneinander getrennten Versuchsreihen (27. Oktober bis 4. November 1997 - überwiegend Neumond - und 23. Oktober bis 4. November 1998 - zunehmender Mond bis Vollmond) wurden insgesamt 21 von 27 mit Sendern versehene Silberaale nach Einsetzen der Dunkelheit für durchschnittlich $3,6 \pm 0,21$ Stunden pro Tier telemetrisch verfolgt. Innerhalb der Beobachtungszeit passierten 12 Tiere (57%) das Kabel, während bei insgesamt 9 Tieren eine Passage innerhalb des Verfolgungszeitraums nicht festgestellt werden konnte. Sechs weitere Tiere konnten aus technischen oder verhaltensbedingten Gründen (z.B. wenn die Tiere innerhalb des Beobachtungszeitraums kein Wanderungsverhalten zeigten) nicht telemetrisch verfolgt werden. Während der Versuche wurde das Kabel in der Regel mit 80-100% der Volllast betrieben. Bei insgesamt drei Versuchen führte das Kabel überhaupt keinen Strom. Die Meeresströmung betrug überwiegend etwa maximal 20% der Schwimmgeschwindigkeit der Aale (zwischen 1 und 12 cm/s - meist aus östlichen oder westlichen Richtungen).

Bei Betrachtung der einzelnen Schwimmwege über das Kabel hinweg kam es in mehreren (aber nicht in allen) Fällen zu Abweichungen von der ursprünglichen Schwimmrichtung³, meist in Form einer südlichen - dies betrifft z.B. auch zwei Kabelpassagen bei nicht stromführendem Kabel - oder einer nördlichen Verschiebung. Dies könnte möglicherweise, im Falle der Versuche bei Betrieb des Kabels, auf einen Einfluß des Kabelmagnetfeldes auf das Magnetkompaßsystem der Aale schließen lassen. Betrachtet man jedoch die aufgezeichneten Schwimmwege in weiterer Entfernung zum Kabel (ca. 3-4 km), so zeigen die Aale auch in diesen kabelfernen Bereichen häufigere Richtungswechsel, d.h. sie schwimmen nicht in einer geraden Linie.

In früheren Telemetrieuntersuchungen an Aalen vor Inbetriebnahme des Kabels (insgesamt 64 Telemetrieversuche in schwedischen Gewässern) hatte sich gezeigt, daß über eine vergleichbar lange Beobachtungszeit 42% der Aale eine Richtung wählten, die mehr als 90° von der optimalen Wanderungsrichtung (hinaus aus der Ostsee) abwich (Westerberg 1979, 1980, 1982; Tesch *et al.* 1989; Westerberg 1994 – zitiert nach Westerberg 1999). Dies stimmt laut Westerberg (1999) gut mit der Tatsache überein, daß in der aktuellen Studie 43%

³ Bei der Aufzeichnung der Schwimmrichtungen muss auch die Genauigkeit der Messmethodik berücksichtigt werden. Die GPS-gestützte Positionsgenauigkeit beträgt ≤ 10 m (zur Positionsbestimmung wurde der Verfolgungsweg des Bootes herangezogen). Für die Detailverfolgung im Bereich des Kabels wurden im Abstand von jeweils 1 km Bojen mit einer Sendempfangseinrichtung versehen und die Signale der Aalsender auf diese Weise auf das Boot übertragen. Die Bojen selbst hatten einen Bewegungsradius von 10 m. Zur Positionsbestimmung des Aals wurden jeweils 3 Bojen (Dreieck) angepeilt. Befindet sich der Aal im Zentrum des Dreiecks, beträgt der Fehler bei feststehender Boje nur etwa 1 m, befindet er sich in einer ungünstigeren Position, kann die Abweichung jedoch sehr schnell deutlich größere Werte annehmen.

der Aale das Kabel innerhalb der durchschnittlichen Beobachtungszeit von 3,6 Stunden nicht überschwommen haben, wobei auch hier sicherlich nicht zweifelsfrei bekannt ist, ob sich die telemetrierten Aale tatsächlich auf der Wanderung in Richtung Sargassosee befanden und daher die entsprechende Erwartungsrichtung vorausgesetzt werden kann (s.o.).

Zusammenfassend läßt sich aus den Versuchsergebnissen der Studie zum BALTIC Cable (Westerberg 1999) folgern, daß die Aale trotz des Magnetfelds des Kabels in der Lage sind, dieses zu überqueren. Damit scheint eine unüberwindliche Barrierewirkung innerhalb der untersuchten Feldstärken im Untersuchungsgebiet ausgeschlossen zu sein. Noch nicht völlig klar ist, ob es möglicherweise einen Zusammenhang zwischen dem Magnetfeld des Kabels und einer nicht auszuschließenden fehlgerichteten Veränderung der Schwimmrichtung gibt. Insbesondere bezüglich der Verhältnisse im Flachwasserbereich liegen derzeit noch keine Freilanduntersuchungen vor.

Laboruntersuchungen

Laboruntersuchungen haben im Gegensatz zu Freilanduntersuchungen den Vorteil, daß die meisten Einflußgrößen relativ gut kontrolliert werden können. Da auf der anderen Seite nicht alle Faktoren unter Laborbedingungen berücksichtigt werden können, die möglicherweise im Freiland eine Rolle spielen, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse aber oft fraglich. Die Chance, grundlegende Wirkungsmechanismen sowie kausale Zusammenhänge zu finden, kann jedoch im Labor u.U. größer sein. Zumindest ist im Vergleich zu Freilanduntersuchungen der experimentelle Aufwand meist geringer.

Im Auftrag der HEW ist von Mai bis Juli 1999 in einer gemeinsamen Kooperation zwischen dem Meeresforschungsinstitut Senckenberg -„*Systems Ecology Group*“ – Hamburg (ehemals Biologische Anstalt Helgoland) und dem Zoologischen Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt eine Untersuchung zum Schwimmverhalten von Jungaalen, *Anguilla anguilla*, (Satzale – Körpermasse 5-7 g) durchgeführt worden (Exp. Durchführung: H. Fock & P. Johanssen). Bei diesen Laborexperimenten wurden in fünf verschiedenen Abstufungen magnetische Bedingungen (Gradienten) simuliert, die ein ähnliches Abbild der In-situ-Situation beim Betrieb des geplanten EuroKabel/VIKING Kabels (in unterschiedlichen Entfernungen zum Kabel) darstellen. Die magnetische Flußdichte wies bei Expositionsstufe 5 maximal 161,4 μT auf, das entspricht ungefähr dem zu erwartenden Magnetfeld direkt über dem eingespülten Kabel im Abstand von 1 m über dem Meeresboden.

Das Ziel dieser Studie war, das Kabelfeld auf eine mögliche Barrierewirkung oder auch auf eine Irritation für Jungaale beim Durchqueren zu untersuchen. Zusätzlich wurden weitere Variablen, wie z.B. die Zeitdauer der Aale bis zum Eintritt in die Meßstrecke, die

Zeitdauer der Kabelquerung, die Anzahl der Richtungsänderungen, die Schwimmfrequenz und Schwimmgeschwindigkeit etc. mit Hilfe parametrischer Tests sowie in einer Korrelations- bzw. Varianzanalyse (ANOVA) getestet. Hiermit sollte untersucht werden, ob sich mögliche magnetfeldbedingte Auswirkungen auf das Verhalten der Aale statistisch belegen lassen. In der Regel fanden die Versuche ohne zusätzliche Bewegungsstimuli statt. Bei insgesamt 31 Versuchen, bei denen die Tiere kein Spontanverhalten zeigten, mußte zusätzlich mit Hilfe einer Lichtquelle gereizt werden.

Um mit Hilfe der o.g. statistischer Verfahren zu möglichst sicheren Aussagen zu kommen, wurden insgesamt 301 Einzelversuche durchgeführt. Diese wurden in randomisierter Reihenfolge weitgehend automatisiert (computergestützte Kamera- und Versuchssteuerung) in einem Schwimmkanal in Hamburg (DESY) absolviert. Der größte Teil der Versuche (254) wurde in einem sogenannten zweiseitigen Ansatz analysiert, d.h. es wurde sowohl ein bestimmter Anteil der Schwimmstrecke vor dem Kabel als auch hinter dem Kabel untersucht. In einem weiteren Ansatz (47 Versuche) wurde nur jeweils die Strecke bis zum Kabel oder ab dem Kabel analysiert (einseitiger Ansatz). Die insgesamt 40 untersuchten Variablen ergaben in den meisten Fällen keine Hinweise auf magnetfeldbedingte Veränderungen (Korrelationen).

Bei künstlicher Magnetfeldexposition zeigte sich jedoch ein leichter (auf dem 5% Niveau signifikanter) Anstieg nicht linearer Schwimmbewegungen. Außerdem kam es bei der zweiseitigen Versuchsanordnung bei Exposition tendenziell zu einer Zunahme der Schwimmfrequenz und der Geschwindigkeit der Ost-West-Passage im Vergleich zur West-Ost-Passage. Zusätzlich verlagerte sich die maximale Schwimmgeschwindigkeit (bei den Kontrollversuchen - Exposition 0 - in Beckenmitte) bei eingeschaltetem Feld über die Beckenmitte hinaus (χ^2 : $p = 0,02$). Beides ließ sich allerdings nur mit dem zweiseitigen Versuchsansatz belegen. Die beobachteten Unterschiede im zweiseitigen Versuchsansatz weisen vermutlich darauf hin, daß die Tiere das zusätzliche (künstliche) Magnetfeld perzipieren können.

Zur Frage einer möglichen Barrierewirkung läßt sich der Studie folgendes entnehmen: Auch unter Kontrollbedingungen (ohne zusätzliches Magnetfeld) durchquerten nicht alle Tiere den Schwimmkanal. Knapp 11% (von 37 Tieren) überquerten das Kabel innerhalb von 10 Minuten nicht, obwohl sie aktiv waren. Bei Exposition ergab sich diesbezüglich in den meisten Fällen eine Zunahme (Maximalwert bei Expositionsstufe 4 = 20,5% - entspricht 4 Tiere [von 39] mehr als bei Exposition 0), wobei die überwiegende Anzahl der Tiere auch unter der stärksten Magnetfeldexposition das Kabelfeld durchquerte (>85%).

Anhand der Daten dieser Studie kann nicht gefolgert werden, daß das künstliche Magnetfeld eine unüberwindliche Barriere für die Jungaale darstellt. Jedoch muß davon ausgegangen werden, daß Aale das zusätzliche Magnetfeld wahrnehmen können. Diese Wahr-

nehmung trägt vermutlich im Laborversuch zu den geschilderten Veränderungen bei, wobei derzeit nicht klar ist, warum sich die im zweiseitigem Ansatz gezeigten Tendenzen nicht mit dem einseitigen Versuchsansatz bestätigen ließen.

Zusammenfassung und offene Fragen

- Viele marine Tierarten nutzen das Erdmagnetfeld zur Raumorientierung.
- Innerhalb des multifaktoriell gestützten Orientierungsprozesses stellt das Erdmagnetfeld einen (von mehreren) Faktoren dar.
- Nur wenn keine weiteren Faktoren zur Verfügung stehen, reagieren z.B. Lachse in ihrem Richtungsverhalten auf ein verändertes Erdmagnetfeld.
- Im Freiland und im Labor durchgeführte Experimente an Aalen deuten nicht auf eine unüberwindliche Barrierewirkung durch künstliche Felder (HGÜ-Kabel) hin. Es scheint jedoch wahrscheinlich, daß Aale die künstlichen Felder wahrnehmen können.

Wichtige Fragen:

- Wie weit ist eine Übertragung der experimentellen Erkenntnisse von wenigen Arten auf das gesamte marine Artenspektrum sowie auf verschiedene Orientierungsleistungen/-anforderungen unterschiedlicher Tierarten möglich? (In der Literatur gibt es nur Untersuchungen vergleichsweise weniger Arten – und nur ganz wenige Arten sind relativ umfassend untersucht!)
- Kann eine Situation im marinen Lebensraum entstehen, in der über weite Strecken ausschließlich das Magnetfeld als Orientierungsparameter zur Verfügung steht?
- Können künstliche Felder möglicherweise in die biologische Rhythmik von Organismen eingreifen?

Zur Klärung der offenen Fragen sollten aussagekräftige experimentelle Versuchskonzepte weiterentwickelt (soweit bereits vorhanden), bzw. falls noch nicht vorhanden neu konzipiert werden. Wichtig für experimentelle Untersuchungen zum Orientierungsverhalten sind Untersuchungsmodelle, die möglichst motivationsunabhängig sind, d.h., die zu untersuchenden Tierarten sollten ein spontanes gerichtetes Verhalten (ähnlich wie Zugvögel während der Zugzeit) zeigen. Um möglichst aussagekräftige Schlußfolgerungen ziehen zu können, scheint uns ein zweiseitiger Ansatz sowohl mit Labor- als auch Freilanduntersuchungen am aussichtsreichsten.

Literatur

- Blakemore, R.P. (1975): Magnetotactic bacteria. *Science* 190: 377-379.
- Emlen, S.T. (1967a): Migratory orientation in the Indigo Bunting, *Passerina cyanea*. Part I. The evidence for use of celestial cues. *Auk* 84: 309-352.
- Emlen, S.T. (1967b): Migratory orientation in the Indigo Bunting, *Passerina cyanea*. Part II. Mechanism of celestial orientation. *Auk* 84: 463-489.
- Groot, C. (1982): Modification on a theme - a perspective on migratory behavior of Pacific salmon. In: Brannon, E.L. & E.O. Salo (Eds.). *Proc. Salmon Trout Migratory Behav. Symp. Univ. of Washington, Seattle*, pp. 1-21.
- Kullnick, U. & S. Marhold (1999): Abschätzung direkter und indirekter biologischer Wirkungen der elektrischen und magnetischen Felder des EuroKabel / Viking Cable HGÜ-Bipols auf Lebewesen der Nordsee und des Wattenmeeres. Gutachten im Auftrag von EuroKabel / Viking Cable, Frankfurt, 99 pp.
- Koops, F.B.J. (1995): Environmental Aspects of Sea Electrodes for the NorNed Cable. KEMA Environmental Services. Arnheim.
- Kramer, G. (1950): Weitere Analyse der Faktoren, welche die Zugaktivität des gekäfigten Vogels orientieren. *Naturwissenschaften* 37: 377-378.
- Kramer, G. (1952): Experiments on bird orientation. *Ibis* 94: 265-285.
- Kramer, G. (1953): Wird die Sonnenhöhe bei der Heimfindeorientierung verwendet? *J. Orn.* 94: 201-219.
- Merkel, F.W. & W. Wiltschko (1965): Magnetismus und Richtungsfinden zugunruhiger Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Vogelwarte* 23: 71-77.
- Poleo, A.B.S. & M. Harboe (1996): Hochspannungsgleichstrom Übertragungs-(HGÜ)-Seekabel und Unterwasserelektroden: Auswirkungen auf die Tierwelt des Meeres. Eine Literaturstudie für Kabelprojekte. Im Auftrag der EUROKABEL / VIKING CABLE. Oslo, 47 pp.
- Rommel, S.A. & J.D. McCleave (1973): Sensitivity of American eels, (*Anguilla rostrata*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) to weak electric and magnetic fields. *J. Fish Res. Board Can.* 30: 657-663.
- Quinn, T.P. (1980): Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry. *J. Comp. Physiol.* 137: 243-248.
- Schmidt-König, K. (1960): Internal clocks and homing. *Cold Spring Harbor Symp. on Quant. Biol.* 25: 389-393.
- Ueda, H. (1998): Lacustrine sockeye salmon return straight to their natal area from open water using both visual and olfactory cues. *Chem. Senses* 23: 207-212.

- Varanelli, J. & D. McCleave (1974): Locomotor activity of Atlantic salmon parr (*Salmo salar* L.) in various light conditions and in weak magnetic fields. *Anim. Behav.* 22: 178-186.
- Vilcinskis, A. (1996): Meeresfische Europas - Merkmale, Verbreitung, Lebensweise. Naturbuch-Verl., Augsburg.
- Westerberg, H. & M.L. Begout-Anras (1999): Die Orientierung von Blankaalen (*Anguilla anguilla*) in einem gestörten Erdmagnetfeld: Telemetrieverfolgung von Blankaal am Polkabel von Baltic Cables 1997 und 1998. Jahresbericht Version 0 vom 20.05.99, Fiskeriverket, Schweden. Übersetzt aus dem Schwedischen, 30 pp.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1989): Pigeon homing: olfactory orientation - a paradox. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 24: 163-173.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1990): Zur Entwicklung der Sonnenkompaß-orientierung bei jungen Brieftauben. *J. Orn.* 131: 1-19.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1995): Magnetic orientation in animals. Springer Vlg., Berlin, Heidelberg, New York, 297 pp.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1999): The orientation systems of birds - II. Homing and navigation. *J. Ornithol.* 140: 129-164.
- Wiltschko, W. (1968): Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zug-orientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Z. Tierpsychol.* 25: 537-558.
- Wiltschko, W. & R. Wiltschko (1993): Navigation in birds and other animals. *J. Nav.* 2: 174-191.
- Wiltschko, W., Wiltschko, R., Keeton, W.T. & R. Madden (1983): Growing up in an altered magnetic field affects the initial orientation of young homing pigeons. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 12: 135-142.
- Wiltschko, W., Wiltschko, R. & C. Walcott (1987): Pigeon homing: Different effects of olfactory deprivation in different countries. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 21: 333-342.
- Yano, A., Ogura, M., Sato, A., Sakaki, Y., Shimizu, Y, Baba, N. & K. Nagasawa (1997): Effect of modified magnetic field on the ocean migration of maturing chum salmon, *Oncorhynchus keta*. *Mar. Biol.* 129: 523-530.

Vorläufige Ergebnisse von Felduntersuchungen an einer Elektrode in der Ostsee

Lutz Debus ⁽¹⁾, Helmut Winkler ⁽¹⁾ & Michael L. Zettler ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universität Rostock, Fachbereich Biologie, Institut für Biodiversitätsforschung, Lehrstuhl für Allgemeine und Spezielle Zoologie, Universitätsplatz 5, D-18055 Rostock, Germany ld@fibio.physik2.uni-rostock.de

⁽²⁾ Institut für Ostseeforschung an der Universität Rostock, Sektion Biologische Meereskunde, Seestraße 15, D-18119 Warnemünde, Germany michael.zettler@io-warnemuende.de

Zusammenfassung

Im Oktober 1995 wurde direkt vor der Warnemünder Küste eine Seeelektrode verlegt und für die Hochspannungsgleichstromübertragung KONTEK von Skandinavien nach Deutschland in Betrieb genommen. Im Rahmen einer biologischen Begleituntersuchung dieses Umwelteingriffes wurde eine Langzeitstudie über den Einfluß des Kabelbetriebes, im speziellen des Kathodenbetriebes der Seeelektrode, auf aquatische Organismen initiiert. 1996/97 erfolgte eine Aufnahme der Bodentierfauna mittels Dredge (Epifauna) und Bodengreifer (Infauna) innerhalb und außerhalb der Ringelektrode vor Warnemünde. Deutlich erkennbar ist die große Variabilität der Individuendichten im Umfeld der Elektrode. Es lassen sich keine statistisch absicherbaren Tendenzen ablesen. In allen Untersuchungsjahren wiesen Mollusken über 80% Individuendominanz auf (*Mytilus*, *Hydrobia*). Dominierende Vertreter anderer Artengruppen waren Polychaeten und Oligochaeten. Die Besiedlung innerhalb und außerhalb des Ringes konnte 1997 nur an 2 Proben verglichen werden und muß daher als Momentaufnahme gewertet werden, die keine Tendenz belegen kann.

Einleitung

Seit den 50er Jahren wird in der Ostsee Gleichstrom mit Hilfe von ein- oder zweileitigen Seekabeln unter dem Meeresspiegel von einer Küste zur anderen transportiert (Abb. 1). Bei

Einleitersystemen werden neben dem Seekabel zwei metallische See-Elektroden benötigt, um das Seewasser als Rückleiter benutzen zu können. Dabei entstehen zusätzlich zu den natürlichen geomagnetischen und geoelektrischen Feldern künstliche elektrische (um die See-Elektrode) und magnetische Felder (um das eigentliche Kabel). Seit Ende der 80er Jahre sind die Übertragungsleistungen auf etwa 400-600 MW (Dänemark-Norwegen, Schweden-Finnland, Deutschland-Dänemark, Deutschland-Norwegen) gestiegen.

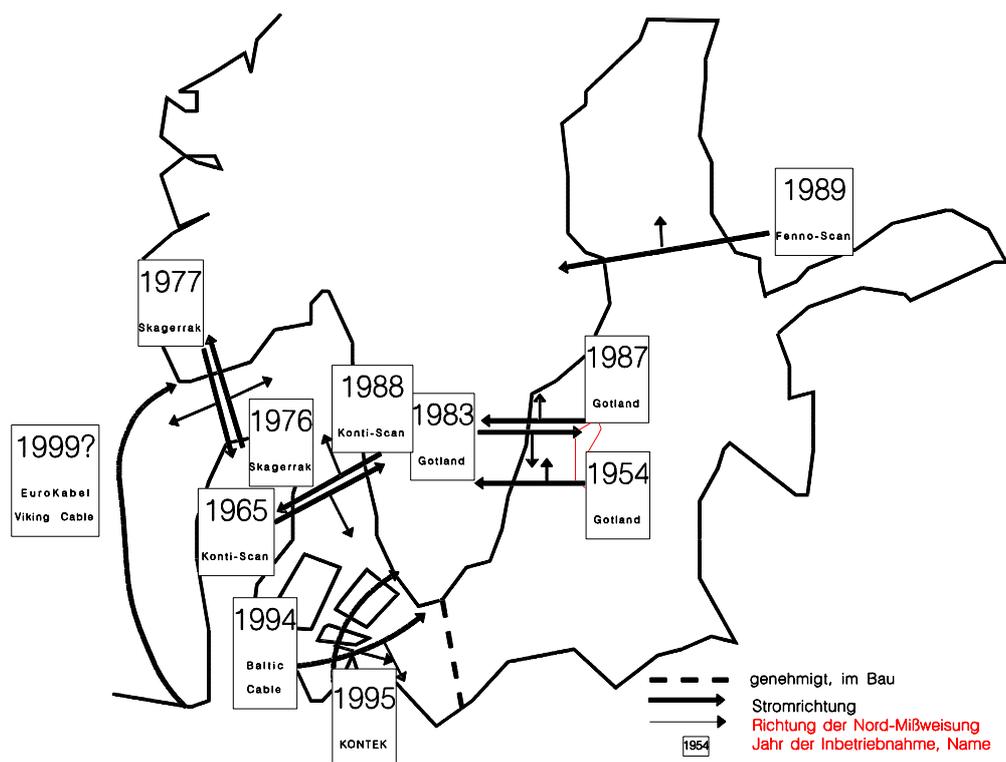


Abb. 1: In der Ostsee errichtete Hochspannungsgleichstromübertragungen. Stromrichtung: dicke Pfeile, Nordmißweisungen des künstlich erzeugten Kabelmagnetfeldes: dünne Pfeile senkrecht auf der Stromrichtung stehend, im Kasten: Jahr der Inbetriebnahme und Name des Kabels. Die technische Stromrichtung verläuft von $+ \rightarrow -$ (Uhlig & Schulz 1993), natürliche Stromrichtung: $- \rightarrow +$. Eine Mißweisung von geringem Umfang (Uhlig & Schulz 1993) ist auch dann gegeben, wenn der Strom durch zwei nahe beieinander liegende Kabel in jeweils verschiedene Richtungen fließt.

Seit 1925 (Schönfelder 1925) wird elektrischer Strom zum Fischfang genutzt. Um die typische galvanotaktische und narkotische Wirkung zu erzielen, müssen Feldstärken um $0,01\text{V/cm}$ eingesetzt werden. In Vorbereitung der ersten Seekabel-Verlegungen in der Ostsee, wurden schon 1949 die Effekte der Stromübertragung auf Fische untersucht. Ergebnis war eine Elektrodenkonfigurierung, die die anfänglich nachgewiesenen Beeinträchtigungen (es wurden Feldstärken über $0,01\text{V/cm}$ verwandt) der Fische vernachlässigbar machte. In den folgenden 40 Jahren erfolgten keine weiteren Untersuchungen an See-Elektroden. Auf-

grund von Feldstärkeberechnungen anhand bekannter Kabelparameter meinte man von einer biologischen Unbedenklichkeit ausgehen zu können. Es gab allerdings Beobachtungen an Flußquerungen mit Hochspannungsüberlandleitungen, daß aufsteigende Störe an diesen Stellen ihre flußmittig verlaufende Migration unterbrachen und nach einigem Suchen ihre Migration in Ufernähe, also in Gebieten geringerer elektrischer Feldstärke, fortsetzten (Poddubnyj *et al.* 1978).

Aber weder der Nachweis biologisch langfristiger Unbedenklichkeit der immer leistungsstärkeren Systeme wurde erbracht, noch ist man sich über die Wirkung der bei der Stromübertragung entstehenden schwachen elektrischen Felder im klaren und dies, obwohl bekannt ist, daß biologische Aktivität mit schwachen elektrischen Feldereignissen verbunden ist.

Gleichstromführende Einleiter sind von Magnetfeldern umgeben. Im Falle der Ausbringung eines Doppelkabels (Hin- und Rückleiter in geringem Abstand voneinander) ist das resultierende Magnetfeld deutlich schwächer: die Magnetfelder beider Einzelkabel sind entgegengesetzt gerichtet und heben sich dadurch teilweise auf. Die Stärke des resultierenden Magnetfeldes hängt wesentlich vom Abstand der beiden Einzelkabel zueinander ab.

Zur Wirkung magnetischer Felder auf Lebewesen liegen bisher wenige Untersuchungen vor. Erste wissenschaftliche Untersuchungen zum Verhalten von Karauschen im Magnetfeld gibt es seit 1958 (Cholodov 1958). Am Aal wurden Laborstudien (Tesch 1974a, Tesch *et al.* 1992) und Feldexperimente in der Ostsee zum magnetfeldorientierten Migrationsverhalten (Trybom & Schneider 1908, Määr 1947, Martinkowitz 1960, 1961, Karlsson 1984) durchgeführt. Bei Säugern vermutet man die Fähigkeit, das Erdmagnetfeld zur Migrationsorientierung nutzen zu können.

Im Oktober 1995 wurde direkt vor der Warnemünder Küste eine Seeelektrode verlegt und für die Hochspannungsgleichstromübertragung KONTEK von Skandinavien nach Deutschland in Betrieb genommen. Im Rahmen einer biologischen Begleituntersuchung dieses Umwelteingriffes wurde eine Langzeitstudie über den Einfluß des Kabelbetriebes, im speziellen des Kathodenbetriebes der Seeelektrode, auf aquatische Organismen initiiert. Im Auftrage der VEAG Berlin sollten von uns mögliche Einflüsse auf Fische, Benthos und Zooplankton sowie die Wasserchemie untersucht werden. Im folgenden sollen nur die Untersuchungsergebnisse zur Beeinflussung der Benthosgemeinschaft vorgestellt werden.

Material und Methoden

Die Probennahme erfolgte innerhalb und außerhalb des Elektrodenringes (Abb. 2). Die Infau-na wurde mit Bodengreifern (van Veen 250 cm² und 0,1 m², Ekman-Birge ca. 250 cm²)

beprobt. Mittels Dredge (40 cm Öffnungsbreite) erfolgte die Aufnahme von Epibenthos, d.h. von Organismen, die an der Oberfläche des Gewässergrundes siedeln.

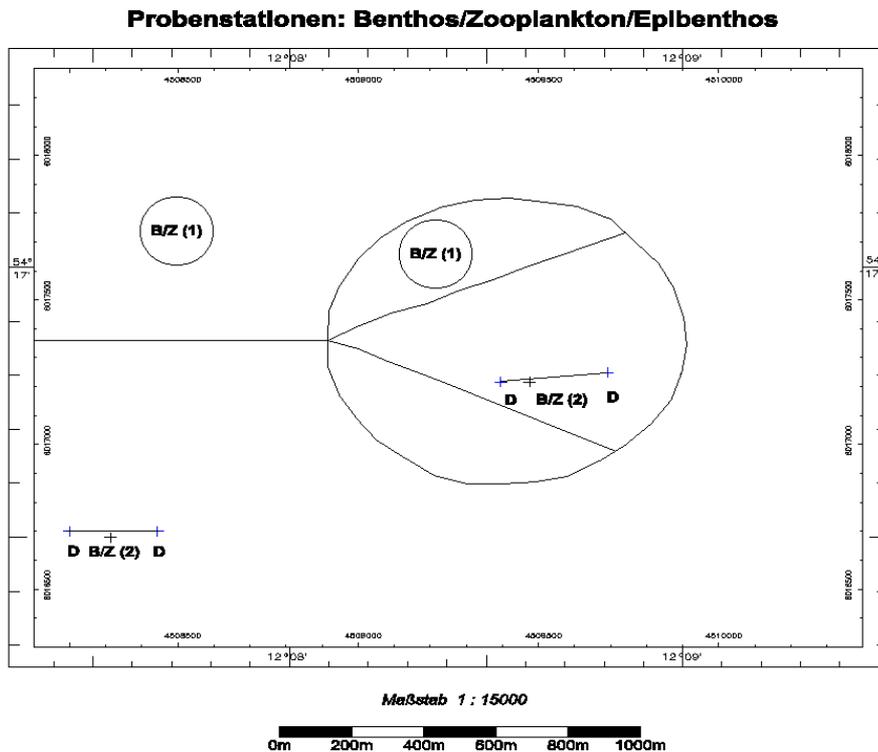


Abb. 2: Lage der Probenstationen

Abb. 2: Lage der Probenstationen in und am See-Elektrodenring im Jahre 1996. B: Bodengreifer, Z: Zooplanktonschöpfereinsatz, D: Dredghole

Die Tabellen 1 und 2 enthalten die Koordinaten unserer Probennahmen 1996 und 1997.

Tab. 1: Koordinaten unserer Probennahmen 1996.

Datum	Station	Position N	Position E	Gerät	Proben
29.04.96	im Ring			0,1m ² Greifer	n=2 Benthos
29.04.96	500m W Ring			0,1 m ² Greifer	n=3 Benthos
13.06.96	im Ring	54°16'804"N	12°08'988"E	250cm ² Greifer	n=1 Benthos
		54°16'787"N	12°08'538"E	Dredge ein	
				300x0,5 m ² Schlepp	n=1 Epibenthos
		54°16'804"N	12°08'810"E	Dredge aus	
13.06.96	außerhalb Ring	54°16'498"N	12°07'540"E	250cm ² Greifer	n=4 Benthos

Tab 2: Koordinaten unserer Probennahmen 1997.

Probe	Koordinaten		Dauer	Datum	Tiefe	Salinität	Methode	Sieb	leg.
	Anfang	Ende							
Dredge 1	54° 15' 848"	54° 15' 835"	14'	01.07.97	9 m	8,8‰	Dredge	1 mm	Dr. Winkler
	12° 08' 180"	12° 08' 423"	286 m						
Dredge 2	54° 16' 980"	54° 16' 913"	16,5'	01.07.97	11 m	8,8‰	Dredge	1 mm	Dr. Winkler
	12° 08' 135'	12° 08' 362"	266 m						
Dredge 3	54° 16' 965"	54° 16' 879"	16'	01.07.97	k.A.	8,8‰	Dredge	1 mm	Dr. Winkler
	12° 08' 720"	12° 08' 665"	136 m						
Hol 1	54° 15' 957"			26.06.97	8 m	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 07' 458"								
Hol 2	54° 15' 957"			26.06.97	8 m	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 07' 458"								
Hol 3	54° 15' 957"			26.06.97	8 m	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 07' 458"								
Hol 4	54° 15,957"			26.06.97	8 m	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 07' 458"								
Hol 6	54° 15,957"			26.06.97	8 m	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 07' 458"								
Hol 7	54° 16' 736"			26.06.97	k.A.	k.A.	van Veen	1 mm	Dr. Debus
	12° 09' 028"								
Hol 8	54° 16' 736"			26.06.97	k.A.	k.A.	Ekman-Birge	1 mm	Dr. Debus
	12° 09' 028"								

Die Siebung der Benthosproben erfolgte über ein 1 mm Sieb. Aufgrund der Menge des Materials wurde vom Dredgeninhalt nur eine repräsentative Teilprobe für die Feinanalyse entnommen. Die Fixierung aller biologischer Proben erfolgte an Bord in 4% Formaldehydlösung.

Ergebnisse

Die Abbildungen 3 und 4 präsentieren Untersuchungsergebnisse zum Zeitpunkt vor Installation und Inbetriebnahme (1993 nahe der zukünftigen Ringposition, 1996 auf zukünftigem Elektrodenstandort) und nach Inbetriebnahme der Elektrode (1997).

1996: Epifauna (Dredgebeprobung)

Die Beschleppung im Ring ergab eine erhebliche Dominanz von Miesmuscheln verschiedener Größenklassen. Daneben wurden einzelne Schnecken, Kleinkrebse und Schnurwürmer (*Hydrobia*, *Littorina*, *Jaera*, *Nemertini*) gefunden.

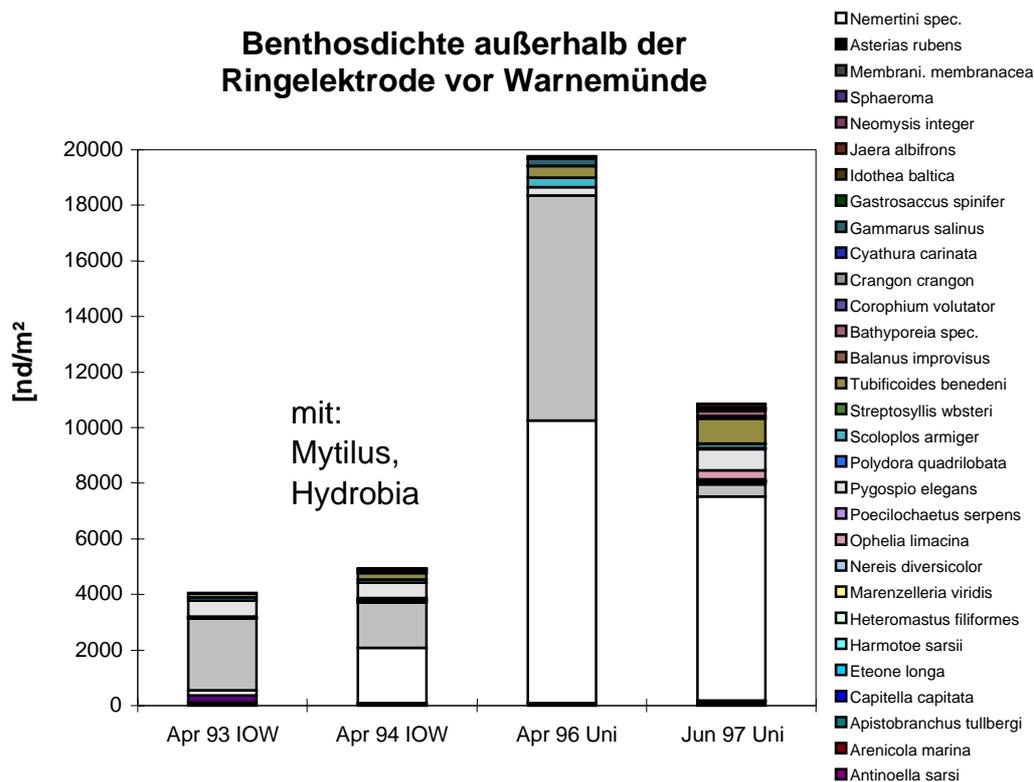


Abb. 3: Langzeitbenthosuntersuchungen außerhalb der Ringelektrode vor Warnemünde inclusive *Mytilus* und *Hydrobia*. *Mytilus*: großer heller Balken, *Hydrobia*: großer dunkler Balken, IOW: Gutachten des Instituts für Ostseeforschung 1994 (IOW 1994), Uni: Universität Rostock (eigene Daten).

Obwohl bei unserer Probennahme im Gegensatz zu den Angaben des IOW (1994) kein Schwefelwasserstoffgeruch festgestellt wurde, der auf anoxische Verhältnisse schließen lassen würde, deutet die Zusammensetzung der Benthosorganismen auch auf schlickreiche und sulfidische Sedimente hin. Der Vielborster *Scoloplos armiger* ist ein typischer Bewohner schlammiger und sandiger Sedimente mit H_2S -Beimengungen. Der Wenigborster *Tubificoides benedeni* ist durch seine Symbiose mit Bakterien befähigt, sulfidische Bereiche zu besiedeln.

Die eigentlich Hartsubstrat bevorzugenden Miesmuscheln, bildeten auf den Sandgründen Konglomerate und waren daher auf allen Stationen mit hohem Anteil vertreten. Dies hatte eine charakteristische Begleitfauna zur Folge: große Mengen von Wattschnecken (*Hydrobia ulvae*), Vielborstern (*Scoloplos armiger* und *Pygospio elegans*) sowie Kleinkrebsen (*Gammarus*).

Die Sandklaffmuschel (*Mya arenaria*), ein gewöhnlicher Bewohner sandiger Sedimente wurde nur einmal in den Greiferproben gefunden. Die Ursache hierfür lag in der zu geringen Eindringtiefe des Bodengreifers. Die Sandklaffmuschel bildet in tieferen Sedimentschichten große Konzentrationen.

Die Artenzahlen lagen im Mittel unter denen, die bei der Beprobung einer küstennäheren Station festgestellt wurden (IOW 1994).

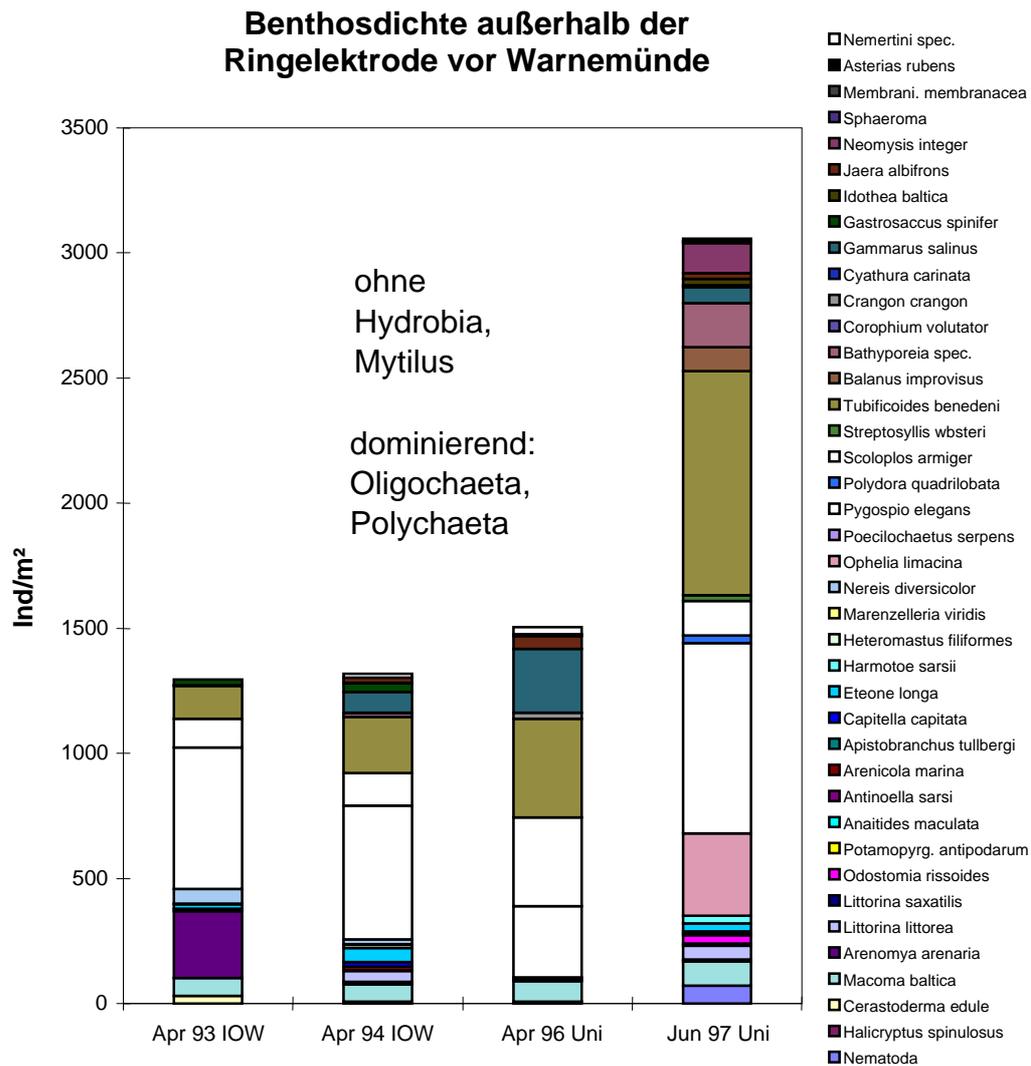


Abb. 4: Langzeitbenthosuntersuchungen außerhalb der Ringelektrode vor Warnemünde ohne *Mytilus* und *Hydrobia* mit Oligochaeten und Polychaeten. Oligochaeten: große dunkle Balken, Polychaeten: große helle Balken, IOW: Gutachten des Instituts für Ostseeforschung 1994 (IOW 1994), Uni: Universität Rostock (eigene Daten).

Hingegen stellten wir bei der Aufnahme 1996 höhere Individuenabundanzen fest. Ein direkter Vergleich der Probenahmen 1994 und 1996 ist allerdings nicht angeraten, da eine Verschiebung der ursprünglichen Ringposition vorgenommen wurde. Die 1994er Daten (IOW 1994) wurden auf einer 3 Seemeilen südwestlich gelegenen Position gegenüber der 1996er Proben genommen (Tab 2). Daher sind die demonstrierten Unterschiede eher auf die Heterogenität des Untersuchungsgebietes und auf natürliche annuelle Fluktuationen der Benthosorganismen zurückzuführen.

Beim Vergleich der im und außerhalb vom Ring gewonnenen Proben fällt an beiden Probeterminen eine höhere Individuenabundanz der Muscheln und Schnecken außerhalb des Ringes auf. Dieser Trend läßt sich aber statistisch nicht absichern. Ein Unterschied in der Individuenzusammensetzung zwischen den beiden Probeterminen und an den beiden Untersuchungsstationen ist somit nicht zuverlässig erkennbar.

Die Verringerung der Biomasse der Benthosorganismen im Zeitraum von April bis Juni bei gleichzeitiger Erhöhung der Individuendichte läßt sich leicht durch das Reproduktionsgeschehen erklären. Das verstärkte Auftreten neuer Jungtiere wird auch durch die Längenverteilung bestätigt.

1997: Makrozoobenthos außerhalb der Ringelektrode

Außerhalb der Ringelektrode konnten mit Bodengreifer und Dredge 31 Taxa nachgewiesen werden. Am häufigsten trat dabei die Miesmuschel *Mytilus edulis* auf. Diese Muschel bildet Konglomerate, indem sie sich gegeneinander anheften. Auf diese Art und Weise werden auf Sandböden ganze „Miesmuschelteppiche“ gebildet, die wiederum das Habitat vieler anderer Organismen darstellen. Entgegen der verarmten Sandbodenfauna nutzen viele Organismen die Besiedlungs- und Versteckmöglichkeiten der *Mytilus*-Bänke. Deshalb fällt sofort der sprunghafte Anstieg der Arten- und Individuenzahl auf, wenn man die *Mytilus*-Hole mit „Sandboden-Holen“ vergleicht. Typische Arten sind sessile Taxa, wie *Balanus improvisus* und Bryozoa, die die Muschelschalen als Substrat nutzen. Hinzu kommen Arten, wie z.B. die Schnecke *Odostomia rissoides*, die an *Mytilus edulis* parasitiert (Rote Liste Ostsee; potentiell gefährdet) oder die Schnecken *Hydrobia ulvae*, zwei *Littorina*-Arten und die Krebse *Jaera albifrons* sowie *Idotea balthica*, die in den Zwischenräumen der *Mytilus*-Klumpen ideale Versteck- und Lebensmöglichkeiten haben.

Auf reinen Sandböden werden nur recht wenige Arten angetroffen, die aber auf Grund ihrer meist hohen Sauerstoffbedürftigkeit und die Bindung an temporäre (durch Strömung umgewälzte) Sedimente relativ selten sind und zu den bedrohten Arten im Ostseeraum zählen. Diese Lebensgemeinschaften („Sandböden“) sind durch die voranschreitende Eutrophierung und damit einhergehende Verschlickung gefährdet. Als typische Sandbodenbewohner wären die Muscheln *Arenomya arenaria* und *Macoma balthica*, die Polychaeten *Pygospio elegans* und *Ophelia limacina* und die Krebse *Bathyporeia pilosa* und *Crangon crangon* zu nennen. Als besonders anspruchsvoll kann der Polychaet *Streptosyllis websteri* hervorgehoben werden, der in der Roten Liste Ostsee als potentiell gefährdet eingestuft wurde. Das gleiche trifft für die sauerstoffbedürftige *Bathyporeia pilosa* zu.

Abb. 3 macht die prozentuale Verteilung (Dominanzen) der makrozoobenthischen Vertreter deutlich. Dominant waren Mollusken, mit über 80% an *Mytilus edulis* und *Hydrobia ulvae*. Die Anneliden traten subdominant auf. Die Anneliden rekrutierten sich hauptsächlich

aus Oligochaeten und den Polychaeten *Pygospio elegans* und *Ophelia limacina*. Die Arthropoden waren u.a. durch die Taxa *Balanus improvisus* (6%) und *Gammarus spec.* (*G. salinus* und *G. oceanicus*) vertreten. Durch die Probennahme mit dem Bodengreifer konnte u.a. die endopsammale Fauna erfaßt werden.

Populationsaufbau von Mytilus edulis innerhalb der Ringelektrode

Die aus dem Dredge-Hol 3 anteilmäßig (n = 390, Mischprobe) längenvermessenen Individuen von *Mytilus edulis* hatten Größen zwischen 0,08 mm und 39 mm. Mit einem Überhang an juvenilen Tieren (>40% < 10mm) zeigte die Population innerhalb der Ringelektrode eine gesunde Altersstruktur. Auch ausreichend ältere (größere) Individuen konnten beobachtet werden, so daß kein zwischenzeitlicher rapider Bestandseinbruch stattgefunden haben kann.

Schlußfolgerungen

Insgesamt wurden vor Aufnahme des Dauerbetriebes 1996 18 Taxa und 1997 39 Taxa nachgewiesen. Somit war 1997 eine deutlich größere Organismenvielfalt zu verzeichnen. Da dies aber auch auf den Einsatz einer größeren Zahl ausgewerteter Dredgeproben zurückgeführt werden kann, ist diese Tendenz bislang nicht statistisch absicherbar.

Die schwache Tendenz einer größeren Organismenvielfalt im Jahre 1997 an außerhalb des Ringes (32 Taxa) im Vergleich zu innerhalb des Ringes (31 Taxa) gelegenen Stationen ist auf Grund der geringen Probenzahl nicht statistisch absicherbar. Die Bestätigung dieses Vergleiches muß zukünftigen Untersuchungen mit größeren Probendichten vorbehalten bleiben.

Literatur

- Cholodov, J.A. (1958): Ob obrazovanie uslovných reflektsov na magnitnoe pole u ryb. Tr. sovesc. po fiziologii ryb. M. izd-vo AN SSSR (in Russisch).
- Institut für Ostseeforschung (1994): Gutachten über ökologische Auswirkungen einer Seelektrode im Seegebiet vor Warnemünde, unveröffentlicht.
- Karlsson L. (1984): Migration of European silver eels, *Anguilla anguilla*. Acta Universitatis Upsalensis (Diss.) 745 Repro-C. HSC 1984.

- Määr, A. (1947): Über die Aalwanderung im Baltischen Meer und auf Grund der Wanderaalmarkierungsversuche im Finnischen in Livischen Meerbusen in den Jahren 1937-1939. Medd. Statens Unders. Försökanstalt. Sötvattenfisk, Drottningholm 27: 1-56.
- Martinkowitz, H. (1960): Erste Ergebnisse von Blankaalmarkierungen an der ostrügenschon Küste im Herbst 1959. Fischereiforschung 3: 9-13.
- Martinkowitz, H. (1961): Ergebnisse von Blankaalmarkierungen an der ostrügenschon Küste und Möglichkeiten ihrer Nutzung für die Fangsteigerung durch neuartige Reusenkonstruktionen. Z. Fisch. 10: 653-663.
- Pavlov, D.S. (1989): Structures assisting the migration of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper 308.
- Poddubnyj, A.G. *et al.* (1978): Peculiarities of the passage of spawners through typical river sites, dam tailwaters and reservoirs. In: biologiceskie osnovy primenenija rybozashchitnych i rybopropusknych sooruzhenij. Moscow: 209-217 (in Russisch).
- Schönfelder, A. (1925): Fischfang mit Elektrizität. Der Sportangler 1: 236-237.
- Tesch, F.-W. (1974): Speed and direction of silver and yellow eels, *Anguilla anguilla*, released and tracked in the open North Sea. Berichte Deutsche Wissenschaftliche Kommission Meeresforschung 23: 181-197.
- Tesch, F.-W., Wendt, T. & L. Karlsson (1992): Influence of geomagnetism on the activity and orientation of the eel, *Anguilla anguilla* (L.), as evident from laboratory experiments. Ecology of Freshwater fish 1: 52-60.
- Trybom, F. & G. Schneider (1908): Die Markierungsversuche mit Aalen und die Wanderung gekennzeichnetener Aale in der Ostsee. Rapp. P.-v. Réun. Cons perm. int. Explor. Mer. 174: 134-143.
- Westin, L. (1990): Orientation mechanisms in migrating European silver eel (*Anguilla anguilla*): temperature and olfaction. Mar. Biol. 106: 175-179.

Auswirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf Meeresfische in der Nord- und Ostsee

Ronald Fricke

Staatliches Museum für Naturkunde, Rosenstein 1, 70191 Stuttgart, Germany,
ronfricke@compuserve.com

Zusammenfassung

Die marinen Lebensräume in der Nord- und Ostsee sind zunehmend technischen Eingriffen ausgesetzt. Im Zusammenhang mit marinen Elektrokabeln im europäischen Stromverbund sollen im vorliegenden Beitrag die möglichen Auswirkungen auf marine Fische beleuchtet werden, sowie auf Forschungsbedarf hingewiesen werden. Magnetische und sekundär induzierte elektrische Felder wirken sich möglicherweise auf marine Fische aus. Magnetische Felder können die Orientierung von Meeresfischen während ihrer Wanderungen beeinträchtigen bzw. ihre Wanderrouten ablenken. Elektrische Felder im Bereich von untermeerischen Stromkabeln können eine Scheuchwirkung auf Meeresfische haben, möglicherweise Wanderbewegungen ablenken, oder sogar zu betäubenden und gesundheitsschädlichen Wirkungen führen. Zu den besonders betroffenen Fischgruppen zählen: 1) Heringsfische, Familie Clupeidae; 2) Haie und Rochen; 3) Plattfische; 4) andere bodennah wandernde Fische; 5) Fischeier und Fischlarven.

Einleitung

Die deutschen Meeresgebiete der Nord- und Ostsee sind binnenwärts durch die Küstenlinie sowie die brackwasserbeeinflussten Ästuargebiete begrenzt, seewärts durch die Außengrenzen der Ausschließlichen Wirttschaftszone (AWZ). Sie bieten einen Lebensraum für 208 Fischarten (Fricke 1999). Brunken & Fricke (1985, Süß- und Brackwasserfische) und Fricke (1987, Meeresfische) veröffentlichten Bestimmungsschlüssel und kurze Beschreibungen für die einzelnen Arten. Mittlerweile wurden für einzelne Meeresgebiete auch genauere Kartierungen der Fischbestände publiziert (z.B. für das schleswig-holsteinische Wattenmeer, Vorberg & Breckling 1999).

Die deutsche Meeresfischfauna weist ein starkes **kalt gemäßigtes Faunenelement** auf, das vor allem von den Familien Gadidae (Dorschfische), Rajidae (Echte Rochen), Pleuronectidae (Rechtsseitige Plattfische), Cottidae (Groppen), Stichaeidae (Beschuppte Schleimfische) und Pholidae (Butterfische) repräsentiert wird. Ein **warm gemäßigtes Faunenelement** wird durch den Einfluß des Golfstroms unterstützt; wichtige Vertreter gehören zu den Familien Gobiidae (Grundeln), Labridae (Lippfische), Sparidae (Meerbrassen), Callionymidae (Leierfische), Serranidae (Zackenbarsche), Atherinidae (Ährenfische), Blenniidae (Schleimfische), Carangidae (Stachelmakrelen) und Lophiidae (Seeteufel). Einige küstenfern lebende Arten wandern gelegentlich in die Nordsee ein, z.B. Arten der Familien Scombridae (Makrelen), Bramidae (Brachsenmakrelen). Arten der gemäßigten Küstengewässer unternehmen **weiträumige Wanderungen** (z.B. *Clupea harengus*, Hering; *Scomber scombrus*, Makrele). Da schließlich die deutschen Meeresgewässer, besonders die Ostsee sowie die Mündungen der großen Nordseezuflüsse, eine relativ niedrige Salinität aufweisen, finden wir hier ein bedeutendes **Brackwasserelement** mit mehreren anadrom oder katadrom vom Meer zum Süßwasser und zurück wandernden Arten der Familien Petromyzontidae (Neunaugen), Salmonidae (Lachsfische), Clupeidae/*Alosa* (Maifisch und Finte), Anguillidae (Aale), Gasterosteidae (Stichlinge) und Pleuronectidae/*Platichthys flesus* (Flunder) (Fricke 1999).

Zahlreiche Fischarten der deutschen Küstengewässer sind gefährdet, einige sogar lokal ausgestorben. Gefährdungsursachen sind unter anderem verschiedene Formen intensiv betriebener Fischerei, Habitatverlust (z.B. durch Kiesabbau, Schleppnetzfisherei), Eutrophierung und Gewässerverschmutzung sowie Verbauung der Küsten und Querbauwerke in den Zuflüssen. Seit 1994 wurden Rote Listen der deutschen Meeresfischarten veröffentlicht (Fricke *et al.* 1994, Fricke *et al.* 1995, Nordsee und Wattenmeer ohne Ästuargebiete Berg *et al.* 1996, Wattenmeergebiete der südöstlichen Nordsee Fricke *et al.* 1996, Ostsee einschließlich Ästuargebiete; Fricke *et al.* 1998).

Die marinen Lebensräume in der Nord- und Ostsee sind zunehmend technischen Eingriffen ausgesetzt. Im Zusammenhang mit marinen Elektrokabeln im europäischen Stromverbund sowie zum elektrotechnischen Anschluß von Offshore-Windkraftanlagen sollen im vorliegenden Beitrag die möglichen Auswirkungen auf marine Fische beleuchtet werden, sowie auf Forschungsbedarf hingewiesen werden.

Die Stellungnahmen zum Forschungsbedarf bezüglich der Auswirkungen von Stromkabeln und Offshore-Windkraftanlagen auf marine Fische wurden in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Fische im Rahmen des Workshops "Technische Eingriffe in marine Lebensräume", Insel Vilm, 27.-29. Oktober 1999 erstellt (siehe Anhänge 1, 2).

Unter natürlichen Bedingungen wirkt auf marine Lebensräume das Erdmagnetfeld ein, das regional unterschiedlich und im Verlauf mehrerer Jahre stark schwanken kann (Mi-

ronov 1948). Magnetfelder induzieren bei Wasserbewegung (Meeresströmungen, Fischbewegungen, Blutkreislauf innerhalb der Fische) sekundäre elektrische Felder (Smith 1985).

Im Meer verlegte Stromkabel können mit Drehstrom oder mit Gleichstrom betrieben werden. Bei größeren Leitungsdistanzen müssen sie jedoch mit Gleichstrom betrieben werden. Drehstrom hat allgemein geringere Auswirkungen auf marine Lebensräume, ist aber bei Entfernungen ab ungefähr 50 km wegen größerer Übertragungsverluste wirtschaftlich nicht zu betreiben. Gleichstromkabel können als Einleiterkabel oder Zweileiterkabel betrieben werden. Zweileiterkabel sind ausreichend isoliert, um eine direkte Einwirkung elektrischer Felder auf marine Lebensräume zu vermeiden. Sie bauen jedoch ein magnetisches Feld im umgebenden Wasser auf, das unmittelbar beim Kabel am stärksten ist und mit zunehmender Entfernung abnimmt. Einleiterkabel mit Meereselektroden bauen zusätzlich ein direktes elektrisches Feld im Meer auf. Dies ist durch die Verwendung von Landelektroden vermeidbar.

Wanderbewegungen von Fischen in der Nord- und Ostsee

Nahezu alle in der Nord- und Ostsee lebenden Fischarten führen lokale oder großräumige Wanderbewegungen durch, die ihrem Überleben dienen. Um mögliche Auswirkungen magnetischer und elektrischer Felder auf Fische zu beleuchten, ist es einerseits notwendig, die Sensibilität der Arten zu untersuchen, und andererseits, ihre Wanderbewegungen und ihre Biologie zu kennen, um zu ermitteln, ob sie das Kabel gelegentlich oder regelmäßig überqueren müssen und somit überhaupt mit magnetischen und elektrischen Feldern in Berührung kommen. Weiterhin kann es entscheidend sein, in welcher Tiefe die Fische das Kabel überqueren; oberflächennah wandernde Fische sind weit geringeren magnetischen und elektrischen Feldern ausgesetzt als direkt am Boden wandernde, da die Felder mit zunehmender Entfernung vom Kabel abnehmen.

Bei Fischen der Nord- und Ostsee können die folgenden Typen von Wanderbewegungen unterschieden werden:

1. Kleinräumige, bodennahe saisonale Wanderungen von Adulttieren.

Auch Arten, die als Adulttiere relativ stationär sind (z.B. Callionymidae, Leierfische, Abb. 1; Pleuronectidae, Plattfische) führen jahreszeitlich bedingte kleinräumige Wanderungen durch; sie legen dabei Entfernungen von 5-100 km zurück. Diese Wanderungen führen im Frühjahr ins seichte Wasser (z.B. Wattenmeer in der Nordsee), im Herbst in tiefere Wasserschichten.

2. Kleinräumige, tideabhängige Wanderungen von Adulttieren im Ästuarbereich.

Selbst bei passiver Drift dauert es im tidebeeinflussten Ästuarbereich der großen Flüsse wochenlang, bis ein treibender Körper in einem Driftversuch bis ins offene Meer gespült wird

(Abb. 2). Vorher treibt er mit Ebbe und Flut abwechselnd flußaufwärts und flußabwärts. Da sich Salzwasser und Süßwasser nur wenig vermischen, führen Fischarten in Ästuarbereichen kleinräumige gezeitenabhängige Wanderungen durch. Bei Ebbe wandern brackwassertolerante Süßwasserfischarten weiter flußabwärts, während marine Arten ebenfalls flußabwärts zurückwandern. Bei Flut wandern limnische Fischarten flußaufwärts, während marine Arten ihnen folgen, soweit es der Salzgehalt erlaubt.

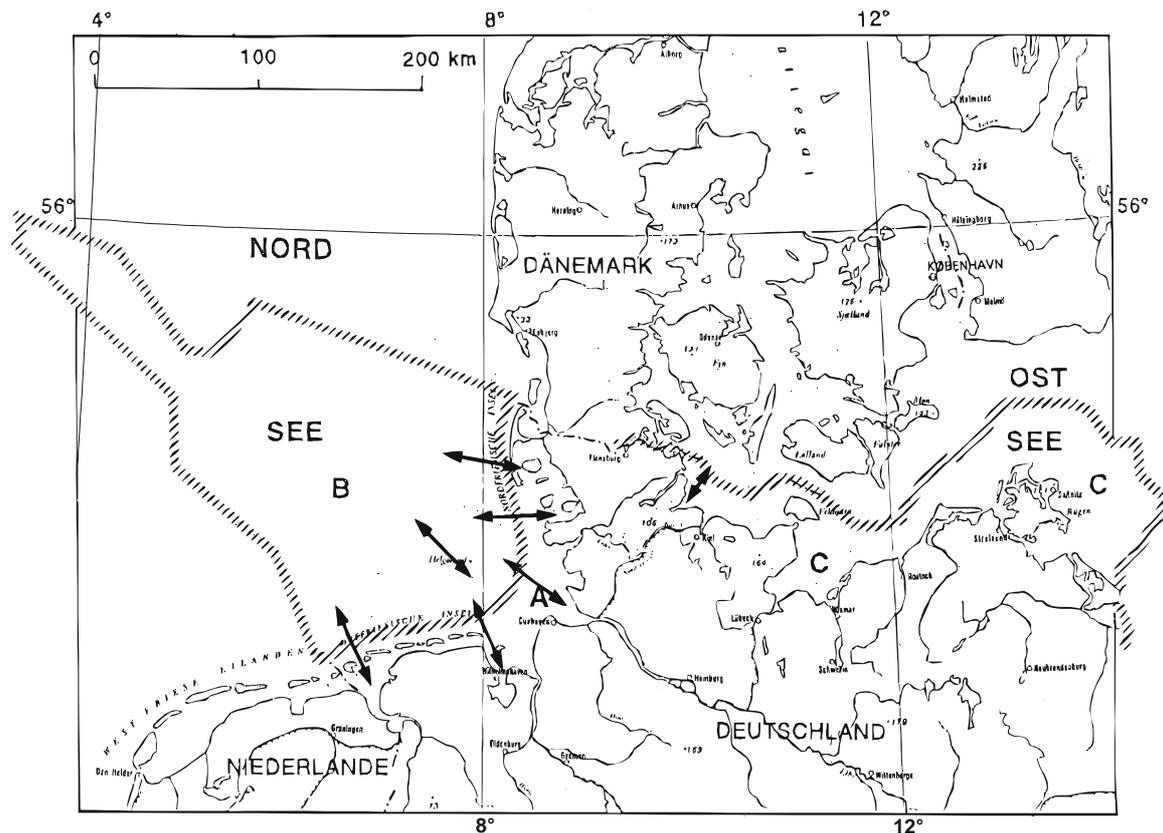


Abb. 1: Leierfisch (*Callionymus lyra*), Familie Callionymidae: kleinräumige, bodennahe saisonale Wanderungen von Adulttieren. A Wattenmeer und Ästuargebiete; B deutsche Nordsee; C deutsche Ostsee.

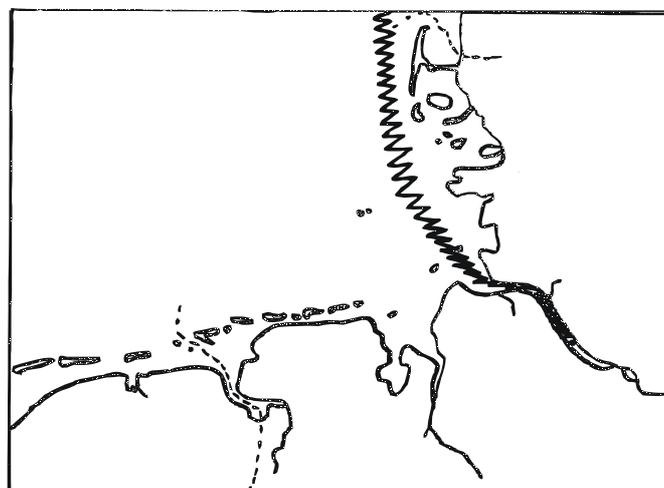


Abb. 2: Driftversuch in der deutschen Nordsee; Route eines treibenden Körpers, der im Elbästuar ausgesetzt wurde. 2 Zyklen = ca. 1 Tag.

3. Kleinräumige, tideabhängige Wanderungen von Fischlarven sowie Drift von Fisch-eiern im Ästuarbereich.

Einigen Fischarten dient der Ästuarbereich als Laichplatz. Die Finte (*Alosa fallax fallax*) laicht in Flußunterläufen über schlammigem Grund. Die Eier liegen auf dem Boden oder treiben in der Wassersäule; sie werden mit den Gezeitenströmungen verdriftet. Nach 4-5 Tagen schlüpfen die Larven (Wheeler 1969, 1979). Sie führen vermutlich aktive Wanderungen durch, um die Abdrift zu kompensieren. Mit den Gezeitenströmungen werden sie aber zweimal täglich bei Flut flußaufwärts bzw. bei Ebbe flußabwärts getrieben.

4. Großräumige Nahrungswanderungen.

Zahlreiche Fischarten führen in der Nordsee großräumige Nahrungswanderungen durch. Sie folgen der Nordseeringströmung, die gegen den Uhrzeigersinn verläuft, und durchqueren dabei auch die deutschen Nordseegebiete mindestens einmal im Jahr. Mehrere Raubfischarten folgen den Nahrungswanderzügen ihrer Beutefische. Beispiele für Arten, die großräumige Nahrungswanderungen durchführen: *Alopias vulpinus*, (Drescherhai), *Clupea harengus harengus* (Nordseehering, Abb. 3), *Engraulis encrasicolus* (Sardelle), *Lamna nasus* (Heringshai), *Sardina pilchardus* (Sardine), *Scomber scombrus* (Makrele), *Zeus faber* (Heringskönig).



Abb. 3: Großräumige Nahrungs- und Laichwanderungen beim Hering (*Clupea harengus*) im Nordostatlantik. Separate Unterarten im Atlantik/Nordsee und in der Ostsee. Schraffierte Flächen: Laichgebiete. Pfeile: Wanderrouten.

5. Großräumige Laichwanderungen im Meer.

Einige Fischarten legen weite Strecken zurück, um zu ihren Laichplätzen zu gelangen. Großräumige Laichwanderungen sind mit großräumigen Nahrungswanderungen gekoppelt. Die Laichplätze sind konstant und werden in jedem Jahr besucht. Bei *Clupea harengus* (Hering, Abb. 3) werden Unterarten unterschieden, die im Frühjahr bzw. im Herbst laichen und hierdurch voneinander isoliert sind.

6. Anadrome Laichwanderungen.

Anadrome Wanderfischarten verbringen den größten Teil ihres Lebens im Meer, wandern aber zum Laichen ins Süßwasser ein. Die Ei- und Larvenentwicklung erfolgt im Süßwasser; in einem späteren Stadium wandern die Jungfische wieder ins Meer zurück. Anadrome Wanderfischarten gehören zu den in Deutschland am stärksten gefährdeten Arten, da sie intakte Lebensräume im Meer **und** in den großen Flüssen brauchen, oft bis in die Flußoberläufe hinein. Viele anadrome Wanderfischarten benötigen saubere Kiesbänke als Laichplätze, die im Hauptstrom kaum noch vorhanden sind; Nebenflüsse sind vom Hauptstrom oft durch Querbauwerke getrennt (z.B. Weser, Anonymus 1999). Beispiele für anadrome Wanderfischarten: *Acipenser sturio* (Stör), *Alosa alosa* (Maifisch), *Alosa fallax fallax* (Finte), *Coregonus lavaretus* subsp. (Schnäpel), *Lampetra fluviatilis* (Flußneunauge), *Petromyzon marinus* (Meerneunauge, Abb. 4).



Abb. 4: Anadrome Wanderungen beim Meerneunauge (*Petromyzon marinus*) im Nordsee-Einzugsgebiet. Laichgebiete schwarz. Doppellinien zeigen unüberwindliche Querbauwerke in den großen Flüssen.

7. Katadrome Laichwanderungen.

Nur eine einzige deutsche Meeresfischart, *Anguilla anguilla* (Flußaal), führt katadrome Wanderungen durch (Abb. 5). Aale verbringen den größten Teil ihres Lebens im Süßwasser, wandern aber zum Laichen ins Meer und legen dort riesige Distanzen zurück, bis sie ihren vermutlichen Laichplatz vor der nordostbrasilianischen Küste erreichen (Fricke in Lieckfeld 1999). Die Eier und Prälarven sind derzeit nicht bekannt; Postlarven werden im Bereich des Sargassomeers im tropischen Westatlantik gefunden und wandern mit dem Golfstrom bis an die europäischen Küsten, wo sie als Steigaale in Flüsse einwandern.



Abb. 5: Katadrome Laichwanderung beim Flußaal (*Anguilla anguilla*) im Nord- und Zentralatlantik. Dünne Pfeile: Laichwanderung adulter Tiere. Dicke Pfeile: Rückwanderung von Larven und Postlarven. Potenzielles Laichgebiet schraffiert.

Auswirkungen magnetischer Felder auf Fische in der Nord- und Ostsee

Viele Meeresfische orientieren sich bei ihrem Wanderverhalten am Erdmagnetfeld einschließlich Magnetfeldanomalien. Diese Orientierung ist bei Wanderungen in der Nordsee besonders wichtig, weil die Fische auf dem Hin- und Rückweg im Ärmelkanal eine Engstelle passieren müssen. Beim Verfehlen dieses Nadelöhrs auf dem Rückweg sind Fischsterben bekannt, wenn im Herbst die Nordsee zu stark abkühlt (Brachsenmakrelen der Familie Bramidae; Sardinen *Sardina pilchardus*). Es ist nicht auszuschließen, daß starke, linienförmige Magnetfelder entlang der Stromkabel das Orientierungsvermögen der Wanderfische beein-

trächtigen bzw. die Wanderbewegung in Richtung der Feldlinien des Kabels ablenken. Inwieweit eine Ablenkung durch Magnetfelder im Bereich von Stromkabeln die Zugrichtung von Wanderfischen verändern kann, ist nicht bekannt. Hierzu besteht dringender Forschungsbedarf (siehe Anhang I).

Für *Anguilla anguilla* (Aal) konnte eine Orientierung an magnetischen Feldlinien nachgewiesen werden (siehe den Beitrag von Tesch). Es ist jedoch zu erwarten, daß weitere marine Wanderfischarten sich magnetisch orientieren. Mögliche Beispiele hierfür: *Alosa alosa* (Maifisch), *Alosa fallax* (Finte), *Brama brama* (Brachsenmakrele), *Clupea harengus* (Hering), *Sardina pilchardus* (Sardine), *Sprattus sprattus* (Sprotte).

Bei nordamerikanischen Forellen wurden Verhaltensreaktionen und elektrophysiologische Reaktionen auf magnetische Felder nachgewiesen (Walker *et al.* 1997). Intrazelluläres Magnetit und mögliche Magnetsinneszellen wurden nachgewiesen. Kalmijn (1974) zeigte, daß Haie schwache magnetische Felder wahrnehmen können. Paulin (1995) entwickelte eine Theorie, wie Haie ihren elektrischen Sinn zur Navigation im Erdmagnetfeld verwenden können.

Weiterhin nachgewiesen wurden Verhaltensreaktionen von Fischen mit elektrischen Organen auf extrem schwache magnetische Felder $H = 8 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ (Kholodov 1965). Hierfür kommen in der Nordsee zwei Arten der Zitterrochen (Torpedinidae) in Betracht. Stichlinge (*Gasterosteus aculeatus*) hingegen zeigen Verhaltensreaktionen erst bei viel stärkeren magnetischen Feldern ab $H = 4 \times 10^{-3} \text{ Am}^{-1}$ (Presman 1968).

Bei Freiland-Telemetrierversuchen an Silberaalen entlang des Baltic Cable in Schweden wurden die Wanderungen von neun Aalen im Verhältnis zu einem untermeerischen Stromkabel beobachtet. Von diesen neun Exemplaren näherten sich nur vier dem Kabel und konnten in ihrer Reaktion beobachtet werden. Drei der vier Aale verließen ihren vorherigen Südwestkurs, drehten entlang des Kabels nach Süden ab und folgten dem Kabel mehrere Kilometer weit, bevor sie es über tieferem Wasser überquerten und wieder den Südwestkurs aufnahmen (Westerberg 1997). Die Ergebnisse sind statistisch nicht gesichert; sie widersprechen aber der Theorie der magnetischen Orientierung der Aale, nach der die Fische nordwärts hätten abgelenkt werden müssen. Die Untersuchungsergebnisse deuten eher auf Auswirkungen des elektrischen Feldes hin, das küstennah in seichtem Wasser stärker ist als weiter südlich in tieferem Wasser, und vor dem die Aale möglicherweise südlich auswichen, bis das Feld schwächer wurde. Weitere Freilandversuche sind in diesem Zusammenhang dringend erforderlich, um eventuelle Auswirkungen statistisch gesichert zu belegen.

Auswirkungen elektrischer Felder auf Fische in der Nord- und Ostsee

Die allgemeinen Auswirkungen elektrischer Felder auf Fische sind gut bekannt. Drei Wirkungsphasen werden unterschieden (Sternin & Nikonorov in Sternin *et al.* 1976, Abb. 6):

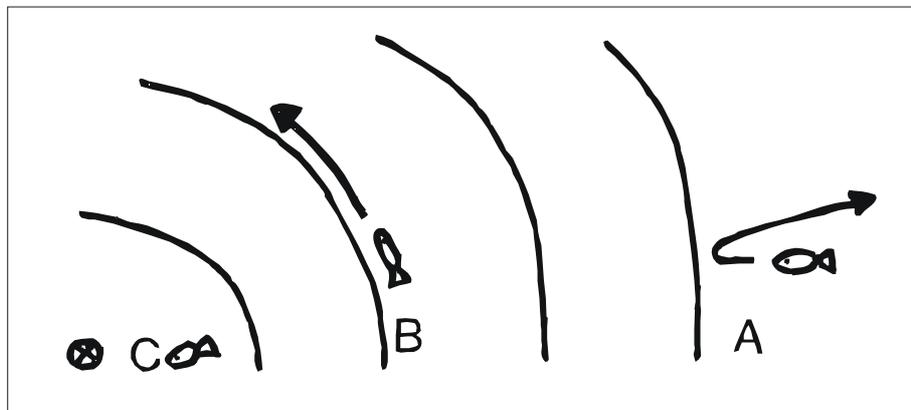


Abb. 6: Wirkungsweisen elektrischer Felder auf Fische. X - Stromquelle. A - Scheuchwirkung. B - Ablenkung. C - Betäubung.

1. Scheuchwirkung.

Bei Eintritt in ein schwach elektrisches Feld tritt ein Vermeidungsverhalten des Fisches auf; er versucht dem Einfluß des elektrischen Feldes zu entkommen. Dieses Prinzip wird bei Fische-scheuchanlagen an Kühlwasserentnahmeeinrichtungen bei Großkraftwerken an Flussunterläufen angewendet, um möglichst wenig Fische in das Kühlwasser der Kraftwerke einzusaugen.

2. Ablenkung.

In einem mittelstarken elektrischen Feld werden Fische betäubt, so daß sie ihre Bewegungsrichtung nicht mehr kontrollieren können. Gleichzeitig kontrahieren sich in einem Gleichstromfeld die Muskeln der Fische, so daß sie „automatisch“ und schnell entlang der Feldlinien in Richtung der Anode schwimmen. Dieses Prinzip wird bei der Elektrofischerei im Süßwasser angewendet.

3. Starke Betäubung, gegebenenfalls letale Auswirkung.

In einem starken elektrischen Feld werden Fische betäubt, sind völlig orientierungslos, und steigen zur Wasseroberfläche auf (falls eine Schwimmblase vorhanden ist) oder sinken zu Boden; je nach Stärke des Feldes und Sensitivität des Fisches kann ein Atemstillstand und damit der Tod eintreten.

Die Stärke des elektrischen Feldes, die eine Reaktion nach den Phasen 1-3 auslöst, ist je nach Sensitivität der Fischart und Größe des Fisches unterschiedlich. Aus der Elektrofischerei im Süßwasser ist bekannt, daß es große Unterschiede in der Elektrosensitivität bei einzelnen Fischarten gibt. Ursachen für diese Sensitivitätsunterschiede können in der Körper-

form begründet sein, aber auch in der Dicke der Schädelknochen und damit der relativen Isolation des Zentralnervensystems. Bei Elektrobefischungen im Süßwasser ist besonders hohe Elektrosensitivität von adulten Fischen der Familie Clupeidae sowie einigen Arten der Cyprinidae, besonders aber Jungfischen dieser Familien bekannt. Presman (1968) hält das Auftreten biologischer Effekte in extrem schwachen elektromagnetischen Feldern für den wichtigsten Verhaltensmechanismus lebender Organismen. Starke elektrische Felder lösen bei juvenilen Forellen gravierende physiologische Streßeffekte aus (Barton & Grosh 1996, Barton & Dwyer 1997). Auch Verhaltensänderungen (Mesa & Schreck 1989), herabgesetzte Wachstumsraten (Gatz & Adams 1987, Dwyer & White 1997), längerfristige Gesundheitsschäden von Fischen (McCrimmon & Bidgood 1965, Dalbey *et al.* 1996) und Fischmortalität (Collins *et al.* 1954, Pratt 1954) sind nach Einsatz von Elektrofischereimethoden seit langem bekannt.

Aktiv schwimmende Fische, die sich einem elektrischen Feld nähern, treffen immer zuerst auf ein schwaches Feld; sie zeigen also ein Ausweichverhalten (Phase 1, Scheuchwirkung). Im Fall eines Stromkabels wird erwartet, daß sie dieses möglichst nicht zu überqueren versuchen, wenn sie in der Lage sind, das elektrische Feld wahrzunehmen.

Die tatsächlichen Auswirkungen von elektrischen Feldern auf Fische im Bereich von Stromkabeln im Meer wurden nur im Zusammenhang mit der Wanderung von Aalen in der Ostsee untersucht (siehe oben). Obwohl das Verhalten einzelner Exemplare mögliche Ablenkungen durch das Kabel zeigte, konnte keine Beeinträchtigung der Aale durch elektrische oder magnetische Felder statistisch gesichert nachgewiesen werden. Die genannte Untersuchung beruht allerdings auf zu wenigen Einzelbeobachtungen. Außerdem ist sie nicht unmittelbar auf die deutsche Nordsee übertragbar, da die südliche Nordsee eine geringere Wassertiefe, einen höheren Salzgehalt und wesentlich stärkere Strömungen als die Ostsee hat. Aus Elektrobefischungen im Süßwasser ist bekannt, daß Aale nur eine mittlere Elektrosensitivität aufweisen. Für künftige Versuche wäre es sinnvoller, Arten mit hoher Elektrosensitivität als Untersuchungsobjekte auszuwählen.

Bei welchen marinen Fischarten im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee sind Auswirkungen von elektrischen Feldern zu erwarten? Die folgenden Artengruppen kommen in Frage:

1. Clupeidae (Heringsfische).

Arten der Familie Clupeidae sind bei Elektrobefischungen im Süßwasser als besonders elektrosensitiv bekannt. Alle Arten in der deutschen Nord- und Ostsee führen Wanderungen durch, die sie in Bodennähe über potenzielle Kabelstandorte hinwegführen. *Clupea harengus harengus* (Nordseehering) und *Sardina pilchardus* (Sardine, Abb. 7) überqueren die geplanten EUROKABEL, NORNEDKABEL, VIKINGKABEL (Positionen laut Information von STATNETT 1999) regelmäßig auf ihren Laich- und Nahrungswanderungen. Die Ostsee-Frühjahrs-

und -Herbstheringe (*Clupea harengus* subsp.) müssen auf ihren Wanderungen ebenfalls die bereits bestehenden und geplanten Kabel überqueren. Sprotten (*Sprattus sprattus*) leben küstennah und in Ästuarbereichen; sie führen dabei tideabhängige diurnale Wanderungen durch, die sie zumindest in den Ästuarbereichen mehrmals täglich in den Bereich der Kabel bringt. Schließlich sind die Arten der Gattung *Alosa* (Maifisch und Finte) anadrome Wanderfische, die sowohl als Adulttier auf der Laichwanderung als auch als Jungfisch auf der Rückwanderung Kabel in den Ästuarbereichen überqueren müssen. Bei der Finte driften Eier und Larven tideabhängig im Ästuarbereich und müssen wiederholt die verlegten Kabel überqueren.

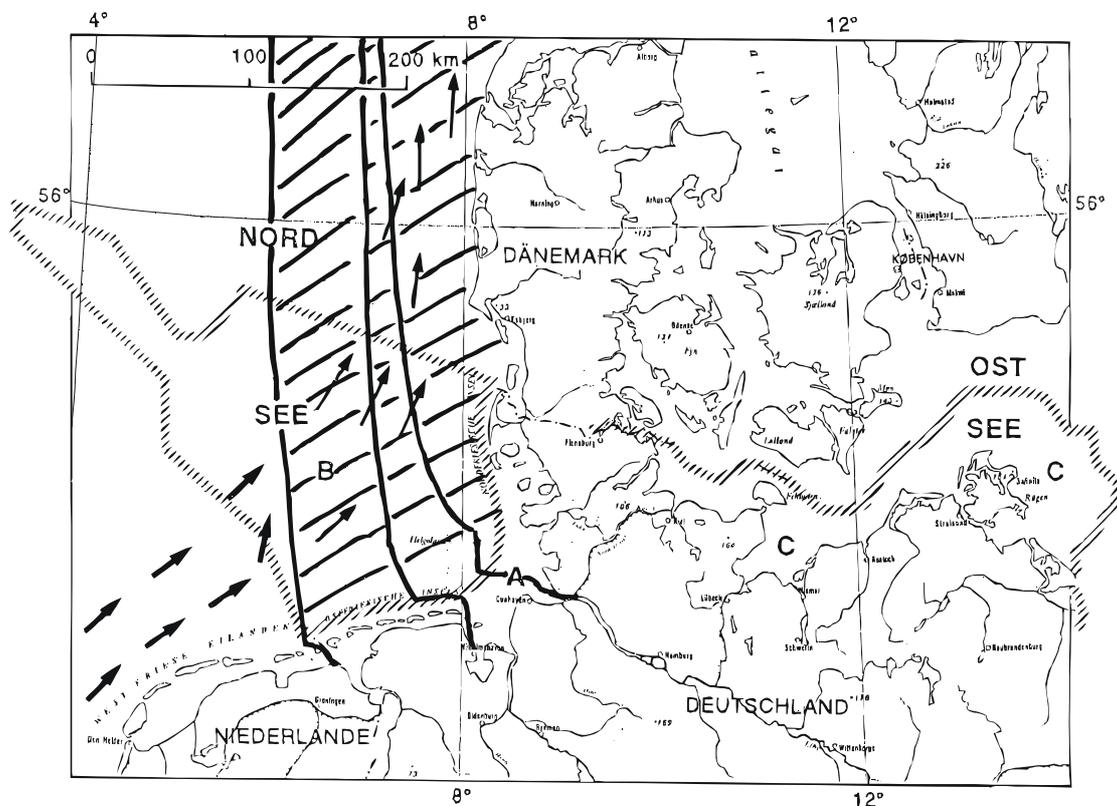


Abb. 7: Nahrungswanderungen der Sardine (*Sardina pilchardus*) in der südöstlichen Nordsee in Abhängigkeit von geplanten untermeerischen Kabelstandorten der NORNED-, VIKING- und EUROKABEL (Position: laut Statnett). Pfeile: Wanderroute der Sardine. Schraffierte Flächen: Gebiete mit potenzieller Reduzierung der Sardinenvorkommen durch mögliche Auswirkung elektrischer Felder der untermeerischen Kabel.

Für die hier erwähnten Arten der Familie Clupeidae wird eine Scheuchwirkung bei Eintritt in das schwach elektrische Feld um Stromkabel für wahrscheinlich gehalten. Der Hering (*Clupea harengus*) ist möglicherweise als Zeigerart für die Auswirkungen elektrischer Felder geeignet.

2. Haie und Rochen.

Bei Haien und Rochen wurden hochsensible Elektrozeporen gefunden, die in den sogenannten Lorenzinische Ampullen lokalisiert sind (Bennett 1974, Paulin 1995). Durch ihre hohe Sensibilität sind diese Rezeptoren hervorragend geeignet, um die schwachen elektrischen Felder im Bereich von Stromkabeln wahrzunehmen. Daher werden Haie und Rochen mit Sicherheit von elektrischen Feldern im Bereich von Stromkabeln beeinflusst; es ist anzunehmen, daß hier eine Scheuchwirkung auftritt. Beispiele in unserem Bereich: *Hexanchus griseus* (Grauhai), Scyliorhinidae (Katzenhaie, 3 Arten), Squalidae (Dornhaie, 2 Arten), *Alopias vulpinus* (Drescherhai), *Squatina squatina* (Meerengel), Rajidae (Echte Rochen, 12 Arten), Torpedinidae (Zitterrochen, 2 Arten). Die Zitterrochen der Gattung *Torpedo* sind in diesem Zusammenhang bemerkenswert, als sie zum Beutefang und zur Verteidigung eigene elektrische Felder aufbauen; es steht zu erwarten, daß sie künstliche elektrische Felder vermeiden. Aus der Gruppe der Haie und Rochen wäre wegen seinem regelmäßigen Auftreten besonders der Dornhai (*Squalus acanthias*) als Zeigerart für die Auswirkungen elektrischer Felder geeignet.

3. Plattfische.

Die Gruppe der Plattfische ist insofern möglicherweise durch künstliche elektrische Felder im Meer beeinflusst, als die Adulttiere auf dem Boden leben und ihre Wanderungen direkt über dem Boden durchführen; damit müssen sie Elektrokabel in unmittelbarer Nähe überqueren, also dort, wo das sekundär induzierte elektrische Feld am stärksten ist. Beispiele in der deutschen Nord- und Ostsee sind die Familien Pleuronectidae (Schollen, 6 Arten), Bothidae (Butte, 7 Arten), Scophthalmidae (Glattbutte, 1 Art), Soleidae (Seezungen, 2 Arten). Potenziell geeignete Zeigerarten für die Auswirkungen elektrischer Felder sind die Seezunge (*Solea solea*), sowie im Ästuarbereich die Flunder (*Platichthys flesus*).

4. Andere bodennah wandernde Knochenfische.

Mehrere andere Familien ohne Schwimmblase leben ebenfalls als Adulttiere auf dem Meeresboden und führen bodennahe regionale Wanderungen durch. Beispiele in der Nord- und Ostsee sind die Familien Lophiidae (Seeteufel, 2 Arten); Zoarcidae (Aalmuttern, 1 Art), Cottidae (Groppen, 4 Arten), Agonidae (Panzergruppen, 1 Art), Liparidae (Scheibenbäuche, 2 Arten), Trachinidae (Petermännchen, 2 Arten), Blenniidae (Schleimfische, 2 Arten), Pholidae (Butterfische, 1 Art), Callionymidae (Leierfische, 3 Arten), Gobiidae (Grundeln, 13 Arten). Für diese Fische gelten die gleichen potenziellen Auswirkungen wie für Arten der Gruppe 3 (Plattfische).

5. Eier und Larven.

Wenn von möglichen Auswirkungen elektrischer Felder gesprochen wird, denkt man immer zuerst an Adulttiere. Jeder Fisch ist allerdings zuerst einmal ein Ei, später eine Larve gewesen. Viele marine Fischarten haben planktonische Eier, die frei im Wasser treiben und mit

den Strömungen verdriftet werden, sowie freischwimmende Larven, die bei Arten mit bodenlebenden Adulttieren das Ausbreitungsstadium darstellen. Aus Erfahrungen bei der Elektrofischerei von Süßgewässern ist bekannt, daß Fischlarven und Jungfische einiger Familien (z.B. Clupeidae, Heringsfische) hochsensibel auf elektrische Felder reagieren. Daher müssen bei der Bewertung möglicher Auswirkungen künstlicher elektrischer Felder im Meer diese Stadien besonders berücksichtigt werden.

Bisher wurde allgemein angenommen, daß Fischlarven ausschließlich passiv verdriftet werden. Jüngste Unterwasserbeobachtungen an verschiedenen Arten haben jedoch ergeben, daß Fischlarven oft eine beträchtliche Eigendynamik und ein gerichtetes Wanderverhalten aufweisen; sie können auch gegen starke Strömungen anschwimmen, und suchen am Ende ihres Larvenstadiums gezielt zur Besiedlung geeignete Habitate auf (J.M. Leis pers. Mitt.). Daher ist es sehr wahrscheinlich, daß auch bei Fischlarven eine Scheuchwirkung auftreten kann, wenn sie sich elektrischen Feldern nähern.

Von Heringen (*Clupea harengus harengus*) ist bekannt, daß ihre Bestände stark auf Schwankungen im natürlichen Erdmagnetfeld reagieren (Sternin *et al.* 1976). Es ist anzunehmen, daß auf erhöhte Magnet- und Elektrofelder deutlich stärkere Reaktionen folgen werden. Eine mögliche Ursache ist die hohe Elektrosensibilität der Heringslarven und Jungheringe, die durch Elektrofischereien in Flussunterläufen belegt ist. Hier könnten elektrische Felder im Bereich von untermeerischen Stromkabeln in der Nordsee auch zu Bestands- und Fischereiertragseinbrüchen führen.

Forschungsbedarf zu Auswirkungen technischer Eingriffe auf marine Fische in der Nord- und Ostsee

Die konkreten Auswirkungen elektrischer und magnetischer Felder auf marine Fische in ihrem natürlichen Lebensraum sind kaum bekannt, da erst in jüngster Zeit in größerem Umfang Elektrokabel im Meer verlegt wurden. Um zu gesicherten Aussagen zu gelangen, besteht ein erheblicher Forschungsbedarf.

Die Mitglieder der Workshopgruppe "Fische" haben während des Workshops "Technische Eingriffe in marine Lebensräume" (Insel Vilm, 27.-29. Oktober 1999) die aus ihrer Sicht wichtigsten Aspekte des Forschungsbedarfes in diesem Bereich zusammengetragen. Diese Positionspapiere werden in **Anhang 1** (Forschungsbedarf bezüglich der Auswirkungen von Unterwasser-Stromkabeln auf marine Fische) und **Anhang 2** (Forschungsbedarf bezüglich der Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Fische) wiedergegeben.

Literatur

- Anonymus (1999): 1979-1999: 20 Jahre Sturmflutschutz durch Sperrwerke. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz; Senator für Bau und Umwelt der Freien Hansestadt Bremen, Brake und Bremen.
- Barton, B.A. & W.P. Dwyer (1997): Physiological stress effects of continuous- and pulsed DC electroshock on juvenile bull trout. *J. Fish Biol.* 51: 998-1008.
- Barton, B.A. & R.S. Grosh (1996): Effect of AC electroshock on blood features in juvenile rainbow trout. *J. Fish Biol.* 49: 1330-1333.
- Bennett, M.V.L. (1974): Electroreception. In: Hoar, W.S. & D.J. Randall (eds.): *Fish Physiology*, vol. 5. Academic Press, New York. pp. 493-574.
- Berg, S., Krog, C., Muus, B., Nielsen, J., Fricke, R., Berghahn, R., Neudecker, T. & W.J. Wolff (1996): Red lists of biotopes, flora and fauna of the trilateral Wadden Sea area, 1995. IX. Red list of lampreys and marine fishes of the Wadden Sea. *Helgol. Meeresunters.* 50 (Suppl.): 101-105.
- Brunken, H. & R. Fricke (1985): *Deutsche Süßwasserfische. Bestimmungsschlüssel für die wildlebenden Arten.* Deutscher Jugendbund für Naturbeobachtung, Hamburg.
- Collins, G.B., Volz, C.D. & P.S. Trefenthen (1954): Mortality of salmon fingerlings exposed to pulsating direct current. *U.S. Fish Wildl. Serv., Fish. Bull.* 92: 61-68.
- Dalbey, S.R., McMahon, T.E. & W. Fredenberg (1996): Effect of electrofishing pulse shape and electrofishing-induced spinal injury on long-term growth and survival of wild rainbow trout. *N. Amer. J. Fish. Managem.* 16: 560-569.
- Dwyer, W.P. & R.G. White (1997): Effect of electroshock on juvenile Arctic grayling and Yellowstone cutthroat trout growth, 100 days after treatment. *N. Amer. J. Fish. Managem.* 17: 174-177.
- Fricke, R. (1987): *Deutsche Meeresfische: Bestimmungsbuch.* Deutscher Jugendbund für Naturbeobachtung, Hamburg.
- Fricke, R. (1999): Annotated checklist of the marine and estuarine fishes of Germany, with remarks on their taxonomic identity. *Stuttg. Beitr. Naturk. (A)* 587: 1-67.
- Fricke, R., Berghahn, R. & T. Neudecker (1995): Rote Liste der Rundmäuler und Meeresfische des deutschen Wattenmeer- und Nordseebereichs (mit Anhängen: nicht gefährdete Arten). *Schr.-R. Landschaftspfl. Natursch.* 44: 101-113.
- Fricke, R., Berghahn, R., Rechlin, O., Neudecker, T., Winkler, H., Bast, H.-D. & E. Hahlbeck (1994): Rote Liste und Artenverzeichnis der Rundmäuler und Fische im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee. In: Nowak, E., Blab, J. & R. Bless (eds.): *Rote Listen der gefährdeten Wirbeltiere Deutschlands.* Kilda-Verlag, Greven. pp. 157-176.

- Fricke, R., Berghahn, R., Rechlin, O. Neudecker, T., Winkler, H., Bast, H.-D. & E. Hahlbeck (1998): Rote Liste und Artenverzeichnis der Rundmäuler und Fische im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee. In: Binot, M., Bless, R., Boye, P., Gruttke, H. & P. Pretscher (eds.): Rote Liste gefährdeter Tiere Deutschlands. Schr.-R. Landschaftspf. Natursch. 55: 60-64.
- Fricke, R., Rechlin, O. T., Winkler, H., Bast, H.-D. & E. Hahlbeck (1996): Rote Liste und Artenliste der Rundmäuler und Meeresfische des deutschen Meeres- und Küstenbereichs der Ostsee. Schr.-R. Landschaftspf. Natursch. 48: 83-90.
- Gatz, A.R. Jr. & S.M. Adams (1987): Effects of repeated electroshocking on growth of bluegill x green sunfish hybrids. N. Amer. J. Fish. Managem. 7: 448-450.
- Kalmijn, A.J. (1982): Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. Science 218: 916-918.
- Kholodov, Y.A. (1965): Magnitoe pole kak razdrazhitel' (The magnetic field as stimulus). Sbornik „Bionika“. Izdatel'stvo „Nauka“, Moskau & Leningrad (in Russisch).
- Lieckfeld, C.-P.(1999): Portrait: Der geborene Aquanaut (Hans Fricke). GEO Wissen, 24: 102-109.
- McCrimmon, H.R. & B. Bidgood (1965): Abnormal vertebrae in the rainbow trout with particular reference to electrofishing. Trans. Amer. Fish. Soc. 94: 84-88.
- Mesa, M.G. & C.B. Schreck (1989): Electrofishing mark-recapture and depletion methodologies evoke behavioral and physiological changes in cutthroat trout. Trans. Amer. Fish. Soc. 118: 644-658.
- Mironov, A.T. (1948): Elektricheskii tok v more i deistvie toka ny ryby (Electric current in the sea and effect of current on fish). Trudy Morskogo gidrofizicheskogo Instituta, 1. (Izdatel'stvo A.N. S.S.S.R.), Moskau & Leningrad (in Russisch).
- Paulin, M.G. (1995): Electroreception and the compass sense of sharks. J. Theor. Biol. 174: 325-339.
- Pratt, V.S. (1954): Fish mortality caused by electrical shockers. Trans. Amer. Fish. Soc. 84: 93-96.
- Presman, A.S. (1968): Elektromagnitnye polya i zhivaya priroda (Electromagnetic fields and living nature). Izdatel'stvo „Nauka“, Moskva & Leningrad (in Russisch).
- Smith, R.J.F. (1985): Electrical and magnetic stimuli. In: Smith, R.J.F. (ed.): The control of fish migration. Zoophysiology, vol. 17. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York & Tokyo. pp. 174-193.
- Sternin, V.G., Nikonorov, I.V. & Y.K. Bumeister (1976): Electrical fishing: theory and practice. (Translated from Russian). Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Vorberg, R. & P. Breckling (1999): Atlas der Fische im schleswig-holsteinischen Wattenmeer. Schr.-R. Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer 10: 1-178.

- Walker, M.M., Diebel, C.E., Haugh, C.V., Pankhurst, P.M., Montgomery, J.C. & C.R. Green (1997): Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 390: 371-376.
- Westerberg, H. (1997): Telemetriförsök med blankaal vid HVDC polkabel 1997. preliminär sammanfattning. Frölunda, Sweden (Unpublished preliminary report; National Board of Fisheries, Institute of Coastal Research).
- Wheeler, A. (1969): *The fishes of the British Isles and North-West Europe*. Michigan State University Press, East Lansing.
- Wheeler, A. (1979): *The world encyclopedia of fishes*. MacDonald, London.

Anhang 1: Unterwasser-Stromkabel, Forschungsbedarf Fische

Autoren: Workshopgruppe "Fische"

Debus, L. Universität Rostock
 E-Mail: ld@fibio.physik2.uni-rostock.de

Ehrich, S. Bundesforschungsanstalt für Fischerei Hamburg
 E-Mail: ehrich.ish@bfa-fisch.de

Fricke, R. Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart
 E-Mail: ronfricke@compuserve.com

Frieß, C.-C. Bundesforschungsanstalt für Fischerei Rostock
 Fax: (0381) 810 445

Kullnick, U. J.-W. Goethe-Universität Frankfurt/Main
 E-Mail: kullnick@imst.de

Marhold, S. J.-W. Goethe-Universität Frankfurt/Main
 E-Mail: marhold@zoology.uni-frankfurt.de

Unterwasser-Stromkabel (Underwater Power Cables)

Forschungsbedarf Fische

1) Konfliktpotential

- a) Fischgesundheit
- b) Orientierung
 - Einflüsse auf das Migrationsverhalten (Barrierewirkung; Störungen des Wanderhaltens)

2) Untersuchungen

- Untersuchungen (Status quo) vor Maßnahme (Installation eines Kabels)
- Untersuchungen nach Maßnahme (Installation eines Kabels)
- Labor- und Freilanduntersuchungen nötig
- Bei Laborversuchen: auch Entwicklung von Modellvorstellungen

3) Methodik

- Es gibt große Wissenslücken im ichthyologischen Bereich.
- a) Feststellung des Wissensstandes unter ökologisch/biologischen Gesichtspunkten mit Definition realistischer Risiken auf verschiedene Alters- und Entwicklungsstadien verschiedener Arten
 - Berücksichtigung der Lebensraumansprüche der Schlüsselarten
- b) Definition der Schlüsselarten (Vorschläge unten)
- c) Fischgesundheit
 - Laboruntersuchungen:
 - Untersuchung der Schlüsselarten im elektrischen/magnetischen Feld (Wechselwirkungen Tier/Feld - Feld/Tier)

- Auswirkung von elektrischen Feldern
- Auswirkung von magnetischen Feldern
- Auswirkung von elektrischen **und** magnetischen Feldern

Freilanduntersuchungen:

- Entfallen; mögliche Auswirkungen im Freiland derzeit nicht nachweisbar, da direkte Auswirkungen auf das kleinskalige Verbreitungsmuster oder auf das Wachstum der Arten von den Auswirkungen natürlicher Effekte wegen der hohen natürlichen Variabilität nicht zu trennen sind. Die Auswirkungen auf Fische werden als schwach eingeschätzt.

d) Orientierung

Laboruntersuchungen:

- Bestandserfassung der Modelle
- Identifizierung der Schlüsselarten
- Untersuchung möglicher Auswirkungen auf Eier, Larven und Adulttiere der Schlüsselarten:
 - elektrisch
 - magnetisch
 - thermisch

Freilanduntersuchungen:

- Wanderverhalten von Schlüsselarten
 - telemetrische Untersuchungen/Markierungsexperimente an Adulttieren
 - Videomonitoring an existierenden Kabeln
- Monitoring der Bestände und Wanderbewegungen der Schlüsselarten
 - im Ästuarbereich
 - im marinen Bereich
 - Echosurvey
 - Planktonsurvey (planktonische Larven)
 - Trawlsurvey

4) Allgemeine Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse

- Es sollten standardisierte Untersuchungsmethoden verwendet bzw. entwickelt werden
 - Laboruntersuchungen
 - Freilanduntersuchungen (standortabhängige Untersuchungen nötig)
- Potentielle Schlüsselarten:
 - Elektrisch sensitive Arten
 - Vorschläge: Dornhai (Nordsee)
 - nn (Ästuarbereich)
 - nn (sensitives Larvenstadium)
 - nn (küstennaher Wanderfisch)

nn (anadrome Wanderfischart)

- Magnetisch sensitive Arten

Vorschläge: Aal (Nord- und Ostsee)

nn (Ästuarbereich)

nn (sensitives Larvenstadium)

nn (küstennaher Wanderfisch)

nn (anadrome Wanderfischart)

- Andere Arten

Vorschläge: nn

5) Allgemeine Anmerkung

Dieser Ansatz soll den Forschungsbedarf bezüglich mariner Fische möglichst vollständig erfassen. Für jedes konkrete Projekt muss der diesbezügliche Forschungsbedarf individuell neu zugeschnitten werden.

Anhang 2: Offshore-Windkraftanlagen, Forschungsbedarf Fische

Autoren: Workshopgruppe "Fische"

Debus, L. Universität Rostock
E-Mail: ld@fibio.physik2.uni-rostock.de
Ehrich, S. Bundesforschungsanstalt für Fischerei Hamburg
E-Mail: ehrich.ish@bfa-fisch.de
Fricke, R. Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart
E-Mail: ronfricke@compuserve.com
Frieß, C.-C. Bundesforschungsanstalt für Fischerei Rostock
Fax: (0381) 810 445
Kullnick, U. J.-W. Goethe-Universität Frankfurt/Main
E-Mail: kullnick@imst.de
Marhold, S. J.-W. Goethe-Universität Frankfurt/Main
E-Mail: marhold@zoology.uni-frankfurt.de

Offshore-Windkraftanlagen, Forschungsbedarf Fische (zusätzlich zu Untersuchungen über untermeerische Stromkabel)

1) Konfliktpotential

- a) Akustische Effekte
- b) Habitatveränderungen

2) Untersuchungen

- Untersuchungen (Status quo) vor Maßnahme (Installation der WKA)
- Untersuchungen während der Baumaßnahme
- Untersuchungen nach Maßnahme
- Labor- und Freilanduntersuchungen nötig
- Bei Laborversuchen: auch Entwicklung von Modellvorstellungen

3) Methodik

- Es gibt große Wissenslücken im ichthyologischen Bereich.
- a) Feststellung des Wissensstandes unter ökologisch/biologischen Gesichtspunkten mit Definition realistischer Risiken auf verschiedene Alters- und Entwicklungsstadien verschiedener Arten
 - Berücksichtigung der Lebensraumansprüche der Schlüsselarten
 - b) Definition der Schlüsselarten (Vorschläge unten)
- c) Akustische Auswirkungen
Laboruntersuchungen:
 - Untersuchung bei Schlüsselarten (in Bezug auf Frequenzen)
 - Hörbarkeit

- Verhaltensreaktionen
- Maskierung von Geräuschen

Freilanduntersuchungen:

- Akustikuntersuchungen im Einflussbereich der Geräuschquelle
- Berücksichtigung der Frequenzbereiche der Schlüsselarten
- Bestandsuntersuchungen für Schlüsselarten im Verhältnis zur Geräuschquelle

d) Habitatveränderung

- Freilanduntersuchungen:
 - Habitatcharakterisierung
 - Benthosuntersuchungen

4) Allgemeine Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse

- Es sollten standardisierte Untersuchungsmethoden entwickelt werden
 - Laboruntersuchungen
 - Freilanduntersuchungen
 - Standortabhängige Untersuchungen nötig
 - Potentielle Schlüsselarten:
 - nn (Akustik)
 - nn (Habitat)

Magnetische Richtungsorientierung des Aales im Labor und Anzeichen einer solchen Orientierung bei Aal-Verfolgungsexperimenten. Sind alternative Orientierungsmechanismen möglich?

Friedrich-Wilhelm Tesch

AWI - Biologische Anstalt Helgoland, Notkestraße 31, D-22807 Hamburg, Germany
ftesch@meeresforschung.de

Einleitung

Nachfolgend werden die Ergebnisse unserer verschiedenen Untersuchungen über magnetische Einflüsse auf das Verhalten des Aales zusammengefaßt. Die ersten Studien fanden Anfang der siebziger Jahre statt. Sie wurden von Untersuchungen über das Richtungsfinden der Aale im Meer begleitet. Spätere Untersuchungen wurden Ende der achtziger Jahre durchgeführt. Sie wurden methodisch dem neueren Wissensstand angepaßt. Abschließend wird diskutiert, wie weit für das Hinfinden zum Laichplatz im mittleren Nordwestatlantik noch andere Mechanismen als die Magnetrezeption in Frage kommen.

Eigene Untersuchungen zur Magnetorientierung des Aales.

Experiment 1 a: Erste Laboruntersuchungen mit freier Richtungswahl im Rundbecken ohne Wasserbewegung bei normalem Magnetfeld der Erde oder bei magnetischer Beeinflussung durch ein Spulensystem (4 m²) mit geringer Homogenität des künstlich erzeugten Magnetfeldes. Mehrere Individuen in jedem Versuch, daher gegenseitige Beeinflussung möglich (Tesch & Lelek 1973 a, b, Tesch 1974 a).

Bei natürlichem Magnetfeld richteten sich sowohl Gelb- als auch Blankaale bipolar nach N und NW bzw. nach S aus, gleichgültig, ob sie auf Helgoland oder in Hamburg untersucht wurden. Veränderte man das Feld in Richtung und Stärke durch eine Helmholtzspule, so ergaben sich signifikante Richtungsänderungen. Diese traten jedoch nicht mit gleicher Veränderung wie im Magnetfeld auf.

Experiment 1 b: Parallel hierzu wurden Aale bei Helgoland während ihrer Laichwanderung im Herbst ausgesetzt und verfolgt. Gleiches geschah mit Gelbaalen im Sommer. Die Indivi-

duen stammten aus verschiedenen Fangpositionen, so daß bei den Gelbaalen nach den Ergebnissen früherer Markierungs- und Wiederfangversuche mit Heimkehrversuchen gerechnet werden mußte. (Deelder & Tesch 1970, Tesch 1967)

Die Blankaale schwammen bei Berücksichtigung der Tidenströmungen ähnlich wie im Labor nach NNW (aber nicht nach SSO). Die Gelbaale bevorzugten dagegen SSO (aber nicht NNW). An Blankaalen, die weiter südlich im ostatlantischen Schelfbereich (Tesch 1978) und im südwestlichen Mittelmeer (Tesch 1989) verfolgt wurden, konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden.

Experiment 2: Die Startrichtung oder Richtungspräferenz von Einzelaalen (je Versuch 14 bis 26 Aale), die bei freier Richtungswahl nicht durch andere Aale beeinflusst wurden, wurde bei normalem Magnetfeld der Erde ermittelt (Abb. 1, Tesch *et al.* 1992):

- a) im Rundbecken mit Start vom Zentrum zur Peripherie (C),
- b) im Ringbecken und Erfassung der Richtungspräferenzen durch Lichtschranken (R).

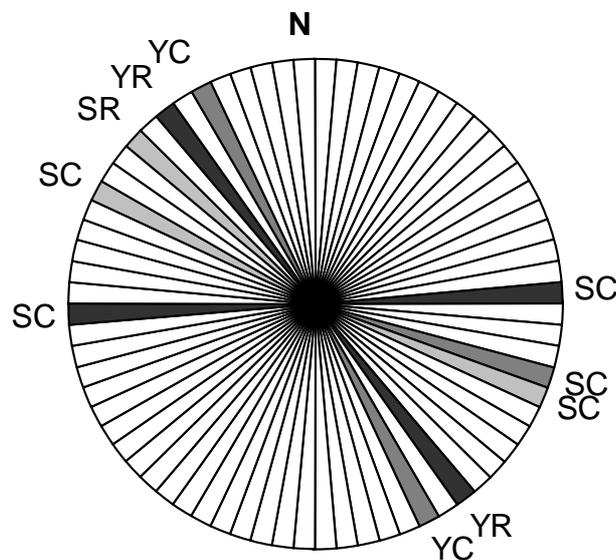


Abb. 1: Magnetfeld normal, zwei Testmethoden (C u. R, s. Text), zwei Aalentwicklungsstadien (S u. Y). Abkürzungen: C= Rundbecken, in dem jeweils ein Aal in der Mitte freigelassen und seine Schwimmrichtung durch mechanische Kontakte registriert wurde. R= Ringbecken, in dem die bevorzugte Richtung jeweils eines Aals durch Infrarot-Lichtschranken registriert wurde. S= Silberaale (auf der Wanderung befindliche Blankaale) Y= Gelbaale (im Ernährungsstadium befindliche Aale), Signifikanz der angezeigten Richtungen: schwarz $p < 0.05$, dunkelgrau $p 0,05- 0,10$, hellgrau $>0,10$ nicht signifikant.

Experiment 3: Die Startrichtung im Rundbecken (C) wurde wie unter 2a bei Drehung der horizontalen Komponente des Magnetfeldes um 180° durch ein Spulensystem (4 m^3) ermittelt, das nur geringe Homogenität des Magnetfeldes erzeugte und die vertikale Komponente unverändert ließ (Abb. 2, Tesch *et al.* 1992).

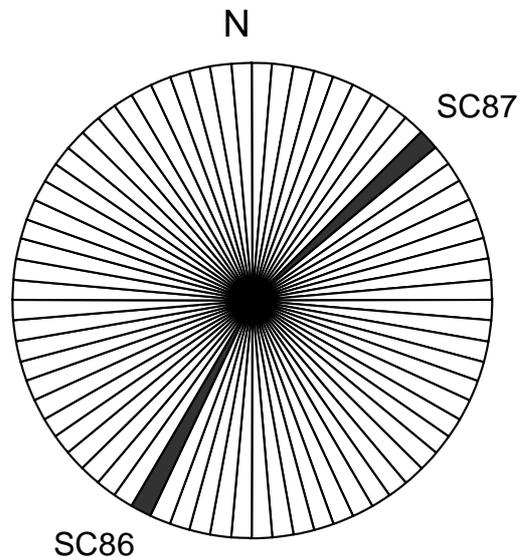


Abb. 2: Magnetfeld bei nur geringer Homogenität um horizontal 180° gedreht (C 1987 u. 1988).

Bei Drehung der Horizontalkomponente in die entgegengesetzte Richtung in zwei verschiedenen Jahren gab es signifikante andere Richtungsbevorzugungen (NO bzw. SW bis SSW) als im Normalfeld (Abb. 2), die bei der weiterhin bestehenden natürlichen Inklination und einem damit unrealistischem Magnetfeld erklärlich sind. Die beiden unterschiedlichen Richtungspräferenzen sind vielleicht nicht so unterschiedlich zu werten, wenn ihre um annähernd 180° differierende Gegensätzlichkeit berücksichtigt wird, die als Bimodalität gewertet werden kann und damit als in den beiden Jahren sehr ähnliches Richtungsverhalten.

Experiment 4: Freie Schwimmbewegungen und die Verteilung von Einzelaalen wurden in einem Ringbecken mit einem größeren als dem vorher verwendeten Spulensystem (60 m^3) untersucht, das eine relativ hohe Homogenität des Feldes erzeugte (Tesch *et al.* 1992) bei:

- a) normalem bis auf weniger als 4% kompensierten horizontalem und vertikalem Erdmagnetfeld (Abb. 3)
- b) Veränderung der Magnetbedingungen in Richtung, Inklination und Stärke
- c) Veränderung der Inklination und Stärke (Abb. 4)

In Versuchsanordnung a) bevorzugten Gelbaale in Ringbecken und kompensiertem Feld ($< 4\%$ des Normalfeldes) ähnlich wie im nicht-kompensierten Normalfeld und gemessen an der Richtung der Restfeldlinien signifikant WNW und OSO; in zwei weiteren Versuchen im Rundbecken wurde keine signifikante Richtungswahl gefunden (Abb. 3), wobei über Richtung und Stärke des Restfeldes keine Messungen vorlagen.

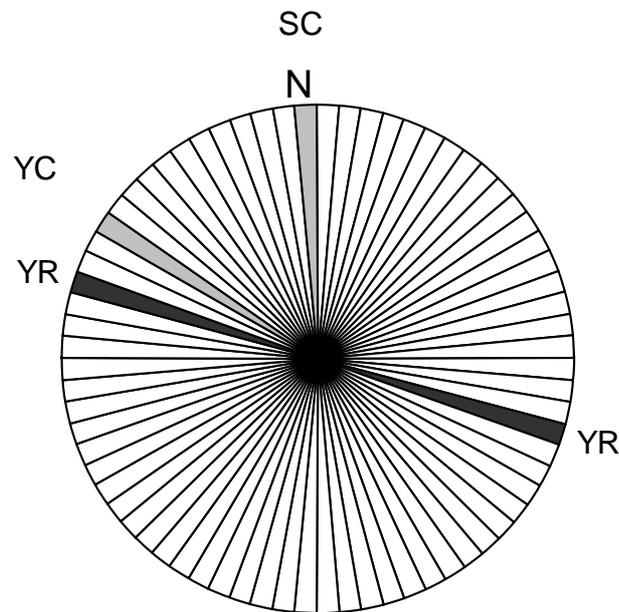


Abb. 3: Horizontales und vertikales Magnetfeld relativ homogen kompensiert, in einem Falle im Ringbecken (YR), in zwei weiteren Fällen im Rundbecken (SC; YC).

In Versuchsanordnung b), bei Veränderung der Inklination von 68° auf 45° , der Horizontalrichtung auf 90° und der Stärke auf 61% beobachteten wir eine Bevorzugung der experimentellen Richtung von NO und SW ($r=0,10$) (Abb. 4).

In Versuchsanordnung c), bei Veränderung der Inklination von 68 auf 30° und der Stärke auf 31% beobachteten wir eine Bevorzugung der experimentellen Richtung ONO und WSW ($r=0,10$) (Abb. 4).

Die beiden letztgenannten starken Magnetfeldveränderungen brachten also auch starke und signifikante Änderungen der Richtungspräferenzen (etwa 90°), wobei über die Wirkung der einzelnen Komponenten nichts ausgesagt werden kann. Neben Änderungen der Richtungspräferenz wurden Aktivitätsänderungen festgestellt.

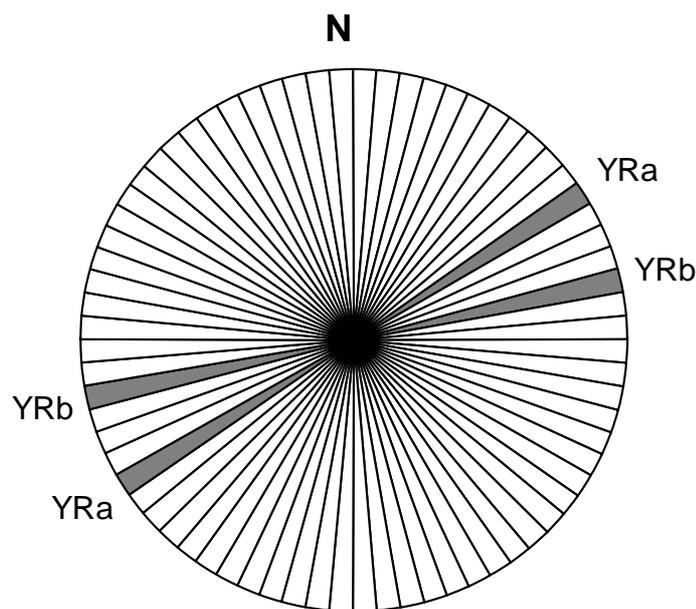


Abb. 4: Veränderung der verschiedenen Komponenten des Magnetfeldes (bis zu etwa 4% Homogenität. a) Inklination von 68° auf 45° , Richtung $+90^\circ$, Stärke auf 61% reduziert b) Inklination von 68° auf 30° , Stärke auf 31% reduziert.

Schlußfolgerungen

Aale auf der Laichwanderung orientieren sich in der Nordsee und weiter südlich auf dem ostatlantischen Schelf in einer nordwestlichen Richtung (N bis W). Dies ermöglicht ihnen z.B. das Hinausschwimmen aus der Nordsee durch den nördlichen Ausgang und auf dem atlantischen Schelf den Zugang zu ozeanischen Tiefenbereichen. Im Labor ohne jegliche andere Einflüsse (z.B. Licht, Strömung, Geruch) als die des Erdmagnetismus stellen sie sich im Bereich Hamburg-Helgoland ebenfalls nach Nordwesten (N bis W) ein. Dabei zeigten Wander- und stationäre Aale im Labor bei den verschiedenen Untersuchungsmethoden in vielen Fällen eine Tendenz gleichzeitig auch zur entgegengesetzten Richtungsbevorzugung (Bipolarität). Bei erdgeschichtlicher Betrachtungsweise ist dies erklärlich (Umkehr des Nordpols auf Süd). Wie sie den richtigen Pol erkennen, konnte nicht ermittelt werden.

Durch künstliche Änderung der magnetischen Feldlinien änderte sich die Richtungspräferenz der Aale. Wurde ihre Stärke reduziert, so reichte in einer Versuchsserie noch eine Reduktion auf $<4\%$ aus, um sich nach magnetisch NW zu orientieren. Starke Änderungen von Inklination und Stärke riefen, bezogen auf magnetisch Nord, eine starke Änderung der Richtungspräferenz hervor. Aufgabe zukünftiger Untersuchungen sollte es sein, die Minimaländerungen von Inklination und Stärke zu ermitteln, die noch Richtungs- und Aktivitätsänderungen nach der einen oder der anderen Seite hervorrufen. Auf der Grundlage dieser Daten ließe sich die Relevanz antropogener Einflüsse ermitteln.

Da sich hier eine so hohe Sensibilität des Aales gegenüber dem Magnetfeld gezeigt hat, ist zu vermuten, daß er ähnlich wie Meeresschildkröten (Lohmann & Lohmann 1996) seinen Standort bestimmen und danach richtungsmäßig navigieren kann. Die sensorische Verbindung des Magnetismus von den Rezeptoren zum Gehirn für Fische wurde kürzlich an Forellen nachgewiesen (Walker *et al.* 1997).

Welche anderen Richtungsfindungen kommen bei der Wanderung zum und vom Laichplatz in Frage?

In den Flüssen bis zum Eintritt in das Meer orientiert sich der Aal überwiegend negativ rheotaktisch. Er kann sich im Mündungsgebiet mit Gezeiteneinwirkung unter gewissen Bedingungen (Parker & McCleave 1997, Tesch 1994) auch durch den Ebbstrom transportieren lassen, was ebenfalls auf eine negativ rheotaktische Orientierungsweise hindeutet. Spätestens mit dem Eintritt in das Seewasser wird eine Magnetorientierung notwendig. In der Ostsee ist dies nicht ganz einfach nachzuweisen. Westerberg (1979) hat versucht zu zeigen, daß es dort eine positiv rheotaktische Orientierung der Wanderaale geben könnte. Mit ihm gemeinsam durchgeführte Aalverfolgungen mit gleichzeitigen Strömungsmessungen konnten hierzu jedoch keine Bestätigung liefern (TESCH *et al.* 1991). Rheotaktische Orientierung im offenen Meer ist auch schwer vorstellbar, da hierfür die Referenzpunkte fehlen. Nur aufgrund der Strömung des Salzwassers durch das erdmagnetische Feld erzeugte Potentiale könnten eine Strömungsorientierung ermöglichen.

Am Ausgang der Ostsee wäre eine Orientierung nach dem dort einströmenden höheren Salzgehalt zu erwägen, der die Aale durch seinen Geruch zu rheotaktischem Verhalten anregen könnte (Hain 1975). In der offenen Nordsee könnte die von den Flußmündungen erwähnte (Parker & McCleave 1997) transportierende Wirkung der Ebbe eine Rolle spielen (Arnold & Cook 1984). Der Wanderfortschritt bis zum nördlichen Ausgang der Nordsee (700 km in mindestens 6 Wochen) wäre allerdings, gemessen an der 6.000 km weiten Gesamtstrecke, sehr gering; mit der im Norden tiefer werdenden Nordsee nehmen auch die Geschwindigkeiten der Gezeitenströmungen stark ab und gehen im Atlantik praktisch auf null zurück; innerhalb von 5 Monaten aber müssen die Aale am Laichplatz angekommen sein.

Fast alle von mir auf dem Schelf verfolgten Aale zeigten einen strömungsbereinigten nördlichen bis westlichen Kompaßkurs. Vom Kontinentalabhang ab wechselte der Kompaßkurs auf eine westsüdwestliche Richtung (Tesch 1979, 1989), und die Aale sind damit auf

der Grundlage der bei ihnen beobachteten Schwimmgeschwindigkeit und einer Orientierung am Erdmagnetismus in der Lage, in 3 bis 4 Monaten zu der bekannten Laichzeit im März/April an den Laichplätzen einzutreffen. Für die Orientierung auf dieser Wanderung gibt es zum magnetisch bedingten Kompaßkurs keine Alternative. Licht, Sonne und Sterne entfallen, da große Tiefen (200 bis 600m) bevorzugt werden.

Orientierung entlang von Küstenlinien, wie es in der Nordsee und mit mehr Wahrscheinlichkeit in der Ostsee in Frage käme, entfällt im Atlantik. Orientierung mit dem Geruchssinn nach Gradienten und entlang von geruchsspezifischen Strömungen, wie sie vor 50 Jahren für den Lachs im kleinräumigen Bereich der Bäche nachgewiesen wurde, erscheint unmöglich. Das komplizierte Strömungssystem des Nordatlantik verhindert die weiträumige Orientierung nach Geruchsstoffen. Außerdem mindert sich der Geruchssinn bei der weiträumigen Laichwanderung, da während der Metamorphose zum Laichaal Zellreduktionen im Riechepithel stattfinden (Pankhorst & Lythgoe 1983). Der Golfstrom selbst kommt auch für den Weg zum Kontinent für Wanderung und Transport der europäischen Larven nur in sehr geringem Maße in Frage (Kleckner & McCleave 1982). Zur Orientierung entlang von Küstenlinien ist noch zu bemerken, daß sie nur auf kürzeren Strecken sinnvoll erscheint, wie es das Beispiel von Aalverfolgungen an der südschwedischen Küste zeigt (Tesch 1979, Westerberg 1979, zusammengestellt in Abb. 3.32A von Tesch 1999). Zum Verlassen der Küstenlinien und beim nachfolgenden Durchschwimmen der Ostsee auf z.B. 100 km langen Kompaßkursen erscheint auch in der Ostsee die Magnetorientierung am wahrscheinlichsten.

Literatur

- Arnold, G.P. & P.K. Cook (1984): Fish migration by selective tidal stream transport: first results with a computer simulation model for the European Continental shelf. In: Mechanisms of migration in fishes, (Ed. J.D. McCleave *et al.*), Plenum Pr. New York, 227-261.
- Deelder, C.L. & F.-W. Tesch (1970): Heimfindevermögen von Aalen (*Anguilla anguilla*), die über große Entfernungen verpflanzt wurden. Mar. Biol. Berlin, 6: 81-92.
- Lohmann, K.J. & C.M.F. Lohmann (1996): Orientation and open-sea navigation in sea turtles. J. experim. Biol. 199: 73-81.
- Kleckner, R.C. & J.D. McCleave (1982): Entry of migrating American eel leptocephali into the Gulf Stream system. Helgoländer wiss. Meeresunters. 35: 329-339.
- Hain, J.H.W. (1975): The behaviour of migratory eels, *Anguilla rostrata*, in response to current, salinity and lunar period. Helgoländer wiss. Meeresunters. 27: 211-233.
- Pankhurst, N.W. & J.N. Lythgoe (1983): Changes in vision and olfaction during sexual maturation in the European eel *Anguilla anguilla* (L.). J. Fish. Biol. 23: 229-240.

- Parker, S.J. & J.D. McCleave (1997): Selective tidal stream transport by American eels during homing movements and estuarine migration. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 77: 707-725.
- Tesch, F.-W. (1967): Homing of eels (*Anguilla anguilla*) in the southern North Sea. *Mar. Biol. Berlin* 1: 1-9.
- Tesch, F.-W. (1970): Heimfindevermögen von Aalen *Anguilla anguilla* nach Beeinträchtigung des Geruchssinnes, nach Adaptation oder nach Verpflanzungen in ein Nachbar-Ästuar. *Mar. Biol. Berlin* 6: 148-157.
- Tesch, F.-W. (1974a): Speed and direction of silver and yellow eels, *Anguilla anguilla*, released and tracked in the open North Sea. *Ber. dt. wiss. Komn. Meeresforsch.* 23: 181-197.
- Tesch, F.-W. (1974b): Influence of geomagnetism and salinity on the directional choice of eels. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 26: 382-395.
- Tesch, F.-W. (1975): Migratory behaviour of displaced homing yellow eels (*Anguilla anguilla*) in the North Sea. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 27: 190-198.
- Tesch, F.-W. (1978): Telemetric observations on the spawning migration of the eel *Anguilla anguilla* west of the European continental shelf. *Env. Biol. Fish.* 3: 203-209.
- Tesch, F.-W. (1979): Tracking of silver eels (*Anguilla anguilla* L.) in different shelf areas of the Northeast Atlantic. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer* 174: 104-114.
- Tesch, F.-W. (1989): Changes in swimming depth and direction of silver eels (*Anguilla anguilla* L.) from the continental shelf to the deep sea. *Aquat. Living Resour.* 2: 9-20.
- Tesch, F.-W. (1994): Verfolgung von Blankaalen in Weser und Elbe. *Fischökologie* 7: 47-59.
- Tesch, F.-W. (1999): *Der Aal*. Parey Buchverlag Berlin, 3. Aufl..
- Tesch, F.-W. & A. Lelek (1973a): Directional behaviour of transplanted stationary and migratory forms of the eel, (*Anguilla anguilla*) in a circular tank. *Neth. J. Sea Res.* 7: 46-52.
- Tesch, F.-W. & A. Lelek (1973b): An evaluation of the directional choice in the eel, in captivity. *Arch. Fischwiss.* 24: 237-251.
- Tesch, F.-W., Wendt, T. & L. Karlsson (1992): Influence of geomagnetism on the activity and orientation of the eel, *Anguilla anguilla* (L.), as evident from laboratory experiments. *Ecol. Freshw. Fish* 1: 52-60.
- Tesch, F.-W., Westerberg, H. & L. Karlsson (1991): Tracking studies on migrating silver eels in the Central Baltic. *Meeresforsch* 35: 193-196.
- Walker, M.M., Diebel, C.E., Haugh, C.V., Pankhurst, P.M., Montgomery, J.C. & C. Green (1997): Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 390: 371-376.
- Westerberg, H. (1979): Counter current orientation in the migration of the European eel. *Rapp. P.-v. Réunion. Cons. Int. Explor. Mer* 174: 134-143.

Effect of HVDC cables on eel orientation

Håkan Westerberg

National Board Fisheries, Institute for Coastal Research, Nya Varvet 31, SE-426 71 Västra Frölunda, Sweden, hakan.westerberg@fiskeriverket.se

Introduction

The High Voltage Direct Current (HVDC) technology for underwater power transmission was developed by the Swedish company ASEA during the 40-ies and 50-ies. The basic principle is to send DC current in a single conductor cable and to pass the return current through the water between electrodes at each end of the cable. As part of this development a study of the chemical and electromagnetic effects on biota was carried out in 1949 at a test installation transmitting at 400 V and 250 A (Högström & Koczy 1971). The main focus was on the effects close to the electrodes, and fish as well as benthic and pelagic invertebrates were studied. The conclusion was that both electric and chemical effects were confined to a small distance from the electrode, and that those could be avoided by good ventilation and suitable protection of the electrode. Several HVDC cables were installed around Sweden (to Gotland 1954 – replaced by two new cables 1983 and 1987, Sweden-Denmark 1965 and 1989, Sweden-Finland 1989) but no further investigations were made of possible marine effects. In connection to the BALTIC Cable project between Sweden and Germany, and the still unfinished SWEPOL LINK cable to Poland, questions about the static magnetic field around the pole cable and the possible production of toxic chlorinated organic substances have been raised and investigations have been carried out as part of the environmental impact assessment.

This review will summarise the results from a study of the effect of a HVDC cable on fish migration. The telemetry part of this will appear in a more detailed version (Westerberg 1999). A comprehensive study of the production of halocarbons at HVDC electrodes (Bergqvist 1997) will also be discussed.

Migration of adult eels

The ability to use the geomagnetic field for orientation has been demonstrated in several animal species, especially among birds but also in fish (Wiltschko & Wiltschko 1995). The

phenomenon is a well established fact, but the understanding of the underlying physiological mechanisms is defective. In teleosts the European eel (*Anguilla anguilla* L) is one of the fishes that have been studied in laboratory experiments. Those indicate a sensitivity both to the direction and the inclination of fields that are of the same strength as the geomagnetic field (Karlsson 1985; Tesch *et al.* 1992).

A two year telemetry study has been made at the BALTIC Cable pole-cable at the Swedish southcoast. Migrating, silver eels were tagged with ultrasonic transmitters and tracked from a boat during their passage of the cable. Position was taken with 10-20 min intervals using dGPS. The eels were released 2-3 km east of the cable and 2-4 km from the shore, where the water depth was > 10 m. All tracking took place during the night in the end of October or early November. Altogether 25 female silver eels were tracked and of those 60 % were observed while passing the cable. Four tracks were made without current in the cable, otherwise the current was 1000-1300 A, producing a 5 μ T magnetic field at a distance of 60 m. To increase the accuracy of the tracking a few experiments were made with an array of hydrophones with radio links (Vemco VRAP system, O'Dor *et al.* 1998), giving a resolution of approximately 10 m, compared to 50 m with the active tracking.

Without any assumptions about the nature of a possible influence of the cable on the fish it can be concluded that the eels do cross the position of the cable, with the same probability as if it were absent. In several cases the observed trajectory veered during passage of the cable, qualitatively in the way which would be expected if the eel was continuously keeping a constant compass course. The spatial resolution was in most cases too low to draw any certain conclusions however. The best example is the single crossing which was obtained with the hydrophone array (Fig. 1). If the observations are interpreted as a magnetic orientation, then it seems that the eels use a mechanism where the magnetic field inclination is kept constant, rather than the more familiar horizontal compass mechanism used in human navigation.

Theoretical model

The telemetry technique is important for investigating if there is an effect of the magnetic disturbance around the cable on fish migration, and if so what kind of orientation mechanism is involved. Once the principles are clarified telemetry is too costly and time-consuming to be of help in making quantitative assessments of the effects on the population level or in the fishery. To do this a theoretical model where a large number of trajectories can be simulated is a better alternative. Such a model is also necessary for interpreting the result of telemetry studies efficiently.

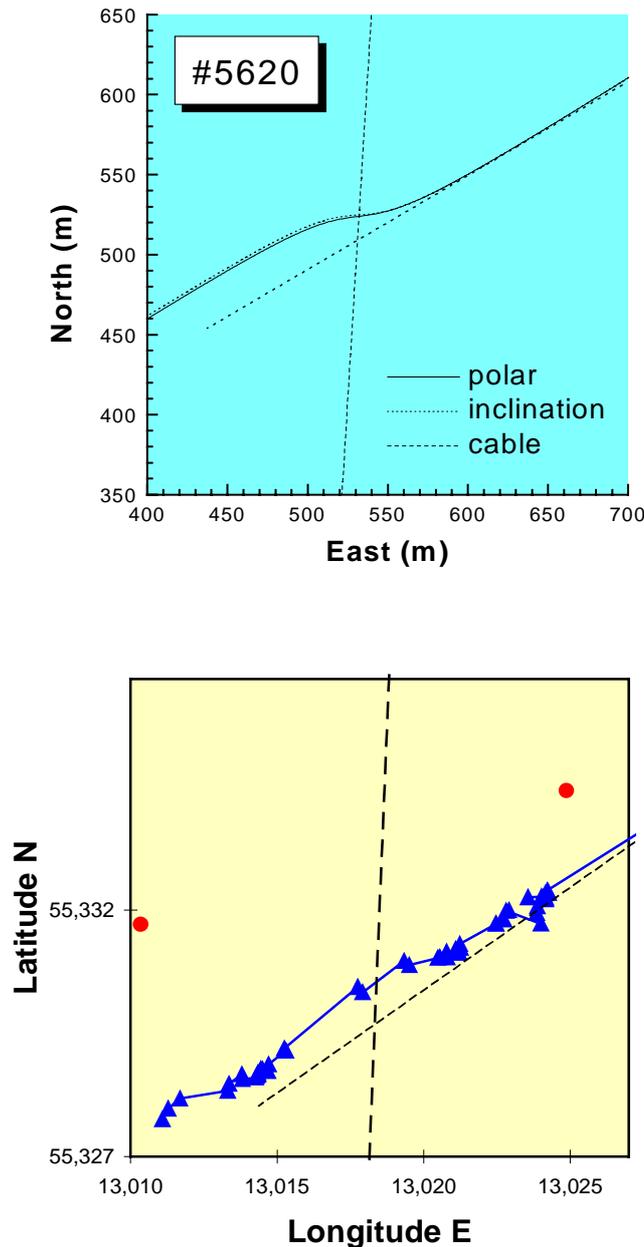


Fig. 1: Theoretically calculated trajectory assuming a continuous compass orientation (upper panel) compared to observed trajectory of eel passing the cable (below), both at approximately the same scale. The dashed line shows the cable.

The magnetic field around a cable depends on the distance and current in the cable. Usually the case of an infinite straight conductor is used as an approximation, but the topography of the bottom and known turning points of the cable can easily be incorporated in calculation of the local field. This is especially important to get the correct value for the inclination of the combined geomagnetic and cable fields. Two principles for how animals use the geomag-

netic information during orientation have been demonstrated; a polar compass where the horizontal angle between the body axis and magnetic north is kept constant, and an inclination compass, where the inclination angle of the projection of the magnetic field on the vertical plane of the animal is kept constant. The latter is common in birds and have been demonstrated in some fish species. Both alternatives have been implemented in the model developed for the present study. Fig. 2 gives examples of the deviations that will result for different choice of compass mechanism.

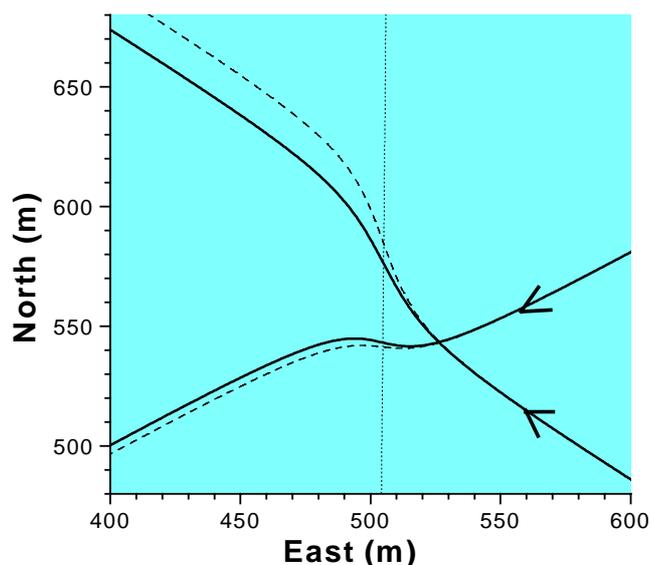


Fig. 2: Examples of model results with different initial swimming direction but otherwise identical conditions. Dashed line is for orientation with an inclination compass and the solid trajectory with a polar compass. The dotted line shows the cable (15 m depth, 1000 A, no water current).

If the water is stagnant then the trajectory of a fish passing the cable will be determined by the initial heading and depth of the fish only. If the water is moving, which in general will be the case, the swimming speed of the fish and the current speed and direction at the depth of the fish must be added to the model. A slow-moving fish swimming with a strong current will be swept past the cable without much effect, but a fish which heads into the current will spend more time in the region where the swimming direction is influenced by the cable, and the total deviation will be large.

In a practical application the model is set up with the actual topography and route of the cable. A set of random initial values of x, y, z co-ordinates, swimming speeds, headings, current speeds and directions are generated in a way which will approximate the migration behaviour of the fish and the hydrographic conditions in the area. A simulation is run with this set both with and without a cable, and the difference in distribution of the "fishes" along the

shore or in some control area past the cable is determined. Such Monte-Carlo simulations will be used to assess possible effects in the fishery quantitatively and will be useful to identify potential impacts on reproduction.

Elver migration

The telemetry study and model aims at the active and highly directional migration of adult fish. The spreading of juveniles is more random and often dominated by advection, and in this case a local disturbance of the geomagnetic field will be less problematic. The immigration of small eels – elvers – to the Baltic may be an exception however. This migration seems to take place in a narrow, nearshore zone (Westerberg 1998). It is very slow, it takes the eels several years to spread from the Sound to the Central Baltic, and the eels spend most of their time at the bottom. The implication is that the migration pressure is weak and that the elvers will be in very close contact to the cable, experiencing a high and rapidly varying magnetic field, during passage. If there is some avoidance to such conditions the cable could block the migration, which should have large consequences for the recruitment in the Baltic area.

To study this possibility a laboratory experiment was made using elvers that were caught in, and adapted to, brackish water. The test was made in a maze with three arms protruding symmetrically from a central chamber. The arms were straight channels, 50 cm long and 15 cm wide with a water depth of 6 cm. A gate could be lifted and dropped remotely at the entrance to each arm. Mounted below the bottom of the arms were coils to produce a vertical magnetic field inside the entrance. The whole maze was rotated horizontally between test runs to avoid bias due to external factors. All tests were made in darkness and the protocol was that 10 elvers were put into the central chamber with the gates closed and one, randomly chosen, coil was turned on. After an adaptation period the gates were opened and after 15 min they were closed again and the number of elvers in each compartment was counted. Half the tests were controls, where one arm was assigned as the experimental arm but no current was passed through the coil. Two runs with 200 repetitions were made, one with a large coil, with a fairly homogenous vertical field across the arm, and one with a small coil which created a strong magnetic field gradient. In both cases the maximum field strength was more than 50 times the natural geomagnetic field.

The result was that the elvers choose to enter a particular arm with the artificial magnetic switched on with a slightly lower frequency than when it was turned off, and this was the case for all arms. Statistically the differences are far from significant, but all the difference have the same sign in both sets of experiments. If we look at the frequency of cases were no

eel entered the arm with the magnetic field this was more than double that which was found in the control experiments, and this difference is statistically significant (Fig. 3). A preliminary interpretation of the experiment is that the elvers to some degree hesitate from entering the anomalous field, but that when this occurs they tend to remain trapped in this arm. This leads to a relatively higher proportion of cases with extreme number of elvers, both high and low, and on the average about the same fraction is found in all the arms.

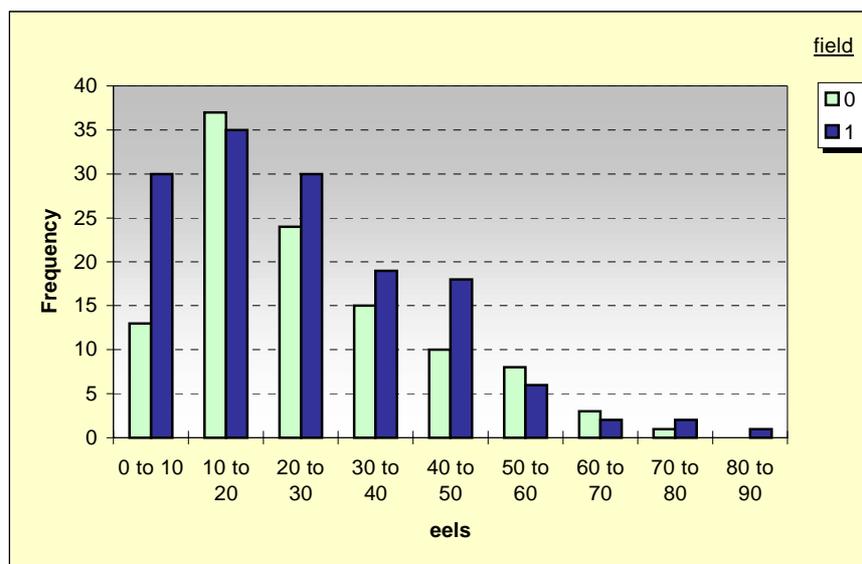


Fig. 3: The probability of finding different fractions of the total number of elvers in an arm without artificial magnetic field (light bars, field 0) and with the coil activated (dark bars, field 1).

Halocarbons

The study of halocarbon production used a special technique – a semipermeable membrane device or SPMD (Huckins *et al.* 1990). SPMD's were placed close to the electrode net at the anode stations of the Fennoscan and Baltic Cable. They were left in place during 3 weeks before analysis. During deployment and recovery divers took water samples at the electrode site for analysis of active halogens. The SPMD measures the production of lipophilic halogenated substances as PCB's, and mimic the uptake in organisms.

The result showed that the concentration of active halogens (hypochlorine, chloramine etc) were below 0.05 mg/L even close to the electrode. No excess production of chlorinated halocarbons could be seen by the SPMD, but an elevation of the levels of bromated organic substances of from 0 to 40 times the background was found. Those substances are not identified, but the concentrations are low compared to literature values of toxicity of bromated substances in general.

Conclusions

Some effects of the magnetic disturbance of HVDC cables on eel migration seems likely, but the consequences seems to be small. There is no indication that a cable constitutes a permanent obstacle for migration, neither for the adult eel nor for elvers. A compass orientation mechanism is indicated for the adults, and this can have local effects for the eel fishery adjacent to the cable. The combination of telemetry studies and Monte Carlo simulation in a theoretical model seems an efficient way to evaluate such effects.

The chemical measurements at the anodes gave no indications of excess production of harmful toxic chlorocarbons. A measurable elevation of bromated substances was found, but the concentrations close to the anode are low.

References

- Bergqvist, P.-A. (1997): Projekt för att studera närvaron av halogenerade ämnen i anslutning till anodjordning av undervattenskabel (högspänning). Slutrapport 9 maj 1997.
- Huckins, J., Tubergen, M. & G. Manuweera (1990): Semipermeable membrane devices containing model lipid: A new approach to monitoring the bioavailability of lipophilic contaminants and estimating the bioconcentration potential. *Chemosphere* 20: 533-552.
- Höglund, H. & F. Koczy (1971): Elströmsförsöken i Västervik. Medd. Havsfiskelab, Lysekil. No 105.
- Karlsson, L. (1985): Behavioural responses of European silver eels (*Anguilla anguilla*) to the geomagnetic field. *Helgol Meeresunters* 39: 71-81.
- O'Dor, R., Andrade, Y., Webber, D.M., Sauer, W.H., Roberts, M.J., Smale, M.J. & F.M. Voegeli (1998): Applications and performance of Radio-Acoustic Positioning and Telemetry (RAPT) systems. *Hydrobiologia* 371/372: 1-8.
- Tesch, F.-W., Wendt, T. & L. Karlsson (1992): Influence of geomagnetism on the activity and orientation of eel, *Anguilla anguilla*, as evident from laboratory experiment. *Ecol Freshwater Fish* 1: 52-60.
- Westerberg, H. (1998): Oceanographic aspects of the recruitment of eels to the Baltic sea. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 349: 177-185.
- Westerberg, H. & M.-L. Begout-Anras (1999): Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field. Proceedings 3:rd Conference on Fish Telemetry in Europe, 20-25 June 1999, Norwich.
- Wiltschko, R. & W. Wiltschko (1995): Magnetic orientation in animals. Berlin, Springer Verlag.

Kabelbauarten sowie Verlegungsmethoden und ihre Auswirkungen auf magnetische und elektrische Felder im Meer

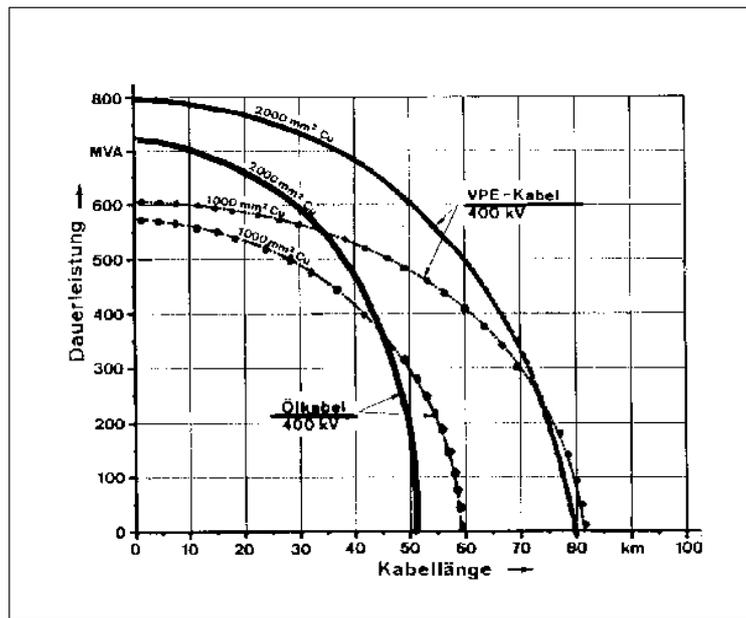
Klaus Kramer

Hamburgische Electricitäts-Werke AG / EuroKabel AS, Überseering 12, D-22297 Hamburg, Germany, klaus.kramer@hew.de

Grenzen der Übertragungsfähigkeit von Drehstromkabeln

Nach der Entstehung von ersten kleinen Stromnetzen mit Gleichspannungstechnik wurden für größere Leistungen und Entfernungen sehr schnell die Vorteile von Wechsel- bzw. Drehstromnetzen durch die einfache Transformierbarkeit auf hohe Spannungen zum verlustarmen Transport elektrischer Energie über größere Entfernungen genutzt. In Europa hat sich in der Stromversorgung eine Frequenz von 50 Hertz etabliert mit einer höchsten Spannungsebene von 420 Kilovolt. Der Leistungstransport findet fast ausschließlich über Freileitungen statt. Kabel eignen sich für größere Entfernungen nicht, da sie bauartbedingt eine relativ große Kapazität haben, die direkt der Länge proportional ist. Die Kapazität wird mit der Frequenz von 50 Hertz ständig umgeladen. Dieser Ladestrom erreicht von einer bestimmten Länge an an der Einspeisestelle den thermisch maximal übertragbaren Nennstrom des Kabels. Die beabsichtigte Übertragung von Wirkleistung ist dann nicht mehr möglich. 400-Kilovolt-Kabel erreichen diese Grenze bei ca. 50 Kilometern (Abb. 1). Küsten stellen daher auch die natürliche Grenze von Drehstromnetzen dar. Um diese zu überwinden, kann daher nur Gleichstrom eingesetzt werden. Da hier die Kapazität nur beim Einschalten der Spannung auf-, aber nicht ständig umgeladen wird, begrenzen hier nur die Wirkverluste die mögliche Übertragungslänge. Diese sind durch Querschnittsvergrößerungen zu beeinflussen. Bei Drehstromkabeln vergrößert sich mit dem Querschnitt auch die Kapazität, so daß diese Maßnahme sogar zu einer Verringerung der Grenzlänge führen kann (Prof. Dr.-Ing. Kuhnert: Gutachten Nr. 990618 Gleichstromkabel zwischen Deutschland und Norwegen, ausgefertigt am 07.12.1999). Die in Abb. 2 gezeigten europäischen Seekabelverbindungen basieren daher überwiegend auf der Gleichstromtechnologie.

Abbildung 1: Übertragbare Leistung von Hochspannungskabeln in Funktion der Kabellänge



(Quelle: Prof.Dr.-Ing Ekkehard Kuhnert, Kabelseminar des Instituts für Elektrische Energieversorgung an der Universität Hannover)

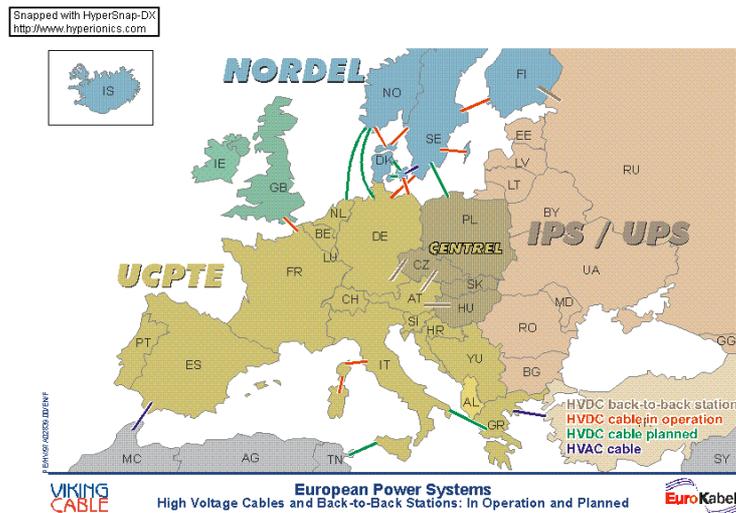


Abb. 2: Seekabelverbindungen in Europa.

Bauarten von Gleichstromverbindungen

Um einen Strom fließen zu lassen, bedarf es einer Spannungsquelle und eines geschlossenen Stromkreises. Benötigt wird dazu ein isolierter, spannungsführender Leiter und ein Rückleiter. Da der Rückleiter nicht isoliert sein muß, eignet sich jedes leitende Material. Seewasser

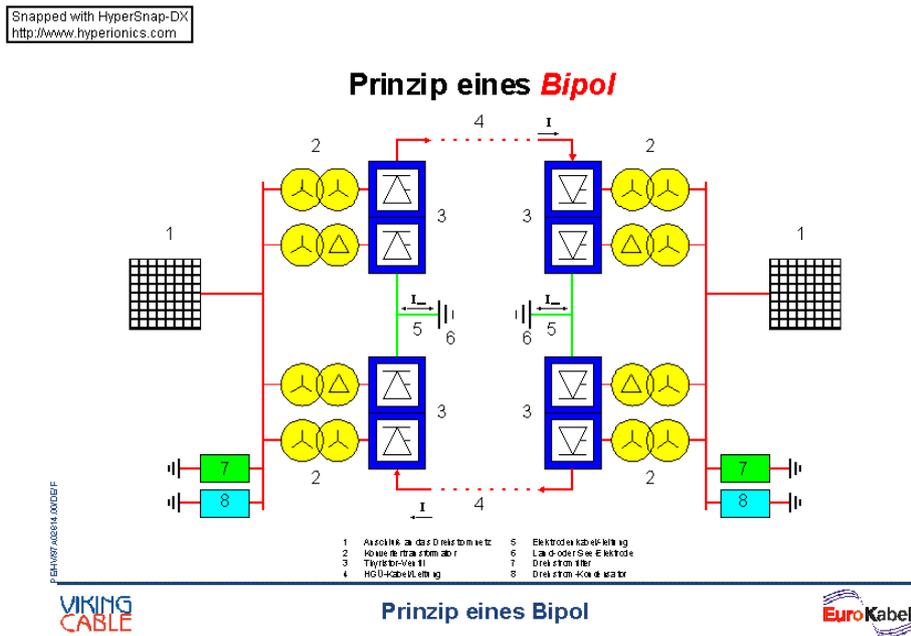


Abb. 4: Prinzip eines Bipols.

Kabelbauarten

Für Gleichstrom-Seekabelverbindungen werden überwiegend masseimprägnierte Kabel eingesetzt. Bereits die erste Seekabelverbindung von der Insel Gotland zum schwedischen Festland wurde 1954 mit einer Leistung von 20 Megawatt Leistung bei 100 Kilovolt Spannung mit masseimprägnierten Kabeln gebaut. Auch die bisher längste Seekabelverbindung „Baltic Cable“ zwischen Schweden und Deutschland mit 450 Kilovolt Spannung und 600 Megawatt Leistung zeigt das Entwicklungspotential dieser Technologie. Leistungen je Kabel von 800 Megawatt sind inzwischen Stand der Technik.

Abb. 5 zeigt den Aufbau eines masseimprägnierten Kabels. Der Leiter, meist aus Kupfer, seltener aus Aluminium ist von der Ölpapierisolation umgeben. Die nachfolgenden Schichten dienen überwiegend den mechanischen Eigenschaften wie Biegeverhalten, Seewasserdichtheit bis zur Armierung, die die Zugkräfte beim Legen aufnimmt, aber auch einen begrenzten mechanischen Schutz gegen Beschädigungen darstellt. Die Spannungsverteilung in der Ölpapierisolation hängt von der Widerstandsverteilung in der Isolation ab (Ohmsche Steuerung). Wegen der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des im Papier gebundenen Isolieröls kann die Überschreitung der Auslegungstemperatur des Leiters von ca. 50 °C zu Ölwanderungen mit der Ausbildung von Trockenzonen führen. Die dadurch geänderte Spannungsverteilung führt früher oder später zum elektrischen Durchschlag. Die Kenntnis und Einhaltung von Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Bodenwärmeleitfähigkeit und

gegenseitige Beeinflussung mehrerer Kabel sind wichtige Kriterien für einen ungestörten Betrieb. Die Technologie der masseimprägnierten Kabel setzt erhebliche Fertigungserfahrung voraus und wird von relativ wenigen Anbietern beherrscht. Entwicklungen mit Kunststoffisolierungen und Ölkabeln werden weiter betrieben u.a. mit dem Ziel kostengünstigere Bauweisen zu erreichen.

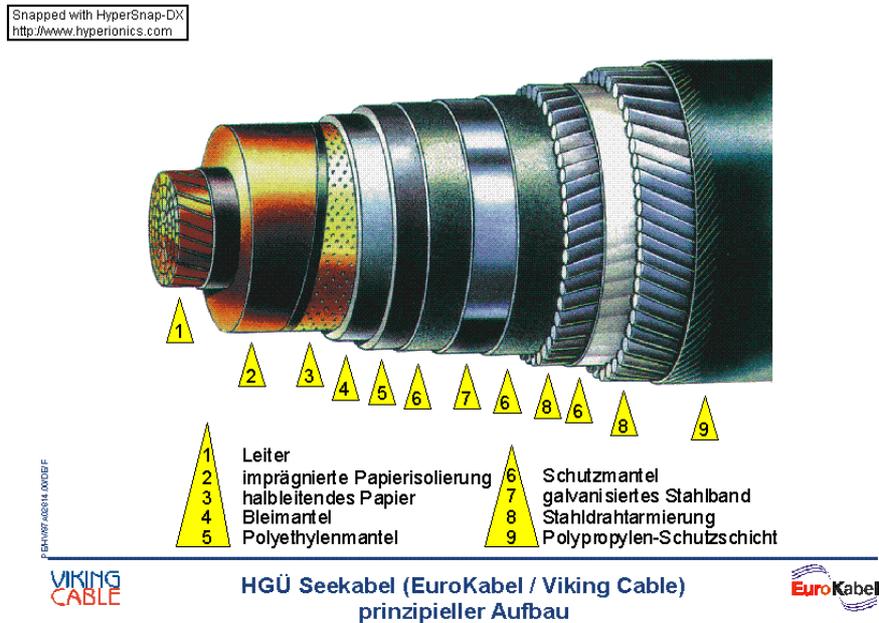


Abb. 5: Aufbau eines HGÜ-Seekabels.

Snapped with HyperSnap-DX
http://www.hyperionics.com



Abb. 6: Aufbau eines „Flate Type“ Kabels.

Eine Bauart, die auf Fragestellung der Magnetfelder Einfluß hat, ist von einem dänischen Hersteller entwickelt worden (Abb. 6). Es handelt sich hierbei um die Kombination zweier ölpapierisolierter Kabel in einer gemeinsamen Abdichtung und Armierung. In dem Zwickel zwischen Isolation und äußerer Umhüllung befindet sich freies Isolieröl. Die Bauart wird ausgehend von der Form als „Flat-Type“ bezeichnet. Ungünstig für den Legevorgang ist die nicht rotationssymmetrische Form mit deutlich unterschiedlich zulässigen Biegeradien über die beiden Achsen und das freie Öl im Zwickel. Im Gegensatz zu masseimprägnierten Kabeln verteilt sich der von außen auf den Kabelmantel wirkende Wasserdruck nicht mehr radial-symmetrisch auf die Isolierung. Dies ist bei geringen Wassertiefen beherrschbar. Deshalb konnte das Kabel in einer kurzen Seekabelverbindung durch das flache Wasser der Ostsee zwischen Deutschland und Dänemark (Kontek-Verbindung) erfolgreich eingesetzt werden. Bei größeren Wassertiefen wie im norwegischen Graben (400-500 Meter Wassertiefe), muß ein Isolieröl eingesetzt werden, dessen Dichte dem Seewasser entspricht. Ein solches Öl ist zwar gefunden worden, die Versuche mit Kabelmustern konnten bisher jedoch noch nicht erfolgreich abgeschlossen werden.

Magnetfelder

Jeder stromdurchflossene Leiter wird von einem Magnetfeld umgeben, das dem Strom direkt und dem Abstand umgekehrt proportional ist. In einem Drehstromsystem heben sich die Felder praktisch auf, weil der Abstand zu den Leitern groß ist im Vergleich zu den Abständen der Einzelleiter. Bei Gleichstromverbindungen ist der Leiter von einem Gleichfeld umgeben. Dieses Gleichfeld überlagert sich vektoriell dem Gleichfeld der Erde (Abb. 7). Dies führt zu größeren Werten als sie natürlich vorhanden sind.

Fließt in zwei Kabeln Strom in entgegengesetzter Richtung heben sich die zusätzlichen Felder teilweise auf (Abb. 8). Die aufhebende Wirkung ist umso größer, je dichter sich beide Kabel annähern. Eine vollständige Kompensation wäre mit einer konzentrischen Anordnung für kleinere Leistungen denkbar.

Auf mögliche biologische Wirkungen gehen Kullnick und Marhold ein (Stephan Marhold, Uwe Kullnick, Universität Frankfurt/Main: Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand). Aus der vektoriellen Addition kann das Gesamtfeld neben der Betragsänderung auch eine Drehung gegenüber dem Erdfeld erfahren. Dies kann zumindest im Nahbereich eines Kabels Einfluß auf Genauigkeit der Kompaßanzeige haben (Abb. 9).

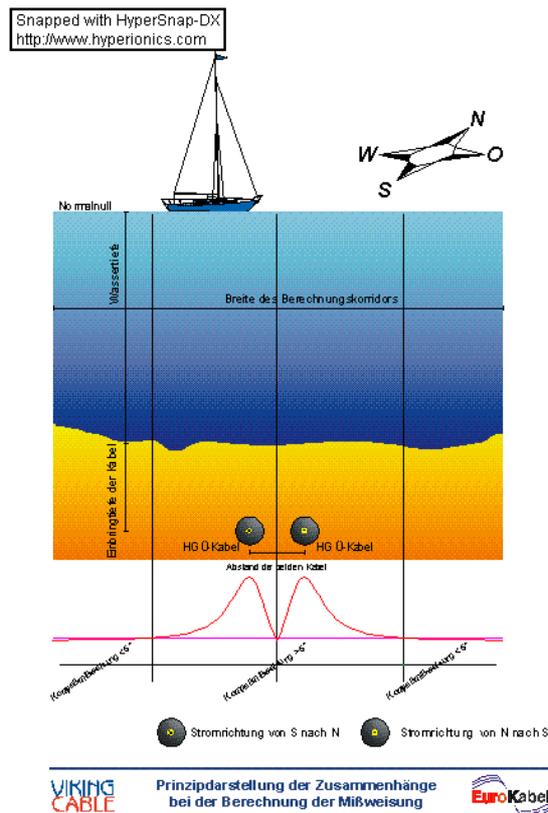
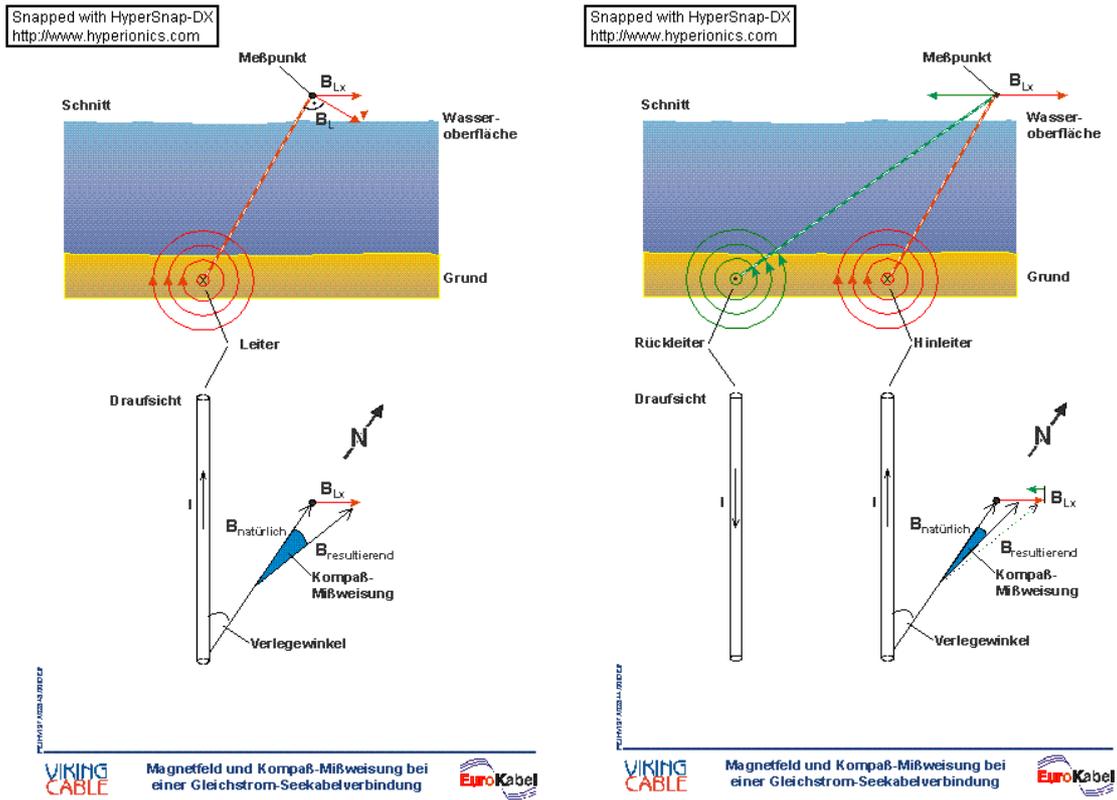


Abb. 7, 8 und 9: Kompaßmißweisung an HGÜ-Kabeln.

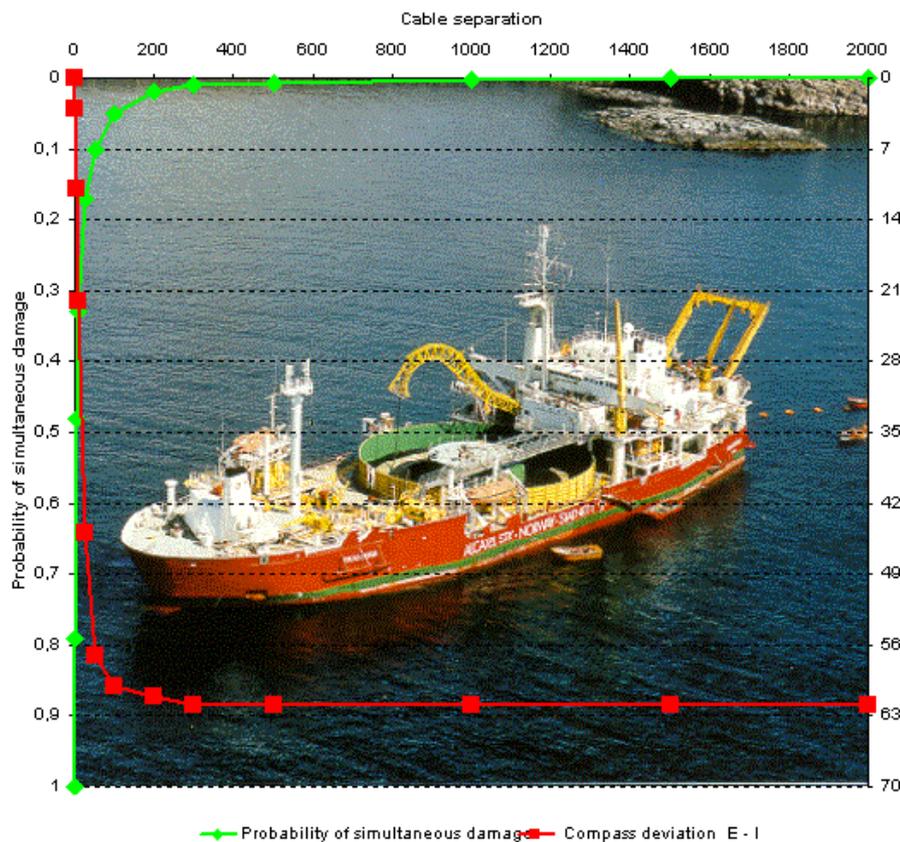


Abb. 10: Abhängigkeit der Kompaßmißweisung vom Abstand zwischen den Kabeln.

Geringe zulässige Mißweisungen führen zur Reduzierung der Abstände zwischen Kabeln oder schließen monopolare Lösungen mit nur einem Leiter aus. In flachen Gewässern bringen erst relativ geringe Abstände eine deutliche Reduzierung des künstlichen Zusatzfeldes wie der Einfluß auf die Kompaßmißweisung über den Abstand zeigt (Abb. 10).

Kriterien für Abstandswahl

Der Hintergrund von Abb. 10 zeigt ein typisches Legeschiff. Erkennbar ist der große Drehtisch, auf dem ca. 100 Kilometer Kabel für eine 600-Megawattverbindung aufgetrommelt werden können. Mit einem solchem Schiff wird jeweils ein Kabel gelegt. Die Positionierungsgenauigkeit erlaubt es ohne weitere Einschränkungen, ein zweites Kabel in einem Abstand ≥ 10 Meter zu legen. Ohne Vorliegen weiterer Anforderungen wird man daher diesen Mindestabstand nicht unterschreiten. Bei diesem Abstand ist auch die gegenseitige thermische Beeinflussung auf die Kabelauslegung zu vernachlässigen. Die Legegeschwindigkeit und die zulässigen Wetterbedingungen entsprechen den Auslegungswerten des Legeschiffs.

Die Kabel werden zum Schutz vor Beschädigung durch Fischerei mit einer Mindestüberdeckung von 1 Meter in sandigem Untergrund eingespült. Ein Schutz gegen Notankerun-

gen durch Erhöhung der Überdeckung ist wirtschaftlich nicht vertretbar. Es wird daher angestrebt, solche Schäden, wenn man sie schon nicht vermeiden kann, auf ein Kabel zu beschränken. Statistische Untersuchungen zeigen, daß das Risiko zeitgleicher Beschädigungen schnell mit dem Abstand abnimmt. Wenn es bei nebeneinanderliegenden Kabeln noch 100% ist, ist es bei 10 Meter Abstand bereits 33% und im Kilometerbereich annähernd 0% (Abb. 10). Bei einem Bipol mit Notbetriebs Elektroden erreicht man damit die Möglichkeit des Weiterbetriebs mit halber Nennleistung. Dies trägt zur Verbesserung der Verfügbarkeit der Verbindung bei. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die maximal zulässige Leistung, deren Ausfall die angeschlossenen Drehstromnetze noch verkraften. Trotz eines Netzausbauprogramms ist in Norwegen der Ausfall von Leistungen oberhalb von 800 Megawatt kritisch für die Stabilität des Drehstromnetzes. Bei einem Bipol mit einer Nennleistung von 1200 Megawatt ist daher der Bau von Elektroden für den monopolaren Notbetrieb zwingend gefordert worden und die weitestgehende Vermeidung der gleichzeitigen Beschädigung beider Kabel. Auf den Netzknoten Brunsbüttel trifft diese Einschränkung nicht zu.

Bei Anwendung nur dieser Prinzipien läßt sich eine Minimierung der künstlichen Magnetfelder nur eingeschränkt durchführen. Sollten strenge Anforderungen an Kompaßmißweisung eingehalten oder Befürchtungen nicht auszuschließender biologischer Wirkungen auf Teilstrecken ausgeräumt werden, können die Kabel nur dichter zusammengelegt werden (close laying).

Eine solche Legung kann bezüglich des magnetischen Feldes einem Flat-Type Kabel entsprechen (Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Kuhnert: Gutachten Nr. 990618 Gleichstromkabel zwischen Deutschland und Norwegen, ausgefertigt am 07.12.1999). Wenn ein solches Zusammenlegen abweichend von bisherigen Projekten notwendig ist, wird man versuchen, sich an bewährte Legeverfahren anzulehnen, um Risiken zu begrenzen.

Ein dichtes Zusammenlegen läßt sich bei nur einem Drehtisch auf dem Legeschiff grundsätzlich dadurch erreichen, daß man die beiden Kabel bereits in der Fabrik bündelt und dann das Bündel legt. Das Verfahren wird eingesetzt z.B. bei der Mitverlegung von zusätzlichen Telekommunikationskabeln. Was mit diesen Zusatzkabeln unproblematisch ist, führt bei zwei Leistungskabeln für je 600 Megawatt zu ähnlichen Problemen wie sie beim „Flat-Type“ Kabel beschrieben sind. Auch die Montage der Muffen auf See wird erheblich erschwert. Auch wenn das nachfolgend beschriebene Verfahren bisher nicht eingesetzt worden ist, wird das Legen der Kabel nacheinander als im Vergleich risikoärmer eingestuft. Dabei wird das erste Kabel konventionell gelegt und mit einer Teilüberdeckung eingespült, um nicht ungeschützt gegen Beschädigung durch Fischerei zu liegen. In einem zweiten Schritt wird das nächste Kabel über das erste gelegt und beide gemeinsam eingespült. Wegen der hohen Anforderungen an die Positionierung beim Legen des zweiten Kabels ist der Legevorgang deutlich langsamer und damit auch deutlich teurer als beim ersten Kabel. Auch die Abhängig

keit vom Wetter mit entsprechenden Wartezeiten auch im Sommer nimmt zu. Bei den im Winter vorherrschenden Wetterbedingungen ist das Verfahren nicht anwendbar. Für die geplante Verbindung Deutschland – Norwegen hat die EU-Ausschreibung noch nicht stattgefunden. Nach Festlegung der Anforderungen sind hier weiter optimierte Verfahren zu erwarten.

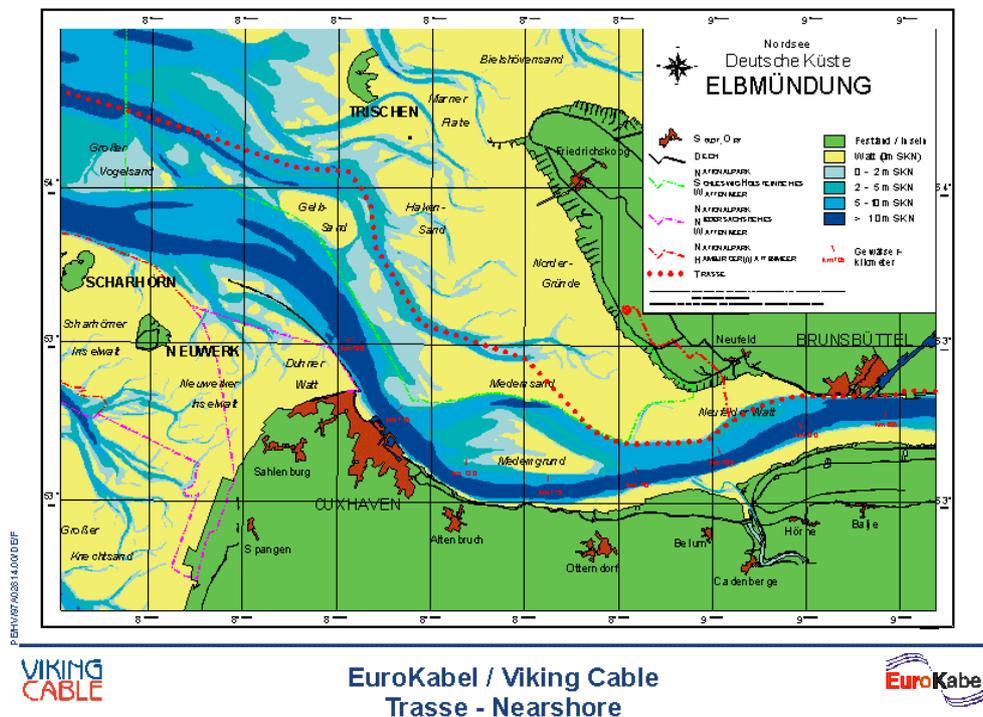


Abb. 11: Geplanter Verlauf der küstennahen Trasse des Eurokabel/Viking Cabel.

Ein Sonderfall ist die Kabellegung in trockenfallenden Gebieten. Wenn die Wassertiefe auch für flachgehende Pontons nicht ausreicht, wird das Kabel eingeschwommen. Hierzu wird es mit Auftriebskörpern ausgestattet und bei Hochwasser über den trockenfallenden Bereich gezogen. Schon bei gutem Wetter und ohne Strömung ist eine gezielte Positionierung nicht einfach.

Für die geplante Verbindung nach Norwegen ist in der Elbmündung im Bereich Meledemsand über eine Länge von ca. 5 Kilometer ein solcher Einschwimmvorgang erforderlich (Abb. 11). Durch die Strömungs- und Windverhältnisse ist der Legevorgang eines Kabels bereits erheblich erschwert. Zur Positionierung und der Verhinderung von Abdrift sind z.B. Ziehpfähle erforderlich, die die Einhaltung eines Legekorridors ermöglichen. Durch Verringerung der Abstände der Ziehpfähle kann der Korridor verkleinert werden. Ein durchgängiges Berühren der beiden Kabel kann hier auch in einem geeigneten Wetterfenster nicht zugesagt werden. In Zusammenarbeit mit Legefirmen und Behörden muß eine Optimierung des Gesamteingriffs erfolgen.

Elektrische Felder

Das Hochspannungsfeld tritt nur in der Isolation auf. Der Kabelmantel liegt auf Erdpotential. Es treten daher keine Felder nach außen.

Bei einem monopolaren Betrieb über Elektroden und Erdboden tritt der dem Widerstand des Erdbodens und des Stroms proportionale Spannungsfall auf, mit Höchstwerten direkt an der Elektrode von ca. 1,5 Volt/Meter, die dann schnell mit größer werdendem Abstand kleiner werden. Ein Einfluß auf die Werte ist nur im Nahbereich der Elektrode über Bauart und Wahl der Stromdichte möglich. Bei einem metallenen Rückleiter entfällt auch dieses Feld, da der Rückleiter eine Isolation gegen Erde hat.

Darüber hinaus wird in Leitern, die in einem Magnetfeld bewegt werden, wie z.B. Seewasser, eine Spannung induziert. Dies gilt für natürliche Magnetfelder wie das Erdfeld ebenso wie für künstliche Felder (Stephan Marhold, Uwe Kullnick, Universität Frankfurt/Main: Direkte oder indirekte biologische Wirkungen durch magnetische und/oder elektrische Felder im marinen Lebensraum: Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand). Durch die lokale Begrenzung und die schnelle Abnahme des Feldes mit dem Abstand ist der Einfluß von Gleichstromkabeln kleinräumig. Beeinflußbar sind diese Wirkungen nur durch die Größe des Zusatzfeldes durch die entsprechende Wahl der Abstände und in geringem Maße durch die Höhe der Überdeckung der Kabel

Mögliche Probleme von Offshore-Windenergieanlagen aus Naturschutzsicht

Thomas Merck & Henning von Nordheim

Bundesamt für Naturschutz, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm, D-18581
Lauterbach/Rügen, Germany, bf.n.ina.vilm@t-online.de

Einleitung

Die Nutzung von Windenergie zur Stromerzeugung wurde in ihren Anfängen in den 70er Jahren als natur- und umweltverträgliche Form der alternativen Energiegewinnung betrachtet. Vor allem durch das Stromeinspeisegesetz von 1991, aber auch durch verschiedene Förderprogramme von Bund und Ländern wird der Ausbau von Windenergieanlagen seither massiv gefördert (Vilbusch 1997). Mit dem starken Ausbau dieser Nutzungsform vor allem in den norddeutschen Küstenländern mehrten sich aber die Konflikte und Widerstände in der Bevölkerung wegen der Beeinträchtigungen des Wohnumfeldes, Störungen des Landschaftsbildes und negativen Auswirkungen auf die belebte Umwelt, vor allem auf Vögel. Die technische Entwicklung der Windenergieanlagen (WEA) hin zu immer größeren und leistungsfähigeren Einzelanlagen macht es aus Betreibersicht zunehmend wirtschaftlich einträglich, Windkraftanlagen küstenfern im Offshore-Bereich zu installieren, und es eröffnet sich damit die Möglichkeit, in ein vermeintlich konfliktfreies bzw. -armes Gebiet auszuweichen (BMBF 1995).

Das Bundesamt für Naturschutz (BfN) war erstmals in der ersten Jahreshälfte 1998 'amtlich' mit Fragen der Installation von Offshore-Windenergieanlagen befaßt. Damals gab es die Anfrage eines WEA-Betreibers an das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) über die Genehmigungsfähigkeit eines 600 Anlagen umfassenden Offshore-Windparks auf der Oderbank im östlichsten Bereich der deutschen „Ausschließlichen Wirtschaftszone“. Hier, außerhalb des eigentlichen Hoheitsgebiets der BRD, erfolgt eine Genehmigung entsprechend der Seeanlagenverordnung (SeeAnIV vom 23.01.97) durch das BSH.

Die Seeanlagenverordnung regelt die Genehmigung von seegestützten Anlagen und schließt explizit Windkraftanlagen mit ein. Nach § 3 der SeeAnIV ist eine Genehmigung u.a. zu versagen, wenn die Meeresumwelt gefährdet wird, ohne daß dies durch eine Befristung, durch Bedingungen oder Auflagen verhütet oder ausgeglichen werden kann und insbesondere wenn eine „Verschmutzung der Meeresumwelt im Sinne des Artikels 1 Abs. 1 Nr. 4 des Internationalen Seerechtsübereinkommens (UNCLOS) ... zu besorgen ist“. Laut UNCLOS bedeutet 'Verschmutzung' des Meeres: „die unmittelbare oder mittelbare Zuführung von Stoffen oder Energie durch den Menschen in die Meeresumwelt ... , aus der sich

abträgliche Wirkungen wie eine Schädigung der lebenden Ressourcen sowie der Tier- und Pflanzenwelt des Meeres, ...ergeben oder ergeben könnten“. Die Seeanlagenverordnung gibt damit in Verbindung mit dem Internationalen Seerechtübereinkommen letztlich die Kriterien vor, nach denen WEA aus Naturschutzsicht zu beurteilen sind.

Bis Ende 1999 gab es insgesamt neun Windkraftprojekte in der AWZ von Nord- und Ostsee mit zusammen über 1500 Einzelwindenergieanlagen, zu denen Anfragen zur Genehmigungsfähigkeit an das BSH gerichtet wurden. Seit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im April 2000 werden jetzt konkrete Anträge auf Genehmigung gestellt. Vom BfN wurden bzw. werden dann jeweils entsprechende Stellungnahmen erbeten. Weitere Pläne bzw. Vorhaben für Offshore-Windparks gibt es für die Küstengewässer Niedersachsens, Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommern, an deren Beurteilung das BfN aber auf Grund des anderen Genehmigungsverfahrens nicht beteiligt ist.

In der Regel werden bei Anfragen für einen möglichen Standort in der AWZ durch den Antragsteller sogenannte Suchräume vorgegeben (Abb. 1). Die Beurteilung eines Vorhaben muß zwar standortspezifisch erfolgen, Voraussetzung hierfür ist aber neben der Kenntnis der örtlichen Gegebenheiten eine möglichst umfassende allgemeine Einschätzung aller möglichen Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf Naturhaushalt und Umwelt.

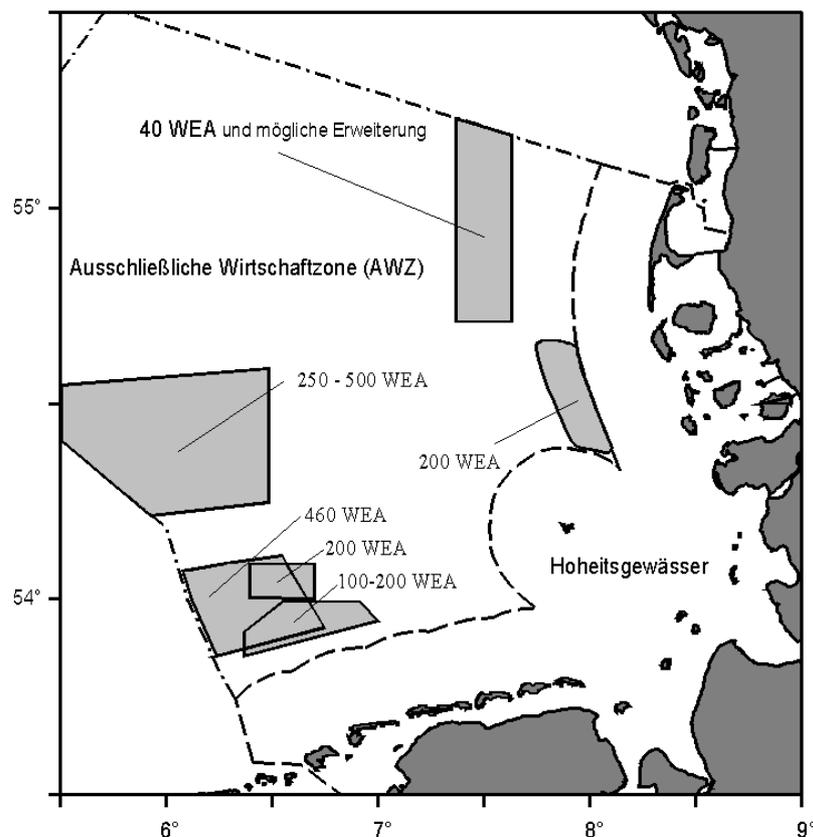


Abb. 1: Von verschiedenen WEA-Betreibern vorgegebene „Suchräume“ bzw. geplante Standorte für Offshore-Windenergieanlagen im deutschen Teil der Nordsee.

Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen auf Umwelt und Natur

Von Windkraftanlagen in der offenen See mit ihren Rotoren, Masten und Fundamenten, Kabelverbindungen etc. gehen Wirkungen auf die Umwelt aus, deren Bedeutung und Erheblichkeit für verschiedene Teilelemente des Naturhaushaltes beurteilt werden muß, um zu einer umfassenden Einschätzung von WEA im Offshore-Bereich zu kommen. Zur Zeit gibt es nur außerhalb Deutschlands einige wenige, küstennahe Offshore-Windenergieanlagenkomplexe (z.B. Dänemark), die jeweils nur einige Einzelanlagen umfassen. Anlagen in den von einigen deutschen Interessenten geplanten Größenordnungen gibt es bisher weltweit nicht, entsprechend fehlen adäquate Untersuchungen über deren Auswirkungen. Eine Zusammenstellung anzunehmender und möglicher Auswirkungen, die sich u.a. aus den wenigen Ergebnissen, die im Zusammenhang mit den o.a. wenigen küstennahen Anlagen gewonnen wurden, herleiten lassen, ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Am genauesten lassen sich z.Zt. Effekte auf die Vogelwelt abschätzen (s.u.), bei anderen Tier- und Pflanzengruppen müssen wir uns gegenwärtig auf qualitative Abschätzungen möglicher Auswirkungen beschränken, ohne deren Bedeutung zum Beispiel auf die Populationsstärke einzelner Arten abschließend beurteilen zu können.

Vögel

Aus ornithologischer Sicht ist bei WEA im Bereich der offenen See einerseits mit Störeffekten auf rastende, nahrungssuchende und überwinternde Meeresvögel zu rechnen, andererseits sind direkte Verluste durch Vogelschlag zu befürchten. Zu beiden Fragen gibt es erste Untersuchungen, die aber nur kleine Ausschnitte des Komplexes beleuchten. Weitere Hinweise können Untersuchungen an Land geben, die aber u.a. wegen eines anderen betroffenen Artenspektrums nur mit großen Einschränkungen auf den Meeresbereich übertragen werden können.

Verschiedene Studien an Land zeigen, daß von WEA Scheuchwirkungen auf Vögel ausgehen, die großflächig Gebiete als Nahrungs- und Rastgebiet ungeeignet machen. Je nach Art der betroffenen Vögel und abhängig von der Größe der Einzelanlagen werden Flächen im Umkreis von 100-500 m gemieden (z.B. Schreiber 1993). In den deutschen Bereichen der Nord- und Ostsee überwintern und rasten z.T. in international bedeutsamen Zahlen verschiedene Arten von See- und Lappentauchern, Alken, Sägern, Meeresenten und Möwen (Durinck *et al.* 1994; Skov *et al.* 1995). Einige dieser Arten, z.B. Seetaucher und Trauerenten, haben gegenüber Schiffen Fluchtdistanzen, die mehrere Kilometer betragen (Hüppop, Vogelwarte Helgoland, pers. Mitteilung), so daß im Vergleich zu den an Land untersuchten Arten auf dem Meer erheblich größere Scheucheffekte der WEA, zumal in der avisierten Größenklasse von 2-5-MW, zu befürchten sind.

Tab. 1: Anzunehmende und mögliche Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen auf die belebte Meeresumwelt.

	Ursache	Wirkung
Vögel	- Anlagen bzw. Rotoren - Schiffsverkehr während des Baus und zur Wartung	Scheuchwirkung führt zu: - Verlust von Nahrungs- und Rastflächen - Änderung von Zuglinien
	- Kollisionen (Vogelschlag)	- direkte Verluste
Meeressäuger	- Schattenwurf der Rotoren - Emissionen von Schall und Vibrationen in den Wasserkörper	- Verkleinerung des Lebensraums durch Scheuchwirkung - Beeinträchtigung des Verhaltens - Streß
	E-Kabel (s.u.)	(s.u.)
Fische	- E-Kabel zwischen Anlagen und zum Land (künstliche magnetische und elektrische Felder)	- Störung der klein- und großräumigen Orientierung (insbesondere bei wandernden Arten) - Behinderung der Nahrungssuche
	- Emissionen von Schall und Vibrationen in den Wasserkörper	- Verkleinerung des Lebensraums durch Scheuchwirkung - Beeinträchtigung des Verhaltens - Streß
	- in der Bauphase Trübungsfahnen und Sedimentation	- Behinderung der Nahrungssuche - Schädigung des Fischlaichs
Zoobenthos	- lokale Zerstörung durch Fundamentsetzung - Sedimentfahnen während des Baus	- Lebensraumverlust - direkte Verluste durch Bau und durch Überdeckung mit Sediment
	- Änderung der Strömungs- und Sedimentverhältnisse - Einbringung von künstlichem Hartsubstrat bis in euphotische Zone	- Änderung der Zusammensetzung der benthischen Lebensgemeinschaften
Landschaftsbild	- weitsichtbare technische Bauten in einer sonst 'strukturlosen' Landschaft	- Eingriff in das Landschaftsbild
sonstiges	- Gefährdung des Schiffsverkehrs (u.a. Havaristen)	- Verschmutzungen durch z.B. austretendes Öl

Eine dänische Studie zeigt einen Rückgang der Trauerentenbestände in der Umgebung eines kleineren Offshore-Windparks (10 WEA) um über 90 %, während die Rastbestände von Eiderenten auf ein Viertel zurückgingen (Guillemette *et al.* 1998). Laut den Autoren gibt es auf Basis der gewählten statistischen Methoden aber keinen gesicherten Zusammenhang zwischen diesen Veränderungen und der Installation der WEA. Allerdings betonen die Autoren aber selber, daß ihre Studie keine Aussagen über das Verhalten der Eiderenten bei größeren und

damit störungsempfindlicheren Schwärmen oder zu anderen Perioden ihres Jahresablaufs, z.B. während der Mauser zulassen. Auch sind die Ergebnisse nicht geeignet, Rückschlüsse auf andere Vogelarten oder bei größeren Windrädern oder -parken zu ziehen.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß hinsichtlich der Scheuchwirkung von Offshore-Windenergieanlagen auf Vögel zwar noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, daß aber nach den bestehenden Erkenntnisse vom Land, den Ergebnissen erster Untersuchungen auf dem Meer sowie aufgrund des Wissens von der Biologie der betroffenen Arten von einem erheblichen Gefährdungspotential ausgegangen werden muß. Diese Wirkungen würden nicht erst durch den Betrieb, sondern bereits in der Bauphase durch den entsprechenden Schiffsverkehr einsetzen. Einige der Meeresvogelarten, z.B. die muschelfressenden Trauerenten, sind bei ihrer Nahrungssuche auf bestimmte Wassertiefen, zum Beispiel auch unterseeische Bänke und Meeresrücken, angewiesen. Offshore-Windenergieanlagenkomplexe, die - wie von einigen deutschen Betreibern geplant - mehrere 1.000 ha Fläche genau dieser Meereslebensräume beanspruchen würden, bedeuten für solche Arten den Verlust eines erheblichen Teils ihrer Nahrungsflächen, der nicht durch ein einfaches Ausweichen in andere Meeresgebiete ausgeglichen werden kann, da solche Gebiete nicht in unbeschränktem Umfang vorhanden sind.

Insbesondere für ziehende Arten ist die Analyse des Risikos, mit den Rotoren zu kollidieren und getötet zu werden, von erheblicher Bedeutung. Untersuchungen im terrestrischen Bereich zeigten ein Ausweichverhalten vorbeiziehender Vögel, wobei drehende Rotoren bei Tageslicht die stärksten Reaktionen hervorriefen (Pedersen & Poulsen 1991). Todesfälle durch Kollisionen mit Rotoren sind danach vor allem nachts bzw. bei schlechten Sichtverhältnissen zu erwarten. Wie holländische Untersuchungen zeigen, ziehen verschiedene Watvogel- und Tauchentenarten nicht nur in der Dämmerung und nachts, sondern sie fliegen auch besonders flach in Höhen unter 100 m über das offene Wasser, so daß sie in den Bereich der Rotoren der Windturbinen kommen (Dirksen *et al.* 1996; Dirksen *et al.* 1998 a). Überwinternde Tiere, die Windkraftanlagen auf ihren täglichen Flügen zwischen Nahrungsplätzen auf See und ihren Rastplätzen an Land passieren, scheinen von den Anlagen zu wissen und umfliegen sie bei schlechter Sicht weiträumig (Dirksen *et al.* 1998 b). Dies zeigt einerseits die Barrierewirkung, die für Vögel von Windparks ausgehen kann, andererseits läßt sich hieraus schließen, daß vor allem Zugvögel auf den jährlichen Flügen von und zu ihren Brutgebieten durch „Vogelschlag“ gefährdet sein dürften. Für eine abschließende Bewertung des Kollisionsrisikos ist u.a. auch eine bessere Kenntnis vom Zugeschehen über der offenen See notwendig.

Marine Säugetiere

Untersuchungen zu den Auswirkungen von WEA auf Wale und Robben liegen z.Zt. überhaupt nicht vor und eine Abschätzung ihrer Bedeutung kann nicht gegeben werden. Hier besteht dringender Bedarf an Forschung, die z.B. die Frage beantwortet, wie marine Säuger auf den

Schattenwurf der Rotoren und die Übertragung von Schall und Vibrationen auf den Wasserkörper reagieren. Denkbar sind Beeinträchtigungen des Verhaltens und Streßreaktionen der Tiere. Beides kann zum Abwandern der Tiere aus der näheren und weiteren Umgebung der WEA führen: ein Verlust von Lebensraum wäre die Folge. Auch ist zu klären, inwieweit die an den Kabeln zwischen den einzelnen WEA und zum Festland hin künstlich entstehenden magnetischen und elektrischen Felder die Orientierung der Meeressäuger beeinträchtigt, wie es insbesondere für wandernde Fischarten zu befürchten ist (s.u.).

Fische

Negative Auswirkungen von WEA im Offshore-Bereich auf die Fischfauna sind einerseits durch Effekte auf die Hydrologie und Sedimentologie sowie durch künstliche elektrische und magnetische Felder zu befürchten. An den Elektrokabeln zwischen den Einzelanlagen eines Windparks und an dessen Verbindungskabel zur landseitigen Einspeisungsstelle werden großflächig elektrische und magnetische Felder im Wasserkörper aufgebaut. Die so erzeugten künstlichen Magnetfelder übertreffen - je nach Menge des transportierten Stromes und der Art der Kabel (mono-/bipolar; Gleich-/Wechselstrom etc.) sowie in Abhängigkeit von der Entfernung zum Kabel - im ungünstigsten Fall die Stärke des natürlichen Erdmagnetfeldes erheblich und weisen in der Regel eine abweichende Ausrichtung auf. Auswirkungen sind insbesondere auf solche Fischarten zu befürchten, die wie z.B. der Aal sich mit Hilfe des Erdmagnetfeldes bei ihren weiträumigen Wanderungen orientieren (Tesch *et al.* 1992). Von den Kabeln bzw. ihren künstlichen magnetischen Feldern könnte eine Barrierewirkung ausgehen, die quasi wie ein 'elektro-magnetischer Vorhang' die Tiere an der Abwanderung in z.B. Laichgebiete hindert oder diese Abwanderung soweit verzögert, daß die Tiere für eine erfolgreiche Reproduktion dort zu spät ankommen.

Auch elektrische Felder werden in der Umgebung der Kabel künstlich erzeugt. Sie erreichen Stärken, die die von verschiedenen marinen Organismen wahrnehmbaren Größen deutlich übersteigen. Zu diesen Organismen zählen u.a. verschiedene Hai- und Rochenarten, die schwache elektrische Felder zum Auffinden von Nahrungsorganismen nutzen (Kalmijn 1982). Auch hier fehlen hinreichende Erkenntnisse über mögliche Verhaltensstörungen oder Einflüsse auf das Nahrungssuchvermögen, die durch diese künstlichen Felder hervorgerufen werden können.

Aus der Elektrofischerei ist bekannt, daß besonders Larval- und Jugendstadien von Fischen bei relativ niedrigen künstlichen elektrischen Feldstärken bereits getötet werden, welche von Adultstadien noch ohne sichtbare Schädigung überstanden werden (Meyer-Waarden & Halsband 1975; Debus 1998). Es muß daher dringend der Einfluß der elektrischen Felder bereits existierender oder möglicher mariner Hochspannungskabel unter den besonderen physiologischen Bedingungen des marinen Milieus auf Fischlarven und Jungtiere

(z.B. Hering, Scholle) untersucht werden, um deutliche Bestandsrückgänge verschiedener Fischarten und mögliche Auswirkungen auf fischereiliche Erträge gegebenenfalls ausschließen zu können.

Ähnlich wie für die marinen Säugetiere ist die Auswirkung der möglichen Übertragung von Vibrationen oder Unterwasserschall über die WEA-Fundamente auf die Fischfauna zu untersuchen. Weitere negative Effekte auf die Fischfauna sind in der Bauphase durch die entstehenden Trübungsfahnen und die darin transportierten Sedimente zu erwarten. So dürfte es, wenn auch zeitlich befristet, zu visueller Beeinträchtigung kommen, die z.B. das Auffinden von Nahrungsorganismen erschwert. So zeigen Untersuchungen im Zusammenhang mit mariner Sand- und Kiesentnahme, daß Fische Bereiche der Trübungsfahnen verlassen (ICES WGEXT 1998). Im selben Zusammenhang zeigten Begleituntersuchungen, daß es lokal zu Schädigung von Fischlaich durch Bedeckung mit aufgewirbeltem Sediment kommen kann (Hygum 1993). Die unterseeischen Fundamente dürften in der Regel zu Änderungen der Strömungsverhältnisse führen, welches wiederum Veränderungen der Sedimentzusammensetzung im Bereich der WEA nachsichziehen könnte. Eine daraus resultierende Änderung der Benthoszusammensetzung kann dann möglicherweise die Nahrungssituation der Fische in diesem Bereich verschlechtern (s.u.).

Zoobenthos

Ähnlich wie für Fischlaich wird es in der Bauphase durch das Setzen der Fundamente, Einspülen der Kabel etc. zu Trübungsfahnen und lokaler Bedeckung der Bodenorganismen mit aufgewühltem Sediment kommen. Zumindest zeitweise ist daher mit einer Schädigung der benthischen Lebewelt zu rechnen, wie entsprechende Untersuchungen bei marinen Sand- und Kiesentnahmeaktivitäten zeigten (Kenny & Rees 1996). Auch wenn viele benthische Organismen an Überdeckungen adaptiert sind, kann es doch zumindest zeitlich begrenzt zu Veränderungen der Benthosgemeinschaft und so zu negativen Auswirkungen auf benthosfressende Vogel- und Fischarten kommen.

Durch das Setzen der Fundamente werden direkt Bodenlebewesen zerstört und ihr Lebensraum - wenn auch nur lokal - geht dauerhaft verloren. Die Fundamente verändern die Strömungs- und damit Sedimentationsverhältnisse in ihrer Umgebung. In wieweit dieses eine Wiederbesiedelung gestörter Bereiche langfristig beeinflussen oder zu einem Wechsel der Artenzusammensetzung führen wird, müßte durch entsprechende Forschung untersucht werden. Besonders im deutschen Bereich der Nordsee dominieren Weichsubstrate wie Schlick- und Sandböden mit entsprechenden Lebensgemeinschaften. Mit den WEA-Fundamenten werden hier künstliche Hartsubstrate geschaffen, die vom Meeresboden bis über die Wasseroberfläche reichen. Der so entstehende Lebensraum wird von einer standortuntypischen epibenthischen Fauna, aber auch von Meeresalgen mit entsprechender Begleitfauna besiedelt

werden. Eine Veränderung der natürlichen Biozönose und damit der natürlichen Biodiversität wird die Folge sein.

Landschaftsbild

Mit der Installation von Windkraftanlagen im Offshore-Bereich werden künstliche vertikale Strukturen in einer sonst ausschließlich horizontal ausgebildeten marinen Landschaft geschaffen. Bei den größten z.Zt. geplanten Anlagen (5 MW-Leistung) ist der Rotor (110 m Durchmesser) bei einem Abstand von 11 km mit einem Durchmesser sichtbar, der vom gleichen Standort aus gesehen dem des Vollmondes entspricht. Abb. 2 gibt den optischen Eindruck wieder, den ein Park aus 25 solcher 5 MW-Anlagen in solch einer Entfernung macht. Bis zu einer Entfernung von 20 km ist bei diesen Anlagen der komplette Rotor sichtbar. Komplexe in den z.T. geplanten Größenordnungen werden daher auch in Entfernungen von 20-30 km bei entsprechenden Lichtverhältnissen deutlich erkennbare Strukturen in einer sonst 'strukturlosen' Landschaft entstehen. Diese führen, verstärkt durch die Bewegung der großen Rotoren, zu einem erheblichen Eingriff in die Eigenart und Schönheit des marinen Landschaftsbildes und des Naturraumes 'offene See', der weder ausgeglichen noch ersetzt werden kann.

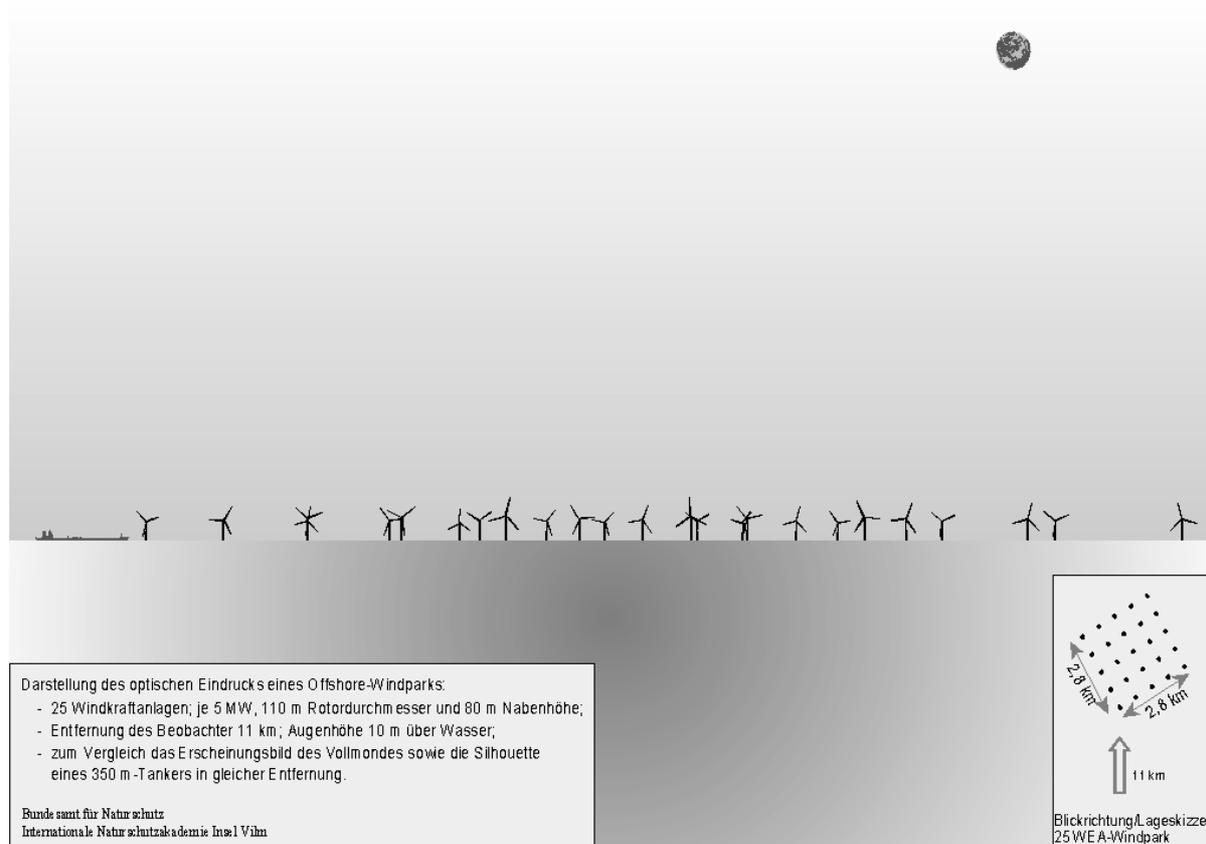


Abb. 2: Optischer Eindruck eines Offshore-Windenergieanlagenkomplexes aus Einzelanlagen mit je 5 MW Leistung.

Schiffsverkehr

Insbesondere in der vielbefahrenen Deutschen Bucht und in küstennahen Seeverkehrsbereichen erhöhen WEA-Komplexe die Unfallgefahr mit Schiffen, und Havarien gefährden dann Meeres- und Küstenabschnitte, die weit vom eigentlichen Windpark entfernt sein können. So muß bei schwimmenden Verschmutzungen wie Öl mit weitreichenden Verdriftungen gerechnet werden, die bei entsprechenden Windrichtungen auch die Küsten, z.B. die Wattenmeernationalparke, in Mitleidenschaft ziehen. Eine entsprechende 'Fernwirkung' kann auch durch ein Abtreiben des Havaristen, wie der Unfall der „Pallas“ gezeigt hat, hervorgerufen werden.

Zusammenfassende Einschätzung

Windkraftanlagen im Offshore-Bereich sind eine neue technische Entwicklung, so daß fundierte Aussagen über ihre Wirkung insbesondere auf die belebte Umwelt sowie eine endgültige Einschätzung aus Sicht des Naturschutzes z.Zt. noch nicht möglich sind. Erfahrungen im terrestrischen Bereich und Erkenntnisse von den Auswirkungen anderer Aktivitäten im Meer sowie das Wissen um die Biologie von marinen Organismen geben aber sehr deutliche Hinweise und ausreichend Anlaß, um von einem erheblichen Gefährdungspotential von Offshore-Windenergieanlagenkomplexen auszugehen. Gerade wegen des Fehlens ausreichender wissenschaftlicher Kenntnisse im marinen Bereich und wegen des hohen Grades an Gefährdung, dem viele marine Organismen und Biotope zunehmend ausgesetzt sind (v. Nordheim & Merck 1995, Merck & v. Nordheim 1996), sollten dem sowohl im OSPAR- als auch im Helsinki-Übereinkommen international vereinbarten Vorsorgeprinzip folgend Offshore-Windenergieanlagenkomplexen in den z.Zt. von deutschen Betreibern geplanten Größenordnungen zumindest vorläufig nicht gebaut werden.

Sollte es zur Genehmigung von WEA-Komplexen im Offshore-Bereich kommen, sollten in einer frühen Ausbauphase oder als Pilotprojekt (ca. 10-15 Einzelanlagen) wissenschaftliche Begleituntersuchungen zur notwendigen Ermittlungen der oben dargelegten möglichen Auswirkungen solcher Anlagen durchgeführt werden. Diese müssen neben den ornithologischen Gesichtspunkten auch etwaige Wirkungen auf die Hydrologie, Sedimentologie, die Auswirkungen der elektrischen und magnetischen Felder, die Hydroakustik und die damit verbundenen Einflüsse auf Benthos, Fische und marine Säuger umfassen. Erst eine so erarbeitete, ausreichende Kenntnislage wird eine abschließende naturschutzfachliche Beurteilungen und Bewertung der Genehmigungsfähigkeit von Windkraftnutzung im Offshore-Bereich insgesamt bzw. des weiteren Ausbaus des betreffenden WEA-Komplexes zulassen. Die Frage, inwieweit durch Offshore-Windparke fossile Brennstoffe eingespart bzw. CO₂-Emissionen vermieden werden können, und ob sie damit aus volkswirtschaftlicher Sicht förderungswürdig sind, muß Teil einer übergeordneten Beurteilung der Umweltverträglichkeit dieser Anlagen sein.

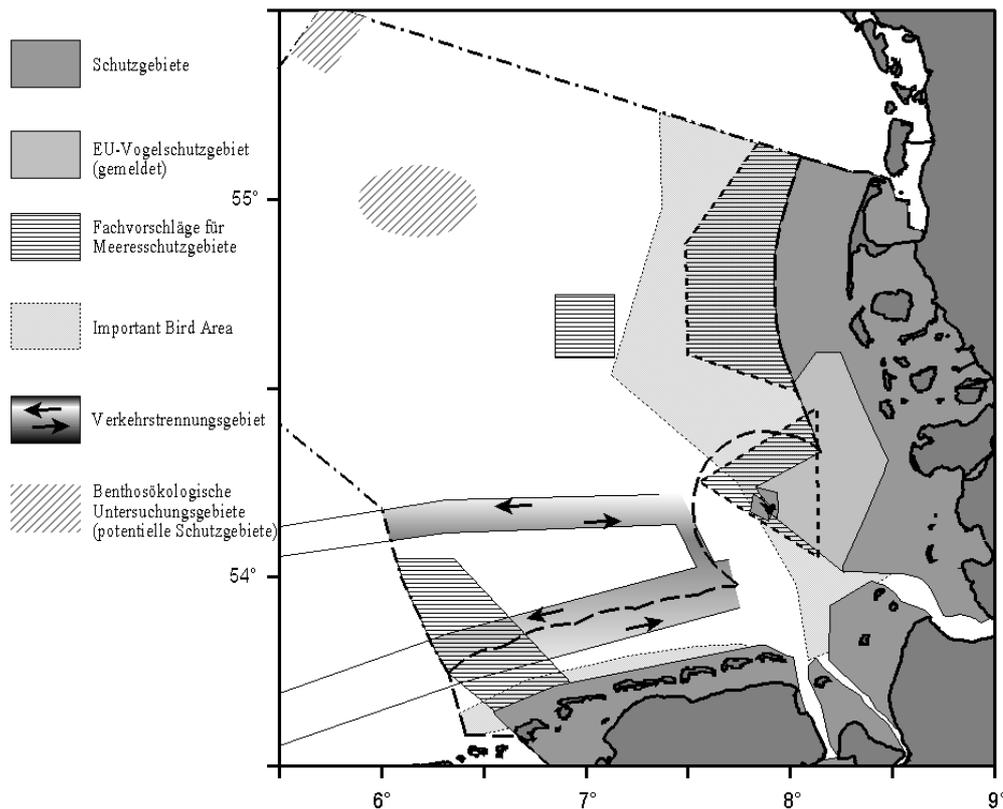


Abb. 3: Schutzgebiete, Important Bird Areas (Skov *et al.* 1995), ökologisch wertvolle Bereiche und das Verkehrstrennungsgebiet in der Deutschen Bucht.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist aber bereits zum heutigen Zeitpunkt aufgrund der aufgeführten, als erheblich einzuschätzenden Negativwirkungen der WEA insbesondere auf die Vogelwelt, das Landschaftsbild und die Gefahr für den Schiffsverkehr festzustellen, daß vor allem die Küstengewässer des deutschen Teils der Nordsee für die Installation von Offshore-Windparke ungeeignet sind (Abb. 3). Die Flächen der drei Wattenmeernationalparke kommen als Standorte grundsätzlich nicht in Frage, aber auch eine Installation seeseits der Nationalparkgrenzen widerspräche durch den Eingriff in den Naturhaushalt und in das Landschaftsbild den speziellen Zielen dieser Schutzgebiete, den Erhalt der typischen Eigenart und Schönheit dieses Landschaftsraumes sicherzustellen. Große Bereiche vor der schleswig-holsteinischen Küste, wie auch die eingangs erwähnte Oderbank in der Ostsee, beherbergen überwinternde oder durchziehende Meeresvögel in derart hohen Anzahlen, daß diese Bereiche als Vogelschutzgebiet im Sinne der EU-Vogelschutzrichtlinie qualifiziert sind. Der Bau von Windturbinen verbietet sich hier genauso wie in der unmittelbaren Umgebung der Verkehrstrennungsgebiete vor der niedersächsischen Küste. Eine vergleichbare Benennung von Ausschlußgebieten auf der Hohen See bzw. in der AWZ würde eine genauere Kenntnis von z.B. Vogelzuggeschehen, Vorkommen ökologisch wertvoller Benthosgemeinschaften, Bedeutung bestimmter Gebiete für Fischpopulationen etc. voraussetzen. Entsprechende Untersuchungen werden z.B. zu ökologisch wertvollen Benthosgemeinschaften in der Deutschen Bucht in einem 1999 angelaufenen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesumweltministeriums durchgeführt.

Literatur

- BMBF (1995): Offshore Windenergiesysteme. Abschlußbericht zum Fördervorhaben des BMBF: Nr. 0329645 (A u. B).
- Debus, L. (1998): Elektrosmog im Meer durch gleichstromerzeugte elektrische und magnetische Felder - eine Literaturstudie. Deut. Hydro. Z. Suppl. 8: 167-180.
- Dirksen, S., Spaans, A.L. & J. van der Winden (1996): Nachtljike trek en vlieghoogtes van steltlopers in het voorjaar over de noordelijke havendam van Ijmuiden. Sula 10(4): 129-142.
- Dirksen, S., Spaans, A.L., van der Winden, J. & L.M.J. van den Bergh (1998 a): Nachtljike vliegpatronen en vlieghoogtes van duikeenden in het Ijsselmeergebied. Limosa 71: 57-68.
- Dirksen, S., van der Winden, J. & A.L. Spaans (1998 b): Nocturnal collision risks of birds with wind turbines in tidal and semi-offshore areas. In: Ratto, C.F. & G. Solari (Hrsg): Wind Energy and Landscape. Balkema, Rotterdam: 99-108.
- Durinck, J., Skov, H., Jensen, F.P. & S. Phil (1994): Important marine areas for wintering birds in the Baltic Sea. - EU DG XI research contract no. 2242/90-09-01; Ornis Consult report.
- Guillemette, M., Kyed Larsen, J. & I. Clausager (1998): Impact assessment of an off-shore wind park on sea ducks. National Environmental Research Institute, Denmark. - NERI Technical Report No. 227.
- Hygum, B. (1993): Environmental effects of gravel and sand suction. A literature study on the biological effects of raw material extraction in marine environments (in Dänisch). DMU-Report 81. (The Danish Environmental Investigation Agency and the Danish National Forest and Nature Agency).
- ICES WGEXT (1998): Report of the Working Group on the Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marien Ecosystem. unpubl. meeting document, Harlem, The Netherlands, 20-24 April 1998.
- Kalmijn, Ad. J. (1982): Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes. Science 218: 916-918.
- Kenny, A. J. & H. L. Rees (1996): The effects of marine gravel extraction on the macrobenthos: results of 2 years post-dredging. Mar. Pollut. Bull. 32: 615-622.
- Merck, T. & H. von Nordheim (Hrsg.) (1996): Rote Listen und Artenlisten der Tiere und Pflanzen des deutschen Meeres- und Küstenbereichs der Ostsee. Schr.-R. f. Landschaftspfl. u. Natursch., Heft 48: 1-108 .
- Meyer-Waarden, P.F. & E. Halsband (1975): Einführung in die Elektrofischerei - neu bearbeitet von E. Halsband & I. Halsband. Berlin, Henemann Verlag.

- Nordheim, H. von & T. Merck (Hrsg.) (1995): Rote Listen der Biotoptypen, Tier- und Pflanzenarten des deutschen Wattenmeer- und Nordseebereichs. Schr.-R. f. Landschaftspfl. u. Natursch., Heft 44: 1-139.
- Pedersen, M.B. & E. Poulsen (1991): En 90 m/2 MW vindmølles indvirkning på fuglelivet. Fugles reaktioner på opførelse og idriftsættelsen af tjæreborgmøllen ved Det Danske Vadehav. Danske Vildundersøgelser 47, Kalø.
- Schreiber, M. (1993): Windkraftanlagen und Watvogel-Rastplätze - Störungen und Rastplatzwahl von Brachvogel und Goldregenpfeifer. Naturschutz und Landschaftsplanung 25: 133-139.
- Skov, H., Durinck, J., Leopold, M.F. & M.L. Tasker (1995): Important Bird Areas for seabirds in the North Sea. Birdlife International, Cambridge.
- Tesch, F.-W., Wendt, T. & L. Karlsson (1992): Influence of geomagnetism on the activity and orientation of the eel, *Anguilla anguilla* (L.) as evident from laboratory experiments. Ecology of Freshwater Fish 1: 52-60.
- Vilbusch, U. (1997): Windenergienutzung in Regelwerken des Naturschutzes in den Bundesländern. Naturschutz und Landschaftsplanung 29: 197-202.

Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung potentiell negativer Auswirkungen von Offshore-WKA auf Natur, Umwelt und Landschaftsbild

Uwe Thomas Carstensen

Bundesverband Erneuerbare Energien e.V., Leisewitzstraße 37, D-30175 Hannover, Germany, lindemann@winkra.de

Einführung

Der Titel dieses Referates könnte schon Anlaß für ein Mißverständnis sein: Offenbar geht es bei Offshore-WKA um einen Eingriff in Natur, Umwelt und Landschaft, der zwangsläufig zu negativen Auswirkungen führen muß. Das führt zu der Frage: Wenn solche Anlagen grundsätzlich so nachteilig sind, warum macht man das dann überhaupt?

In der Tat ist es eine Verzerrung, die Diskussion um Offshore-WKA als eine vielversprechende Variante regenerativer und damit zukunftsfähiger Energiequellen von vorn herein nur anhand ihrer möglichen Nachteile aufzuziehen. Schließlich werden solche Planungen nicht gemacht, um Natur- und Umweltschützer zu ärgern, sondern sind ein wichtiger Beitrag dazu, daß auch künftig Natur- und Umweltschutz sinnvoll möglich ist.

Über Windräder dem Wind für den Menschen verwertbare Energie abzutrotzen, ist eine uralte Kulturtechnik. Man betrieb und betreibt Mühlen, Pumpen und Schiffe. Eine zeitweise Krise erlebte diese Technik erst mit dem Aufkommen von Motoren, die direkt oder indirekt mit fossilen Energieträgern angetrieben wurden. Die Nachteile der Nutzung von Kohle, Uran und Gas und die Endlichkeit der Vorräte sind hinreichend bekannt. Der Braunkohlentagebau hat riesige Landschaften zerstört und wird uns noch auf Jahrzehnte mit enormen Folgekosten belasten, wesentliche Eingriffsfolgen sind aber sicher nicht rückgängig zu machen. Ähnliches gilt für die Steinkohle. Auch die einst so sauber erscheinende Kernenergie hat längst ihren Nimbus der Zukunftssicherheit verloren. Hier hat zuletzt die Havarie in Japan gezeigt, daß man bestimmte Gefahren für die Menschheit auch in einem Kernland der Hochtechnologie nicht vermeiden kann. Und schließlich ist die so sauber erscheinende Verwendung von Gas als Energieträger auch nichts anderes als das Verbrennen eines begrenzten fossilen Vorrates mit entsprechend negativen Auswirkungen auf unsere Atmosphäre.

Wenn man sich die eingetretenen und möglichen Schäden an Umwelt und Natur durch die Verwendung der heute als Hauptstütze der Energiegewinnung genutzten Energie

träger ansieht, wird klar welche zunehmende Bedeutung die Nutzung regenerativer Energiequellen für einen Nachhaltigen Naturschutz hat: Sie ermöglicht ihn nämlich erst.

Wem diese These zu gewagt erscheint, der denke nur an die Berichte über globale Klimaveränderungen oder die alarmierenden Schadstoffnachweise aus Arktis und Antarktis. Man kann schon lange keinen Zaun mehr um ein Naturschutzgebiet ziehen.

Leider ist es aber gerade bei der Windenergie ein typisches Verhaltensmuster von Naturschützern, in Stellungnahmen zu Windpark - Planungen zwar die Nutzung der Windenergie als wünschenswert zu bezeichnen, aber bitte nicht hier. Unserem Verband liegen zahlreiche dieser Stellungnahmen vor, und es ist kein deutsches Problem. Die Engländer nennen es sehr schön NIMBY-Effekt (Not In My Backyard = Bitte nicht in meinem Vorgarten). Der Strom kommt schließlich aus der Steckdose und ist gelb.

Da fragt man sich, soll es Ziel des Natur- und Umweltschutzes sein, zugunsten einer scheinbar heilen Welt vor der Haustür die benötigte Energie in anonymer Form, an der Grenze quasi "gewaschen" zu beziehen, ohne daß wir nach der Herkunft fragen? Soll die deutsche Energieversorgung eines Tages so aussehen, daß sie vor allem von französischem Atomstrom und russischem Gas abhängt?

Das betrachten wir als umwelt- und energiepolitisch unakzeptabel, bedeutet es doch neben der Schaffung weiterer Abhängigkeiten vor allem die Verlagerung der Belastungen aus der Energieerzeugung auf mehr oder weniger ferne Länder. Abgesehen davon sollte es unterdessen bekannt sein, daß Umweltbelastungen sich nicht auf einzelne Regionen beschränken lassen.

Ziel muß es deshalb sein, die Energie möglichst in der Region, wo sie benötigt wird, mit möglichst geringen Umweltbelastungen zu gewinnen.

Die dezentrale Nutzung regenerativer Energiequellen hat bereits heute einen Stellenwert erreicht, der noch vor zehn Jahren von vielen in das Reich der Phantasie verwiesen wurde. In Deutschland sind unterdessen ca. 6.800 Windkraftanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 3.400 Megawatt in Betrieb. Sie produzieren damit etwa 1,5% des deutschen Strombedarfs.

Auch der Arbeitsmarkt hat profitiert. Mittlerweile arbeiten weit über 10.000 Menschen im direkten und indirekten Umfeld der Windenergie in Deutschland, und das besonders in den sogenannten strukturschwachen Regionen. Ein großer Hersteller in Ostfriesland zahlt mehr Gewerbesteuer als ein großes Automobilwerk in Emden.

All das zeigt: die Nutzung der Windenergie ist möglich, sie trägt in erheblichem Umfang zur Umweltentlastung bei und hat hier im Lande positive wirtschaftliche Effekte. Sie muß jedoch weiter ausgebaut werden. 1,5% sind ein schöner Erfolg, aber vor den Anforderungen an den schonenden Umgang mit unseren Ressourcen noch zu wenig. Die bisher

gewonnenen Erfahrungen müssen genützt werden, um die noch brachliegenden Potentiale zu nutzen.

Windenergiegewinnung ist dort am effektivsten, wo der Wind zuverlässig und in ausreichender Stärke weht. Dies ist insbesondere an den Küsten, aber noch viel besser im Offshore-Bereich gewährleistet. Unsere dänischen Nachbarn haben dies übrigens schon längst gemerkt, wie auch auf der Tagung deutlich wurde (Clausager, dieser Band). Nach einer Untersuchung des Dt. Lloyd steht dem derzeitigen jährlichen Energieverbrauch in Deutschland von 450 TWh ein Potential aus Offshore-WKA von 237 TWh gegenüber. Dabei wurden Einschränkungen aufgrund von Pipelines und Kabeltrassen, militärischer Sperrzonen, Schiffsverkehr, Ölplattformen und Naturschutz (ausgewiesene Schutzgebiete) bereits berücksichtigt. Ließen sich nur 10% davon realisieren, könnte etwa 5% des derzeitigen Energieverbrauchs allein vor den deutschen Küsten erzeugt werden.

Natürlich verkennen wir nicht die Probleme, die mit Offshore-WKA einhergehen können. Wir wissen, daß das Meer ein ganz besonderer und empfindlicher Lebensraum ist, der den meisten Menschen im besten Sinne des Wortes nur „randlich“ bekannt sein dürfte. Entsprechend sorgfältig muß man bei der Planung vorgehen und alle Möglichkeiten der Vermeidung und Minimierung eventuelle negativer Auswirkungen prüfen. Nachfolgend werde ich einige Punkte ansprechen, wie dies aus unserer Sicht erfolgreich realisiert werden kann.

Planung als Beitrag zu Vermeidung und Minimierung

Die Planung und Realisierung eines WP ist eine komplexe Aufgabe, die in der Regel mehrere Jahre umfaßt. Es ist heute die Regel, daß die Technische und wirtschaftliche Planung eines Windparks bereits ab einem frühen Stadium von einer Ökologischen Planung begleitet wird. Abb. 1 zeigt – in stark vereinfachter Form! – wie diese Planungsstränge miteinander verzahnt sind.

Die Antragskonferenz nach § 5 UVPG hat eine sehr wichtige Funktion in einem Planungsverfahren. Hier sind Gegenstand, Umfang und Methoden der UVP zu erörtern und zu strukturieren. Schon hier ist es ein wesentlicher Punkt, alle Möglichkeiten zur Vermeidung und Minderung von Beeinträchtigungen zu untersuchen. Mit der Abstimmung des Untersuchungsumfanges mit der Genehmigungsbehörde unter Berücksichtigung der Stellungnahmen fachlich Beteiligter und der Verbände wird der UVS-Inhalt festgelegt.

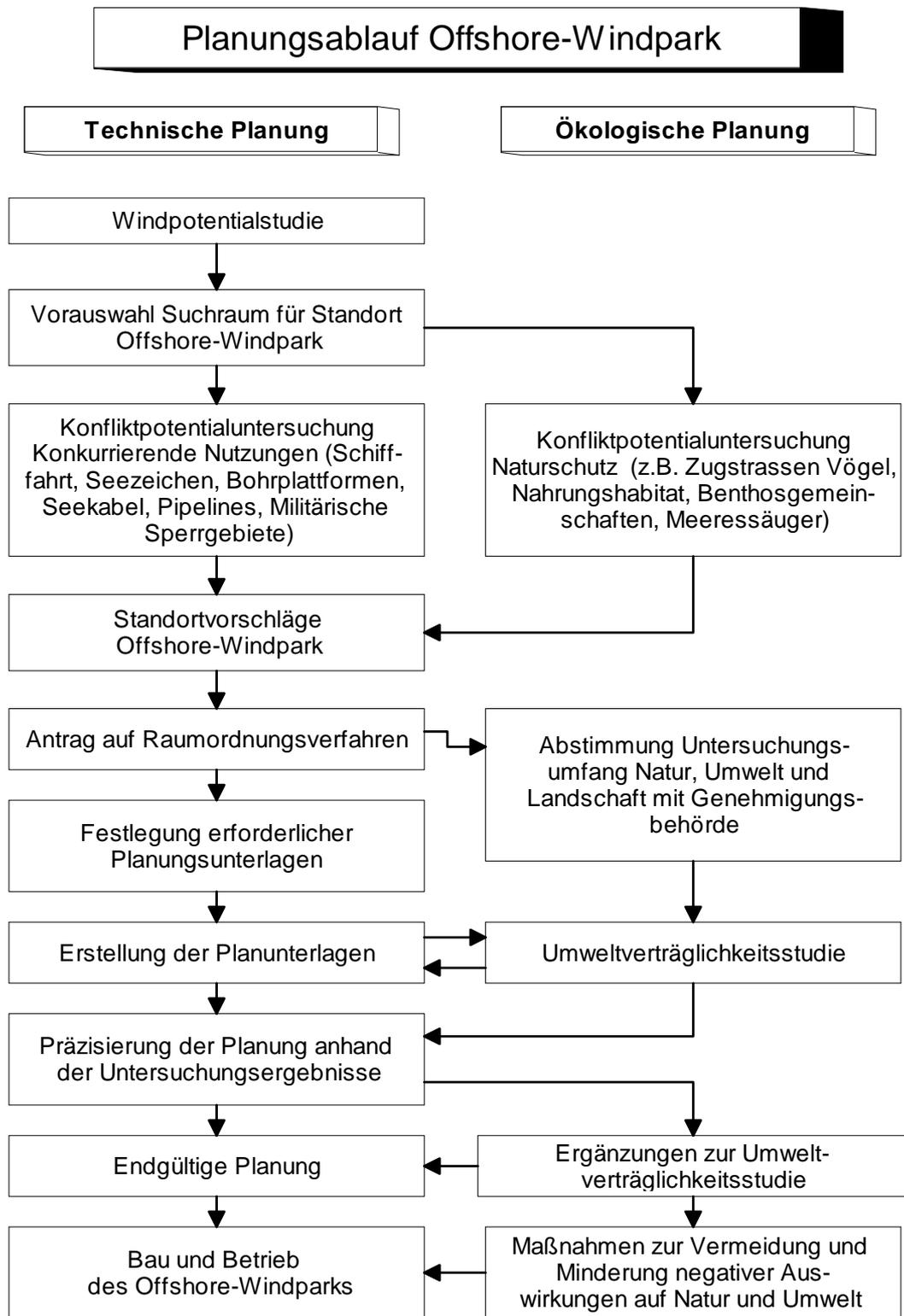


Abb. 1: Planungsablauf

Es ist das Betreiben, in einem möglichst frühen Planungsstadium alle denkbaren Konflikte mit Natur, Umwelt und Landschaft zu untersuchen. So können frühzeitig mögliche Konflikte erkannt und gelöst werden. Der Einsatz der bestverfügbaren Technik bietet dann die Gewähr für optimierte Lösungen.

Natur

Vögel

Beim Thema Naturschutz und WKA steht in der öffentlichen Diskussion seit Jahren das Thema „Vögel“ oben an. Das Schlagwort von den „Vogelhäckselmaschinen“ war vor wenigen Jahren noch in aller Munde. Allein – diese Befürchtungen haben sich nicht bewahrheitet, wie heute auch vom Naturschutz bestätigt wird. Es gibt unterdessen eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen über das Verhalten der Vögel bei Brut, Rast und Nahrungssuche in der Nähe von WKA. Bei Offshore-WKA sind vor allem Interaktionen mit ziehenden und nahrungssuchenden Vögel mögliche Konfliktquellen.

Die theoretisch möglichen Konflikte bestehen darin, daß

1. Vögel im Flug mit einer WKA kollidieren,
2. Vögel durch WKA zu erheblichen Kursänderungen gezwungen werden,
3. Vögel, die auf offener See sich langfristig zur Nahrungssuche aufhalten, Nahrungshabitate verlieren.

Die entscheidende Frage ist, in welchem Umfang diese Konflikte sich in der Praxis realisieren und wie sie gegebenenfalls vermieden werden können.

Die meisten Untersuchungen zum Thema Vögel – WKA wurden bisher an Land durchgeführt, aber auch aus dem Offshore-Bereich liegen unterdessen einige - wenn auch noch wenige - Untersuchungen vor, die eine Einschätzung der Konflikte erlauben. So hat die Studie aus dem dänischen Offshore-WP in Tunø Knob gezeigt, daß dort keine erkennbaren Beeinträchtigungen aufgetreten sind.

Auch die Autoren einer radargestützten Untersuchung aus den Niederlanden aus einem Semi-Offshore-WP am IJsselmeer kommen zu dem Schluß, daß das „Kollisionsrisiko von Vögeln mit den WKA niedriger ist als erwartet“, die Vögel sowieso oberhalb der WKA fliegen oder ihnen ausweichen.

Beim Schiffsverkehr wird von Scheuchwirkungen berichtet, die über 1 bis 2 km reichen, jedoch sind fahrende Schiffe mit stehenden WKA nicht vergleichbar.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Vor dem Bau eines Offshore-WP werden entsprechende Untersuchungen durchgeführt, um Konflikte, soweit möglich, zu vermeiden.

Beleuchtete Bauwerke im Offshore-Bereich: Die bekannten Probleme mit Leuchttürmen beruhen auf deren speziellen Eigenschaften. Der rotierende Leuchtstrahl ist sehr weitreichend und in der Nähe des Leuchtturmes auch von hoher Blendwirkung. Dies führt dazu, daß einerseits Vögel angezogen werden können, sie aber andererseits die höheren, unbeleuchteten Teile eines Leuchtturmes aufgrund der Blendwirkung nicht wahrnehmen können. Im Fall des Leuchtturmes auf Helgoland ließ sich das Problem durch eine diffuse Beleuchtung des oberen Teils des Leuchtturmes lösen. Bei roten Positionslampen liegen gänzlich andere Bedingungen vor, neben der anderen Farbe ist durch die geringe Lichtstärke eine Blendwirkung auszuschließen.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Es gibt keinen Grund, Offshore-WKA nachts hell zu beleuchten. Durch ev. erforderliche Positionslichter (z.B. rote Befeuerungen) werden Insekten nur in geringem Umfang angelockt, so daß auch für nachtaktive Vögel keine Anziehung durch einen insektenreichen Raum gegeben ist. (wie es z.B. bei Straßenlaternen oder angestrahlten Gebäuden der Fall sein kann).

Meeressäuger

Mögliche Beeinträchtigungen für Meeressäuger werden Schallemissionen und Emissionen von Vibrationen zugeordnet. Von stromdurchflossenen Kabeln können elektrische und magnetische Felder ausgehen, von denen einige befürchten, daß sie das Orientierungsvermögen der Meeressäuger beeinflussen.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Durch eine Entkopplung zwischen Getriebe, Gondel und Turm lassen sich Emissionen vermeiden. Dies ist übrigens auch im Interesse des Betreibers, da Schwingungen die Stabilität des Bauwerks beeinträchtigen können. Die Energieabführung wird durch Drehstromkabel vorgenommen, von denen keine nennenswerten Felder ausgehen.

Fische und Makrozoobenthos

Fische und Makrozoobenthos sind vor allem durch direkten Lebensraumverlust und Auswirkungen von Sedimentverlagerungen und Wassertrübungen gefährdet, die vor allem in der Bauphase möglich sind.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Die Bauarbeiten werden so durchgeführt, daß Sedimentverlagerungen und Trübungen des Meerwasser weitgehend vermieden werden. Der Lebensraumverlust durch Überbauung wird so gering wie möglich gehalten.

Anmerkungen zu weiteren Tiergruppen

Ein Beispiel, wie die Interessen des Naturschutzes und eines Betreibers Hand in Hand gehen, zeigt sich auch am Beispiel der Insekten. Die Verschmutzung von Rotorblättern durch

Insektenanflug stellt nämlich nicht nur eine Beeinträchtigung dieser Tiere dar, sondern erhöht auch die Oberflächenrauigkeit des Rotorblattes und verändert sein Profil. Die Folge ist ein verringerter Energieertrag, eine Reinigung der Rotorblätter ist sehr kostenaufwendig. Alle Hersteller haben daher erhebliche Anstrengungen unternommen, durch Optimierung von Profilgestaltung und Oberflächenstruktur den Insektenanflug möglichst zu minimieren.

Umwelt

WKA arbeiten grundsätzlich ohne stoffliche Emissionen. Sie setzen kein CO₂ und keine Ruß- und Schwefelwolken frei, sie strahlen jetzt nicht und auch nicht in 10.000 Jahren. Man muß ihnen keinen Energieträger über Rohre, Eisenbahnzüge oder LKW mühsam zuführen, ihr Energieträger wird – bei geeignetem WKA-Standort – frei Haus geliefert, und das erstaunlich zuverlässig.

Welche Probleme könnten auftauchen, wie kann man sie vermeiden bzw. minimieren?

Technischer Umweltschutz

Anlagensicherheit

Die Anlagensicherheit ist selbstverständlich im ureigensten wirtschaftlichen Interesse jedes Anlagenbetreibers, denn jede Fehlfunktion oder gar Havarie ist mit erheblichen Kosten verbunden. In der Vergangenheit ist es vereinzelt zu spektakulären Fällen gekommen, in denen z.B. Teile eines Rotorblattes abgerissen sind. Bei näherer Untersuchung hat sich gezeigt, daß oft das berühmte "menschliche Versagen" eine Rolle gespielt hat. Es bleibt aber dabei, daß auch in Zukunft solche Ereignisse nicht völlig ausgeschlossen werden können. Es gilt daher, für Mensch, Natur und Umwelt nachteilige Folgen zu meiden.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Auch wenn solche Havarien unterdessen sehr unwahrscheinlich sind, wird man bei Offshore-WKA die möglichen Folgen von Mastbruch und Rotor(teil)abriß berücksichtigen. Offshore-WKA müssen deshalb so positioniert werden, daß Schifffahrtswege und Seezeichen, aber auch Landungsbrücken und Bohrinseln sich außerhalb der theoretischen Wurfweite von WKA-Teilen befinden. So können Risiken sicher ausgeschlossen werden.

Austritt von Schmierstoffen

In einer modernen Windkraftanlage (z.B. E66) befinden sich weniger als 35 kg Schmierstoffe (2,5 l Hydrauliköl (Polyethylenglykol, biologisch abbaubar, Wassergefährdungsklasse 0), 32 l synthetisches Öl (Polyalphaolivin), geringe Mengen Schmierfett in Lagern). Darüber hinaus kommen keine flüssigen Betriebsstoffe in der Anlage vor. Auch bei einer Betrachtung des

schlimmsten Falles (alle flüssigen Betriebsstoffe werden freigesetzt) handelt es sich damit um verhältnismäßig geringe Mengen, deren Austrittsfolgen beherrschbar sind.

Man sollte bei dieser Diskussion allerdings nicht vergessen, um welche Dimensionen es geht. Die für Offshore-WKA benötigten Schmierstoffmengen sind um mehrere 10erpotenzen geringer sind als die allein im Schiffsverkehr verwendeten. Trotzdem ist es selbstverständlich, daß auch bei Schäden möglichst keine Stoffe in die Umwelt gelangen dürfen.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Kapselungen von Lagern und Auffangwannen innerhalb der Maschinengehäuse bzw. in Trafostationen verhindern den Austritt von Flüssigkeiten. Dies ist Stand der Technik und wird auch bei Offshore-WKA eingesetzt.

Schall

Es ist unstrittig, daß WKA Schall emittieren. Dieser setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, Maschinen Geräuschen (Lager, Getriebe) und Windgeräuschen. Da zum Erzeugen von Schall Energie benötigt wird, so gilt auch hier, daß es schon aus ökonomischen Gründen im Interesse des Herstellers ist, Schall schon an der Quelle zu minimieren.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Auch bei Offshore-WKA sind Schallemissionen im hörbaren und nicht hörbaren Bereich auf das technisch sinnvoll darstellbare Minimum zu reduzieren. Die dem Stand der Technik entsprechenden WKA-Typen zeigen, daß dies so gelöst werden kann, daß in wenigen hundert m Entfernung die WKA gegenüber den Umgebungsgeräuschen (Wind, Wellen) nicht mehr / kaum noch wahr genommen werden können.

Infraschall

Die Diskussion um Auswirkungen von Infraschall, also unterhalb des Hörbereiches, hat zeitweise zu Irritationen in der Öffentlichkeit geführt. Hier wird den Menschen Angst gemacht vor einer angeblichen unsichtbaren bzw. "unhörbaren" Gefahr, die zu Gesundheitsschäden bei Mensch und Tier führen soll. Dabei wird von einigen so getan, als ob dieses Phänomen erst gestern entdeckt wurde. Infraschall ist für Ingenieure und Physiker keinesfalls ein neues Phänomen und es ist schon lange gut untersucht. Es hat nichts geheimnisvolles und ist mit technischen Mitteln meßbar.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Ebenso wie im hörbaren Bereich erfolgt eine Minimierung im Rahmen des Standes der Technik.

Fundament

Die Gründung der WKA im Meeresboden erfolgt über ein entsprechend dimensioniertes Fundament. Zu bekannten herkömmlichen großvolumigen Bauwerken wie Leuchttürmen

oder aufgeständerten Pieranlagen gibt es dabei eine Reihe von Unterschieden. Hervorzuheben ist vor allem das erhöhte Belastungsniveau mit hohen dynamischen Belastungsanteilen durch Wind, Wellen, Strömung und Feststoffe. Es handelt sich also um anspruchsvolle Bauwerke für extreme Umweltbedingungen, die eine Reihe von konstruktiven und technischen Fragen aufwerfen. Hinzu kommt, daß die potentielle Rückbaubarkeit gegeben sein muß.

So müssen die Anlagen so konstruiert werden, daß Wind, Wellen und Strömung keine Eigenschwingungen anregen. Eigenschwingungen könnten sich auf Meeresboden und Wasserkörper übertragen, aber würden vor allem zu einer erheblichen Belastung des Bauwerkes führen. Also ist auch hier der Fall gegeben, daß es schon im Interesse des Betreibers liegt, dies durch geeignete konstruktive Lösungen zu verhindern.

Als Baumaterialien eignen sich Stahl und Stahlbeton. Da bei Schwerkraftfundamenten die erforderliche Fundamentmasse mit der Wassertiefe stark ansteigt, eignen sich für Tiefen >10m eher Stahlkonstruktionen. Diese erreichen eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren und lassen sich vergleichsweise einfach rückbauen. Die Fundamente können als Einpfahlfundament (Monopile) oder Dreibein (Tripod) -Stahlfundamenten ausgeführt sein.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Bei der Einbringung der Fundamente kann auf umfassende Erfahrungen zurückgegriffen werden, um diese Arbeiten mit möglichst geringen Beeinträchtigungen durchzuführen. Bemerkenswert ist hier übrigens, daß aus der Sicht des Naturschutzes solche Bauwerke auch positiv zu werten sind, da Fundamente von verschiedenen Meeresorganismen als Hartbodensubstrate genutzt werden können. Manche Tierarten sind auf primäres (Steine, Bauwerke) oder sekundäres Hartsubstrat (Muschelschalen, Schill) angewiesen, auf dem sie sich anheften können. Zwischen diesen Grobstrukturen und ihren Aufwuchsarten leben weitere Tiere (sog. vagile Epibionten).

Erschütterungen und Vibrationen im Sediment

Bei WKA handelt es sich um Bauwerke, deren Rotoren eine Kreisbewegung ausführen. Es entstehen Schwingungen, die auf den Turm übertragen werden. Mögliche elastische Verformungen aufgrund von Torsions- und Pendelbewegungen werden zum Teil über das Fundament abgeleitet. Bei einer Schwingungsgeschwindigkeit von 1 mm/s in 1m von der Erschütterungsquelle ist bei realistischen Ausbreitungsbedingungen im Erdreich nach 50 m Entfernung die derzeit geforderte Nachweisgrenze von 0,02 mm/s erreicht (gemäß DIN 45669, Teil I, Entwurf, 'Messung von Schwingungsimmissionen', Schwingungsmesser-Anforderungen, Prüfung; April 1993). Über Bodenbewegungen durch den Betrieb von Windenergieanlagen existieren Untersuchungen vom Germanischen Lloyd (GL); hier wurden Erschütterungsmessungen direkt am Bodenfundament einer 600 kW-WKA durchgeführt. Die höchsten im Betrieb der WKA gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten betragen weniger als 0,1 mm/s

bei einer Blattdurchgangsfrequenz von 1,4 Hz (28 U/min), so daß die Grenzwerte weit unterschritten werden.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Nach dem derzeitigen Stand der Technik sind somit keine relevanten Erschütterungsimmissionen durch Windenergieanlagen zu erwarten. Durch eine Entkopplung zwischen Getriebe, Gondel und Turm lassen sich Emissionen vermeiden.

Wartung und Reparaturen, Seetauglichkeit

Wie jedes technische Gerät ist bei Offshore-WKA eine regelmäßige Wartung erforderlich, auch ist mit gelegentlichen Reparaturen zu rechnen.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Betriebsausfälle werden im Offshore-Bereich zu hohen Kosten führen, deshalb ist ein integriertes System zur Diagnose und Fernwartung erforderlich. Aufgrund der feuchten und salzhaltigen Luft müssen elektronische Bauteile wasserdicht abgekapselt werden.

Landschaftsbild

Die mit diesem Thema verknüpften Begriffe Landschaftsbild, Landschaftserleben, Vielfalt, Eigenart und Schönheit der Landschaft zeigen, daß es immer um Auswirkungen auf den Menschen geht. Dabei kann man die Wirkungen, also das, was von den WKA ausgeht, vielleicht noch objektiv erfassen. Die Auswirkungen finden jedoch im Kopf des einzelnen Menschen statt, und sie sind so individuell und subjektiv, wie es Menschen nun mal sind. So werden Sie es mir sicher nachsehen, daß ich zum Beispiel WKA schön finde und ich mich über ihren Anblick in der Landschaft freue.

Analog dazu können Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung potentiell negativer Auswirkungen theoretisch an zwei Ebenen ansetzen, den (1) Wirkungen der WKA („Was sendet sie aus?“) und den (2) Auswirkungen beim Betrachter („Was kommt an?“).

Beginnen wir mit den Wirkungen. Die grundsätzliche Form der WKA ist durch die technischen Funktionen bestimmt. Auch ihre Abmessungen sind nicht beliebig wählbar, sondern sollen das Optimum zwischen Herstellungsaufwand und Unterhaltung, Anlagensicherheit und Eingriffsvermeidung sowie Ertrag bieten.

Es sind bei landseitigen WKA in den letzten Jahren verschiedene Typen erprobt worden, von denen sich der dreiflügelige Vertikalrotor heute durchgesetzt hat. Da der Energieertrag mit zunehmender Höhe über dem Boden stark steigt, sind heute Nabenhöhen zwischen 70 und 100m üblich. Allerdings sind dem statische Grenzen gesetzt, so daß wesentlich höhere Anlagen in Zukunft nicht zu erwarten sind.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Sichtbar sind der WKA-Turm, das Maschinengehäuse und der Rotor. Wissenschaftliche Arbeiten haben gezeigt, daß dreiflügelige WKA mit schlankem Turm (kein Gittermast) die größte ästhetische Zustimmung finden. Dieser Anlagentyp wird heute von den meisten Herstellern angeboten und in der Regel installiert.

Die Sichtbarkeit einer WKA ist von einer Reihe von Faktoren abhängig. Zunächst ist das Bauwerk selber. Man geht heute davon aus, daß Gesamthöhen von ca. 150m eine sinnvolle Größe darstellen werden. Es macht wenig Sinn, aus Gründen der verringerten Sichtbarkeit zu kleine und ineffektive WKA zu installieren. Damit wäre niemandem gedient.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Großen Einfluß auf die Sichtbarkeit haben Oberflächenstruktur (rauh - glatt) und Farben. Die Sichtbarkeit wesentlich reduzieren können reflexionsarme Oberflächen, hellgraue/blauere Farben, die leicht mit dem Hintergrund auf See verschmelzen. Es handelt sich also um eine Art "Tarnanstrich", der bei größeren Entfernungen wirkt. Aus der Nähe werden die Anlagen weiter sichtbar bleiben. Dies ist schließlich auch dafür wichtig, daß z.B. fliegende Vögel die Anlagen nicht übersehen.

WKA haben systembedingt mit den Rotoren bewegte Elemente, die den Aufmerksamkeitsgrad beim Betrachter steigern können.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Je langsamer sich ein Rotor dreht, desto geringer dieser Effekt. Bei den heutigen Rotordurchmessern zwischen 60 und 90m sind geringe maximale Umdrehungszahlen von unter 30 UPM schon aus technischen Gründen zwingend.

Einzelanlagen sind im Offshore-Bereich aufgrund der hohen Kosten für die Stromableitung unwirtschaftlich. Bei Windparks gibt es verschiedene Möglichkeiten der Aufstellung.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Erfahrungen bei terrestrischen Windparks zeigen, daß kompakte, regelmäßige Strukturen sich am besten in die Landschaft einfügen und den Eindruck bewußter Gestaltung erzeugen. Dies ist nur ein scheinbarer Widerspruch zu natürlichen Strukturen, die keine rechten Winkel und geraden Linien kennen, sondern bewußte Gestaltung.

Auch bei Offshore-WKA ist das Umfeld, wo die WKA platziert werden, entscheidend.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Der Offshore-WP Wilhelmshaven ist beispielsweise vor eine Industriekulisse geplant, also in einem „vorbelasteten“ Gebiet. Eine Planung in der Nordsee für einen Offshore-WP zwischen der Schleswig-Holsteinischen Küste und Helgoland sieht Entfernungen von über 12 km zur Küste bzw. Helgoland vor. Dies bedeu-

tet, man wird den Windpark von den Küsten aus bei guter Sicht am Horizont wohl sehen können, er kann aber nicht das Landschaftsbild dominieren oder gar überformen.

Es ist in der Wissenschaft hinreichend bekannt, daß die Auswirkungen, also das subjektive Befinden des Einzelnen von seiner Herkunft, Bildung und wirtschaftlichen Interessen abhängig sind.

Beitrag zur Vermeidung / Minimierung: Es ist daher wichtig, über die Bedeutung regenerativer Energiequellen im Allgemeinen und hier der Windkraft im Besonderen in der Öffentlichkeit Aufklärungsarbeit zu leisten. Man kann selbstverständlich keinem Menschen vorschreiben, wie er ein bestimmtes Landschaftsbild empfindet. Man kann aber über Zusammenhänge informieren.

Ausblick

Es soll hier in einem kurzen Überblick gezeigt werden, daß es zahlreiche denkbare Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung potentiell negativer Auswirkungen von Offshore-WKA auf Natur, Umwelt und Landschaftsbild gibt. Wie Abb. 2 zeigt, müssen Sie schon integraler Bestandteil der Planungsphase sein und in der Bau- und Betriebsphase weiter entwickelt werden.

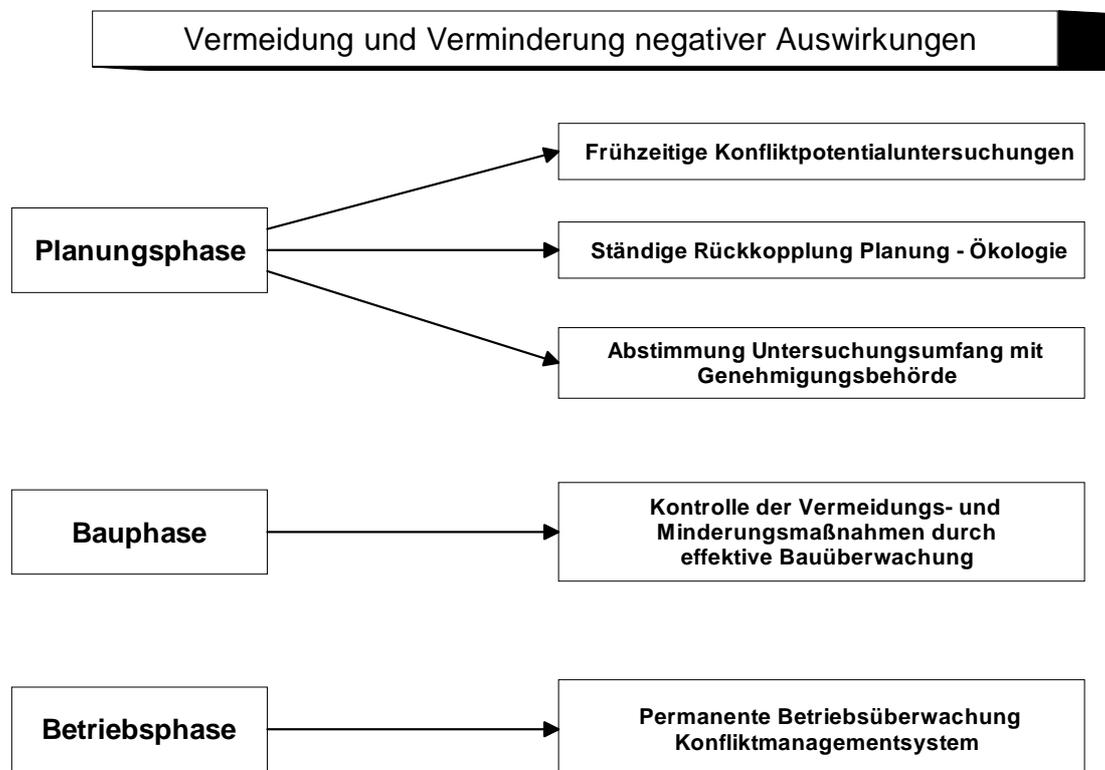


Abb. 2: Vermeidung und Verminderung negativer Auswirkungen.

Es soll keineswegs der Eindruck erweckt werden, als ob bei Offshore-WKA schon längst alle Probleme bekannt und gelöst sind. Der in der Vergangenheit beschrittene Weg der stufenweisen Weiterentwicklung der Anlagen hat sich als richtig herausgestellt (ganz im Gegensatz zu dem seinerzeitigen Sprung von 50kW-Anlagen zum GROWIAN). So sollte auch im Offshore-Bereich verfahren werden, indem man mit küstennahen WKA Erfahrungen in marinen Standorten sammelt. Hier ist für Deutschland der Offshore-WP bei Wilhelmshaven zu nennen, dessen Genehmigungsverfahren sich vor dem positiven Abschluß befindet.

Bisher war es bei der Windenergienutzung immer so, daß parallel zur technischen Entwicklung auch die Kenntnisse zu Fragen von Umwelt- und Naturschutz verbessert wurden. Offshore-WKA werden daher entsprechende Untersuchungen vorausgehen und Erfahrungen mit bestehenden WKA werden in weitere Planungen und Verbesserungen mit einfließen. Das Miteinander von Technischer Planung und Ökologischer Planung ist entscheidend, negative Auswirkungen auf Natur, Umwelt und Landschaft zu vermeiden bzw. zu minimieren.

Kein Betreiber hat Interesse daran, daß seine WKA sich negativ auf Natur und Umwelt auswirken. Das Bewußtsein, aktiv zu Umwelt- und Naturschutz beizutragen ist ein wesentliches und oft entscheidendes Motiv vieler, die sich mit der Nutzung der Windenergie befassen.

Mögliche Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf See- und Wasservögel der deutschen Nord- und Ostsee

Stefan Garthe

Institut für Meereskunde, Forschungsbereich Marine Ökologie, Düsternbrooker Weg 20, D-24105 Kiel, Germany, E-mail: sgarthe@ifm.uni-kiel.de

Problemfeld

Die Errichtung von Windenergieanlagen (WEA) in den windreichen küstennahen Marschen Nordwestdeutschlands hat sich als teilweise problematisch herausgestellt, da es dort vielfach zu großen Ansammlungen von Wasser- und Watvögeln kommt. Verluste durch Vogelschlag, aber vor allem Störungen an Nahrungs- und Rastplätzen sind die Folge (Schreiber 1993 und 1999, Ketzenberg & Exo 1997). In der Errichtung von WEA auf See wird oft eine Möglichkeit gesehen, diese Probleme zu reduzieren. Aus technischen Gründen ist die Errichtung solcher Anlagen in den küstennahen flacheren Bereichen der deutschen Nord- und Ostsee ökonomischer als weiter entfernt von der Küste. Auf See kann es aber auch, analog zur Situation an Land, zu Problemen mit rastenden und ziehenden Vögeln kommen. Zwei Hauptbereiche sind hierbei erwähnenswert:

1. Das Kollisionsrisiko von Vögeln mit den WEA, also direkte Verluste durch Vogelschlag. Diese Kollisionsrisiken mit Offshore-WEA bestehen grundsätzlich bei ziehenden Vögeln und bei im Eingriffsgebiet verweilenden, rastenden und nahrungssuchenden Seevögeln. Die Kollisionsgefahr ist bei Offshore-WEA als wesentlich höher als im Binnenland einzustufen, da offensichtlich (wesentlich) höhere Anlagen als an Land eingesetzt werden sollen, da fast alle Seevogelarten während der Nahrungssuche verhältnismäßig dicht über der Wasseroberfläche fliegen und da der Vogelzug (auch) in deutlich geringeren Höhen stattfindet.

2. Störungen ziehender oder rastender Vögel. Dabei sind sowohl Verluste von Nahrungs- und Rastgebieten aufgrund der Scheuchwirkung der Rotoren und Masten denkbar wie auch Störungen durch den Schiffsverkehr während der Bauphase und der Wartungen. Desweiteren können WEA Barrierenfunktionen zukommen bzw. ökologisch zusammengehörige Einheiten wie Rast- und Nahrungsgebiete zerschneiden.

Bedeutung der deutschen Nord- und Ostseegewässer für See- und Wasservögel

Die küstennahen Bereiche der deutschen Nord- und Ostsee sind als Nahrungs-, Rast- und Überwinterungsgebiete für eine Vielzahl von See- und Wasservogelarten von großer Bedeutung. Gebiete besonderer internationaler Wichtigkeit sind im Bereich der Nordsee die östliche Deutsche Bucht (Tab. 1) und der Bereich vor den ostfriesischen Inseln (Skov *et al.* 1995). Die unter Schutzaspekten wichtigsten Vogelarten sind hier Stern- und Prachtttaucher (*Gavia stellata*, *G. arctica*; Abb. 1) sowie die Trauerente (*Melanitta nigra*). Im Bereich der Ostsee sind die bedeutsamsten Gebiete die Boddengewässer vom Darß bis zur Oder-Mündung, die Pommersche Bucht (Tab. 2) und die Kieler Bucht (Tab. 3; Durinck *et al.* 1994). Zu den wichtigsten Vogelarten zählen dort Samtente (*Melanitta fusca*), Ohrentaucher (*Podiceps auritus*), Eisente (*Clangula hyemalis*), Zwergsäger (*Mergellus albellus*), Trauerente, Bergente (*Aythya marila*), Eiderente (*Somateria mollissima*), Gänsesäger (*Mergus merganser*) und Gryllteiste (*Cepphus grylle*). Sowohl in der Nordsee als auch in der Ostsee unterliegen viele dieser Arten internationalen Naturschutzabkommen und Konventionen, insbesondere der EG-Vogelschutzrichtlinie und dem afrikanisch-eurasischen Wasservogelabkommen (AEWA).

Tab. 1: Bedeutung der östlichen Deutschen Bucht (Nordsee) als Nahrungs-, Rast- und Überwinterungsgebiet für See- und Küstenvögel (aus Skov *et al.* 1995).

Arten mit ≥ 1 % der biogeographischen Population
(Klassifikations-Kriterium für Gebiete internationaler Bedeutung)

Stern- und Prachtttaucher	22 %
Trauerente	15 %
Brandseeschwalbe	5 %
Zwergmöwe	4 %
Sturmmöwe	1 %
Rothalstaucher	1 %

Tab. 2: Bedeutung der Pommerschen Bucht (Ostsee) als Nahrungs-, Rast- und Überwinterungsgebiet für See- und Küstenvögel (aus Durinck *et al.* 1994).

Arten mit ≥ 1 % der biogeographischen Population
(Klassifikations-Kriterium für Gebiete internationaler Bedeutung)

Samtente	38 %
Ohrentaucher	34 %
Eisente	17 %
Gryllteiste	12 %
Trauerente	9 %
Rothalstaucher	8 %
Mittelsäger	5 %
Haubentaucher	5 %
Stern-/Prachtttaucher	3 %

Tab. 3: Bedeutung der Kieler Bucht (Ostsee) als Nahrungs-, Rast- und Überwinterungsgebiet für See- und Küstenvögel (aus Durinck *et al.* 1994).

Arten mit $\geq 1\%$ der biogeographischen Population
(Klassifikations-Kriterium für Gebiete internationaler Bedeutung)

Eiderente	9 %
Trauerente	5 %
Eisente	2 %
Haubentaucher	2 %
Schellente	2 %
Rothalstaucher	1 %
Höckerschwan	1 %
Reiherente	1 %

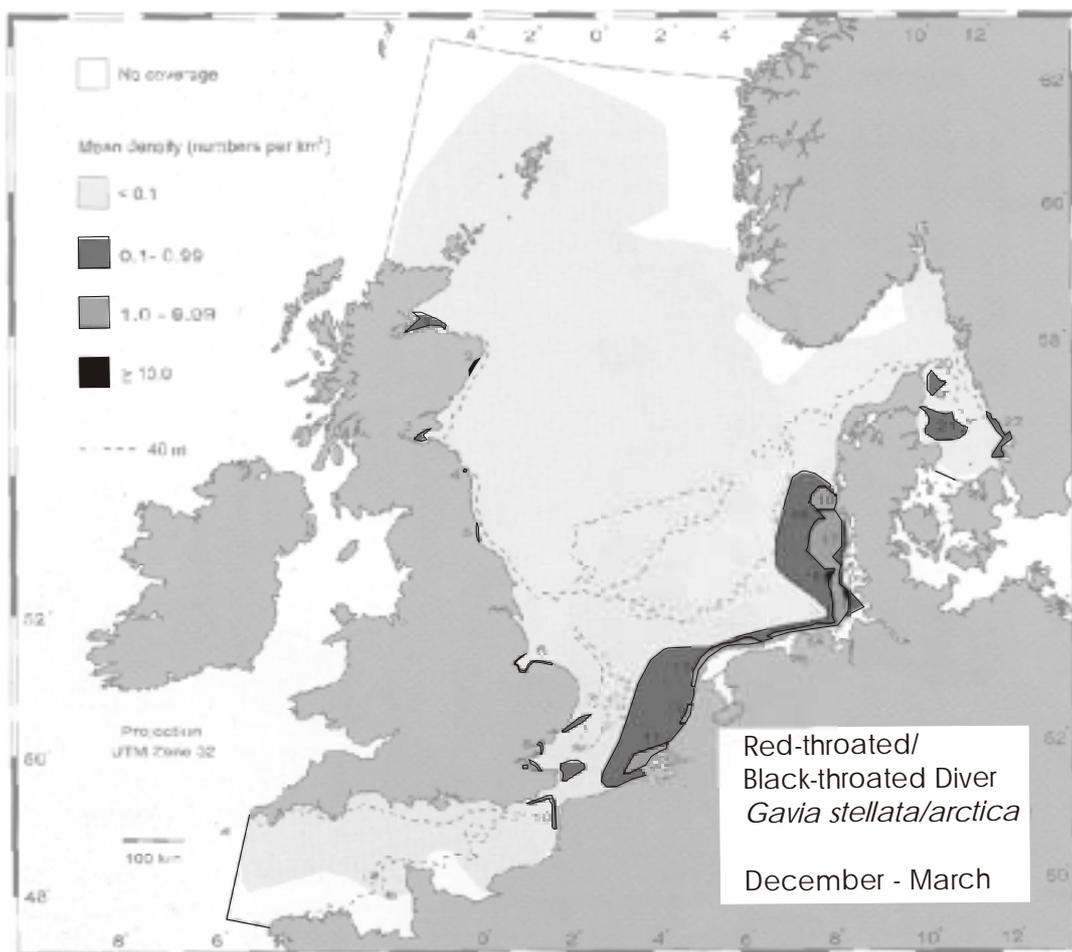


Abb. 1: Verbreitung von Stern- und Prachtaucher in der Nordsee von Dezember bis März (aus Skov *et al.* 1995).

Flugverhalten von See- und Wasservögeln

Zum Flugverhalten von See- und Wasservögeln auf See liegen aus den deutschen Gewässern kaum Daten vor, die hinsichtlich einer Konfliktpotentialabschätzung mit WEA genutzt werden können. Seevögel fliegen bei der Nahrungssuche meist dicht über der Wasseroberfläche. Aus Zughöhenabschätzungen an Eider- und Trauerenten Schleswig-Holstein wird deutlich, daß beide Arten an Land deutlich höhere Flughöhen aufweisen als über dem offenen Wasser (Abb. 2 und 3; Berndt *et al.* 1993, Busche *et al.* 1993). Gänse, Enten und Limikolen überfliegen auf dem Zug und beim Wechseln der Rast- und Überwinterungsgebiete einen Großteil der Deutschen Bucht in unterschiedlichen Höhen oft bis auf Meeresniveau hinab (Jellmann 1979, Garthe & Hüppop unveröff. Daten). Generell ziehen Vögel über dem Meer offensichtlich niedriger als über Land (z.B. Koop 1999).

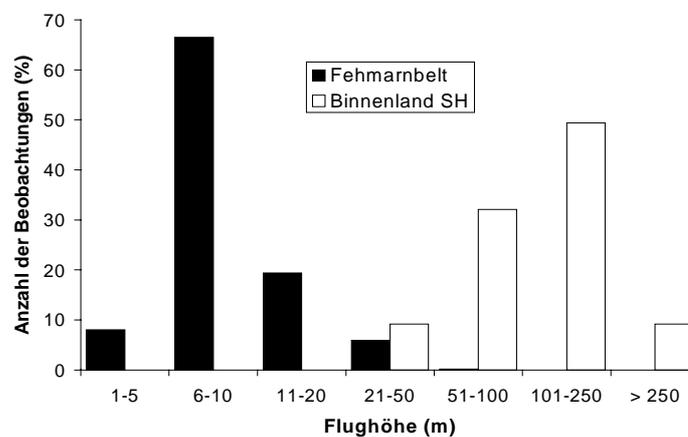


Abb. 2: Flughöhen der Eiderente im Fehmarnbelt und im Binnenland Schleswig-Holsteins (aus Berndt *et al.* 1993).

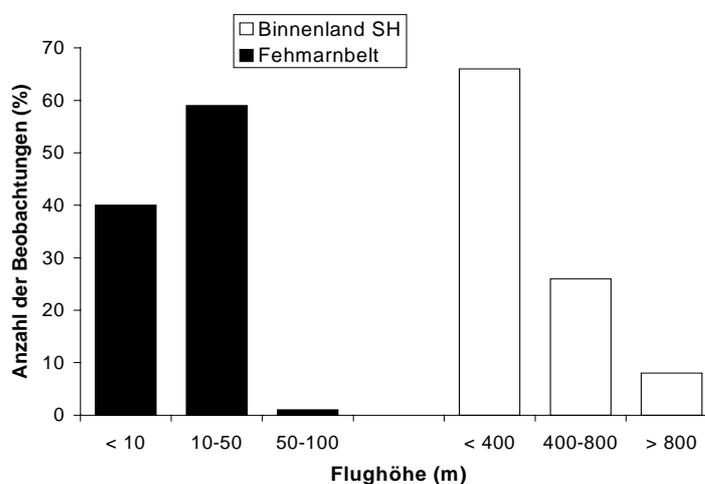


Abb. 3: Flughöhen der Trauerente im Fehmarnbelt und im Binnenland Schleswig-Holsteins (aus Busche *et al.* 1993).

Konfliktpotential und Forschungsbedarf

Der derzeitige Kenntnisstand reicht nicht aus, um das Ausmaß des Konfliktpotentials zwischen WEA und Vogelschutz in den deutschen Teilen von Nord- und Ostsee abzuschätzen. Um fundierte Bewertungen vornehmen zu können, sind entsprechende Untersuchungen nötig. Zu unterscheiden ist dabei zwischen grundsätzlichen Aspekten, z.B. dem Annäherungs- bzw. Ausweichverhalten von Vögeln an WEA, und regional-geographischen Aspekten, also z.B. Zugintensitäten, Zugstrecken, Flughöhen und nahrungsbedingten Flügen. Bei letztgenanntem Aspekt ist wiederum zwischen im Gebiet verweilenden Seevögeln und das Gebiet nur kurzzeitig durchfliegenden Zugvögeln zu unterscheiden. In einer späteren Phase wären ggfs. Maßnahmen zur Vogelschlagvermeidung (z.B. Warnlampen) zu erproben.

Durch die Pilotstudien in Dänemark (z.B. Guillemette *et al.* 1998 und 1999) und in den Niederlanden (z.B. Dirksen *et al.* 1998b, van der Winden *et al.* 1999) können allgemeine Schlüsse zum Verhalten von z.B. Eiderenten gegenüber WEA gezogen werden (vgl. entsprechende Beiträge in diesem Band).

Regional-geographische Studien sollten generell zu drei Phasen stattfinden: (1) im Vorfeld der Baumaßnahme (die den Status quo im Bebauungsgebiet dokumentieren), (2) als Begleituntersuchungen während der Bauphase und (3) als Begleituntersuchungen während des Betriebs der WEA. Um sowohl den Einfluss auf Zugvögel wie auch auf die lokale Verteilung von See- und Wasservögeln am potentiellen WEA-Standort beurteilen zu können, sind drei Methoden relevant, Transektuntersuchungen, Verhaltens- und Radarbeobachtungen.

Bei den Transektuntersuchungen werden nach einer international standardisierten Methode (Tasker *et al.* 1984) alle See- und Wasservögel quantitativ von Schiffen aus erfasst. In Deutschland wird diese Methode seit 1990 intensiv angewandt, so dass umfangreiche Vergleichsdaten vorliegen (z.B. Garthe & Hüppop 1996). Mittels der Transektuntersuchungen soll die großräumige Verteilung von See- und Wasservögeln im Untersuchungsgebiet (Eingriffs- vs. Referenzgebiet) bestimmt werden.

Mit Verhaltensbeobachtungen sind Reaktionen fliegender Vögel auf WEA bei verschiedenen Wetter- und Sichtbedingungen zu untersuchen (während der Nacht eventuell mittels Restlichtverstärker). Die Radaruntersuchungen (z.B. Dirksen *et al.* 1998a) dienen zum einen dazu, den Vogelzug im Bereich des Untersuchungsgebietes hinsichtlich Flughöhen und Flugintensität zu beschreiben und zu analysieren. Zum anderen sollen die zeitlichen und räumlichen Flugmuster von See- und Wasservögeln, die im Untersuchungsgebiet verweilen, bestimmt werden, also z.B. Flugaktivität bei der Nahrungssuche und Flüge zwischen Nahrungs- und Rastgebieten. Von besonderer Bedeutung sind Untersuchungen in der Nacht.

Es ist von vorrangiger Bedeutung, zunächst eine großräumige und umfassende Studie zu den möglichen Auswirkungen von Offshore-WEA auf Vögel durchzuführen, damit alle wichtigen Aspekte auf einer ausreichenden Datenbasis betrachtet werden können. Stärker lokal bezogene Studien könnten dann zu einem späteren Stadium nachfolgen.

Schlußfolgerungen

Da gerade die Orte mit den bedeutsamsten Konzentrationen von See- und Wasservögeln in den deutschen Meeresgewässern voneinander abweichende Vogelarten-Zusammensetzungen haben und damit erkennbar verschiedene ökologische Charakteristika aufweisen, ist es nicht möglich, mit einer Studie sämtliche Probleme zu klären. Dies rührt nicht zuletzt daher, daß die ökologisch unterschiedlichen Seevogelgruppen sehr verschieden auf Störungen reagieren. Folgende Gruppen sind im Bezugsgebiet besonders relevant: Meeresenten (Benthosfresser), störepfindliche Arten (Seetaucher, Trauerente) und fast ständig umherfliegende Arten (Möwen/Seeschwalben). Zudem ist der Ablauf des Vogelzuges vermutlich örtlich sehr unterschiedlich.

Unter Berücksichtigung der Verteilung der bedeutsamen Konzentrationen von See- und Wasservögeln und der vermutlichen Vorzugsbereiche des Vogelzuges gibt es nach derzeitigem Kenntnisstand in den küstennahen Gebieten der deutschen Nord- und Ostsee aus Sicht des Vogelschutzes keinen geeigneten Standort für WEA. Für küstenfernere Stellen, z.B. den "Entenschnabel" der Deutschen Bucht, ist ein geringeres Konfliktpotential zu vermuten.

Danksagung

Ich danke Ib Clausager, Bernd Hälterlein und Jan van den Winden für sehr anregende Diskussionen zur Thematik und Ommo Hüppop und Michael Exo für wertvolle Hinweise bei der Durchsicht des Manuskriptes.

Literatur

Berndt, R.K., Nehls, G. & K. Kirchhoff (1993): Eiderente - *Somateria mollissima*. In: Berndt, R.K. & G. Busche (Hrsg.): Vogelwelt Schleswig-Holsteins. Band 4: Entenvögel II (Kolbenente - Ruderente). S. 53-73. Wachholtz, Neumünster.

- Busche, G., Berndt, R.K. & G. Nehls (1993): Trauerente - *Melanitta nigra*. In: Berndt, R.K. & G. Busche (Hrsg.): Vogelwelt Schleswig-Holsteins. Band 4: Entenvögel II (Kolbenente - Ruderente). S. 82-88. Wachholtz, Neumünster.
- Dirksen, S., Spaans, A.L., van der Winden, J. & L.M.J. Bergh (1998): Nachtelijke vliegpatronen en vlieghoogtes van duikeenden in het IJsselmeergebied. *Limosa* 71: 57-68.
- Dirksen, S., van der Winden, J. & A.L. Spaans (1998b): Nocturnal collision risks of birds with wind turbines in tidal and semi-offshore areas. In: Ratto, C.F. & G. Solari (eds.): Wind energy and landscape. Proc. Internat. Workshop on Wind Energy and Landscape. Balkema, Rotterdam: 99-108.
- Durinck, J., Skov, H., Jensen, F.P. & S. Pihl (1994): Important marine areas for wintering birds in the Baltic Sea. Ornis Consult report, Kopenhagen.
- Garthe, S. & O. Hüppop (1996): Das „Seabirds-at-Sea“-Programm. *Vogelwelt* 117: 303-305.
- Guillemette, M., Larsen, J.K. & I. Clausager (1999): Impact assessment of an off-shore wind park on sea ducks. NERI Tech. Rep. 227: 1-61.
- Guillemette, M., Larsen, J.K. & I. Clausager (1999): Assessing the impact of the Tunø Knob wind park on sea ducks: the influence of food resources. NERI Tech. Rep. 263: 1-21.
- Jellmann, J. (1979): Radarbeobachtungen zum Heimzug von Wildgänsen (*Anser*, *Branta*) im Raum der Deutschen Bucht. *Abh. Geb. Vogelkd.* 6: 269-288.
- Ketzenberg, C. & K.-M. Exo (1997): Windenergieanlagen und Raumansprüche von Küstenvögeln. *Natur und Landschaft* 72: 352-357.
- Koop, B. (1999): Windkraftanlagen und Vogelzug im Kreis Plön. *Bremer Beitr. Naturkd. Naturschutz* 4: 25-32.
- Schreiber, M. (1993): Windkraftanlagen und Watvogel-Rastplätze, Störungen und Rastplatzwahl von Brachvogel und Goldregenpfeifer. *Naturschutz Landschaftspl.* 25: 133-139
- Schreiber, M. (1999): Windkraftanlagen als Störungsquelle für Gastvögel am Beispiel von Blessgans (*Anser albifrons*) und Lachmöwe (*Larus ridibundus*). *Bremer Beitr. Naturkd. Naturschutz* 4: 39-47.
- Skov, H., Durinck, J., Leopold, M.F. & M.L. Tasker (1995): Important bird areas for seabirds in the North Sea including Channel and the Kattegat. BirdLife International, Cambridge.
- Tasker, M.L., Jones, P.H., Dixon, T.J. & B.F. Blake (1984): Counting seabirds at sea from ships: a review of methods employed and a suggestion for a standardized approach. *Auk* 101: 567-577.
- van der Winden, J., Spaans, A.L. & S. Dirksen (1999): Nocturnal collision risks of local wintering birds with wind turbines in wetlands. *Bremer Beitr. Naturkd. Naturschutz* 4: 33-38.

Impact assessment studies of offshore wind parks on seabirds with special reference to the Tunø Knob wind park

Ib Clausager

National Environmental Research Institute, Department of Coastal Zone Ecology, Kalø, Grenåvej 12, DK-8410 Rønne, Denmark, ic@dmu.dk

Abstract

The wind energy development in Denmark will in the coming decades be concentrated on large offshore wind parks. Experimental offshore wind parks have demonstrated promising technical results. Impact assessment studies have shown that in wintertime the Eider was not affected by the turbines but primarily by the distribution of food resources. Further information is needed as the findings are only valid for wintering Eiders and other species may react differently in wintertime as well as in other periods of the annual cycle. The impact of large wind parks may also differ from small ones like the experimental parks.

Introduction

Background

After the energy crisis in 1973/74 the Danish Parliament realised that there was a need for an overall energy policy and the government presented the first energy plan in 1976. This has been succeeded by revised plans focusing more and more on sustainable energy sources instead of fossil fuels such as oil and coal.

In the latest plan from 1996 "Energi 21" (Miljø- og Energiministeriet 1996) wind energy constitutes an essential element. Even if the public in general has a positive attitude to wind energy, an increasing opposition started surfacing already in the late 1980s, especially based on aesthetic points of view and disturbance near residences. In many places, solitary turbines or small groups of turbines had at that time been erected without sufficient planning and legislation.

Today most of the best land sites are either occupied or cannot be used for wind turbines due to restrictions. Therefore, efforts to find new suitable sites are more and more concentrating on locations at sea. At sea the wind is in general stronger and more stable than at land sites and therefore a higher production can be expected from offshore turbines.

The objectives of the 1996 energy plan therefore focus on offshore wind turbines. The Danish waters are in general shallow thus providing excellent possibilities for erecting wind turbines. This was realised already in the mid 1980s, but at that time the technology was not yet sufficiently developed. However, in 1987 a committee was set up and given the mandate to evaluate the possibilities of developing offshore wind energy and to point out suitable sites.

All year round, Danish waters hold large concentrations of waterfowl, especially sea ducks, for some species in numbers representing more than half of the total world population. Denmark has thus, in accordance with international agreement, a commitment to secure satisfactory living conditions for these birds. However, the development of offshore wind parks might result in a negative impact on nature and environment.

On this background the committee recommended construction of two experimental wind parks; the first to elucidate technical and economical aspects and the second to assess ecological and environmental impact (on especially waterfowl).

Present status in Denmark

The goal of the 1996 energy plan is a total wind turbine capacity of 1.500 MW with 200 MW offshore in 2005. In 2030 the total capacity should reach 5.500 MW with 4.000 MW offshore. By year-end 1999, approx. 5,400 wind turbines are operating in Denmark with a total capacity of 1.700-1.800 MW of which 10 MW derive from offshore turbines. Even if the goal for 2005 has been reached already now, the development continues. Five offshore sites have been selected and at the moment (end 1999) impact assessment analyses are being carried out. It is expected that the first large offshore wind park of 150 MW will be erected in 2001 and be succeeded annually by another 150 MW wind park.

Offshore experimental wind parks

Vindeby

In 1991 the first experimental wind park with 11 BONUS turbines of 450 kW each were erected off Vindeby in the SE-part of Denmark. The turbines were placed at 4-8 m depth in two NW-SE going rows. The distance between rows and turbines in the rows was 300 m. The tower was 35 m and the rotor diameter 34 m giving a total height of 51 m. The experiences gathered from this project were better than expected in terms of production, technical equipment, and economy.

Tunø Knob

In the summer of 1995 ten VESTAS turbines of 500 kW each were erected at Tunø Knob within a 3-5 m depth range. The turbines were located in two N-S going rows with a distance of 400 m and 200 m between the turbines in the rows. The tower was 40 m and the rotor diameter 39 m giving a total height of 59 m.

The Tunø Knob bird study

Area description

The Tunø Knob area is a shallow water (depth 0-10 m) situated between Jutland and the islands Tunø and Samsø. The wind park was placed 6 km east of the main land, 3 km west of Tunø and 10 km west of the northern part of Samsø (Fig. 1). 400 m south of the wind park there is a 2 km W-E reef. During low tide the reef is more or less dry and birds are able to rest here for short periods. The area has been closed for the public as it has been a military shooting area since World War II. Ringebjerg Sand (control area) is a shallow water situated 14 km SE of Tunø Knob at the west coast of Samsø.

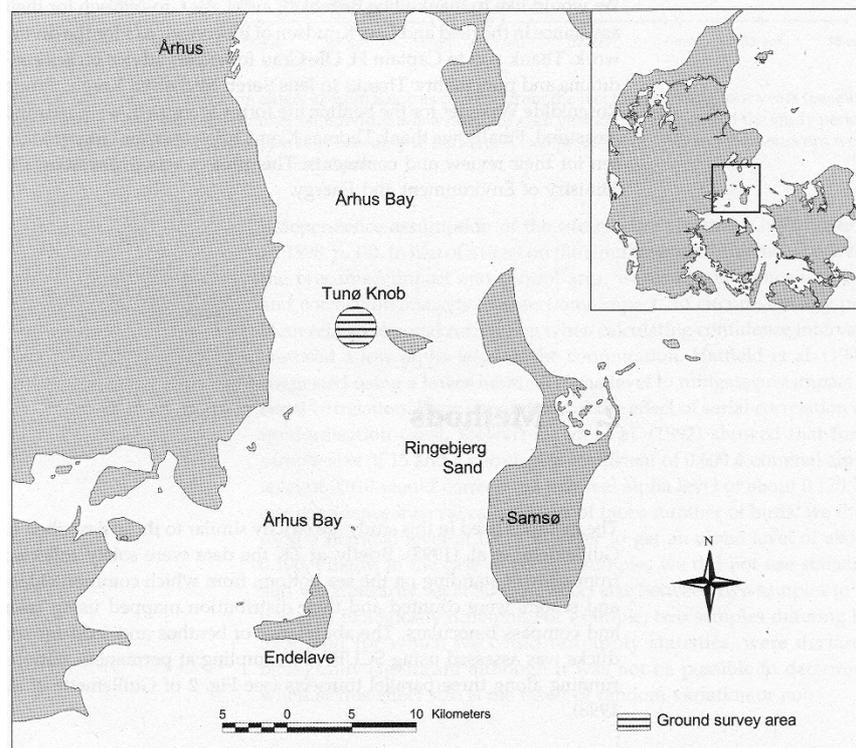


Figure 1: Tunø Knob study area.

In the Århus Bay region and in the Tunø Knob wind park area Eider *Somateria mollissima* is the most numerous wintering sea duck followed by Common Scoter *Melanitta nigra*.

Subject of study

The possible impact on birds could be:

- disturbance/scaring in combination with deterioration of the habitat
- collision risk (not analysed in this study).

Two general approaches were adopted for the investigations: the before-after-control-impact design (BACI) and *After* studies conducted around the wind park. The aim of the BACI studies was to compare bird abundance and distribution before and after the construction of the wind park and between the area presumably affected by the development and a control area. This was carried out on three spatial levels:

- aerial surveys in two larger zones (about 5.000 ha), Tunø Knob and Ringebjerg Sand, while controlling the total number of birds in Århus Bay (88.000 ha),
- ground surveys of two areas of about 700-800 ha coverage at Tunø Knob and Ringebjerg Sand, using the latter as a control area,
- within Tunø Knob using three sub-areas (160-250 ha) as control areas compared to the construction area.

The *After* experiments were conducted around the wind park with the aim of controlling the confounding effect of food supply and to establish:

- possible short-term effects of noise and rotor movements generated by the turbines on the distribution and abundance of sea ducks,
- long-term scaring effects of the wind park (the impact of revolving rotors and the presence of the standing towers).

Finally, an experiment was conducted in order to quantify any scaring effect of the wind park on flying sea ducks.

All studies were carried out during the winter period and results are reported for Eider and Common Scoter representing 97.2% of the total number of birds. The BACI investigations started in the winter before construction of the wind park (base line year = 1994-95) and extended for two years after its completion (year 2 = 1995-96 and year 3 = 1996-97). The main study period was February – April. In addition to counts and localisation of the birds in the study areas, aerial surveys were conducted to monitor the trends in regional bird numbers. Furthermore, the benthic community was sampled each year to assess variation in the potential food supply. Due to the results provided in the first three years, those parts of the study dealing with bird distribution, bird numbers, and food resources were prolonged with year 4 (1997-98).

The *After* investigations were conducted during the third winter (1996-97) from November to April and focused on the area within 600 m of the wind park.

Results

Eider numbers declined by 75% and Common Scoter by more than 90% at Tunø Knob during the period from the winter prior to construction (base line) to the third year of the study. In contrast, Eider numbers at Ringebjerg Sand and for the whole Århus Bay showed no decrease during the same period. For Common Scoter, the pattern depicted for Tunø Knob only deviated slightly from that at Ringebjerg Sand. During the same period, the biomass of Blue Mussel *Mytilus edulis*, a favourite prey species, decreased from the base line year to the third year of the study and a marked difference in the mussel sizes available was observed between Tunø Knob and Ringebjerg Sand. This was associated with a general impoverishment of the whole benthic community suggesting that the decrease observed in sea duck abundance over the three years was caused by the availability of food supply and not by the wind park (Guillemette *et al.* 1998).

If this presumption was right, the Eider should return when food resources increased again. The results from year 4 (1997-98) demonstrated an increase in food resources (Blue Mussel) and a corresponding increase in the number of Eiders. This supports the hypothesis that the Eider is dependent on and occurring in relation to food distribution and not scared of the wind park (Guillemette *et al.* 1999).

Within Tunø Knob, Eider numbers decreased markedly within the sub-area including the wind park from *Before* to *After* periods. However, a similar decline was observed in the three other sub-areas. Furthermore, detailed mapping showed a high degree of annual and seasonal variation in spatial distribution of Eiders over the area, which was not consistent with an effect caused by the wind park. These results suggest that the observed changes in abundance of Eider in the wind park were due to natural variation.

To test the impact of the wind park on flying Eiders three groups of 30 decoys each were placed at different distances from the wind park. It was found that rates of landing and flying Eiders were significantly lower 100 m from the turbines than at distances of 300 and 500 m.

No detectable effect of revolving rotors and noise on the abundance and spatial distribution of Eider was found when the turbines were switched on and off. This finding was supported by another set of observations showing that 10 flocks of Eider within 600 m of the wind park did not take off or swim away when the turbines were switched on again.

The food abundance and Eider exploitation over the entire winter were determined within four experimental quadrates (4 ha each) positioned at different distances, 0-600 m, from the wind park. The data collected showed that more than 92% of the variation in Eider numbers in these quadrates could be accounted for by food supply. Just this result suggests that the turbines had no effect on the exploitation of food resources around the wind park on a long-term scale (a whole winter).

Conclusions

The decline in the number of Eider at Tunø Knob could not be related to the presence of the wind park as no effect of the wind turbines could be detected on the abundance and the distribution of that species. Indeed, the results of benthic surveys suggest that, at an intermediate spatial scale, the observed changes in the abundance of Eiders were caused by natural variations in the food supply. Since the probability of a negative impact decreases with increasing distance from the wind park, the above interpretation is further supported by the experiments conducted in the immediate vicinity of the wind park.

Altogether these results should, however, be used with caution as the findings are only valid for wintering Eiders. It is known that the Eider is a robust species and other species may be more sensitive. Furthermore, the Eider occurred in small flocks during the study period and generally the sensitivity to disturbance increases with flock size.

The present study did not address all aspects of the potential conflict between bird life and offshore wind parks. Further information is needed about:

- other periods of the annual cycle (especially the moulting period when the birds are flightless),
- effect on other species,
- collision risk under varying weather conditions,
- effect of disturbance from maintenance ships (or helicopter),
- effect of large-scale wind parks.

References

- Guillemette, M., Larsen, J.K. & I. Clausager (1998): Impact assessment of an off-shore wind park on sea ducks. National Environmental Research Institute, Denmark. 61 pp. – NERI Technical Report No. 227.
- Guillemette, M., Larsen, J.K. & I. Clausager (1999): Assessing the impact of the Tunø Knob wind park on sea ducks: the influence of food resources. National Environmental Research Institute, Denmark. 21 pp. – NERI Technical Report No. 263.
- Miljø- og Energiministeriet, (1996): Energi 21. Regeringens handlingsplan 1996. 76 pp.

The effects of offshore windfarms on birds

Jan van der Winden⁽¹⁾, Hans Schekkerman⁽²⁾, Ingrid Tulp⁽³⁾ & Sjoerd Dirksen⁽⁴⁾

(1) Bureau Waardenburg bv, P.O. Box 365, 4100 AJ Culemborg, The Netherlands
(e-mail: j.van.der.winden@buwa.nl)

(2) Alterra, P.O. Box 23, 6700 AA Wageningen, The Netherlands
(e-mail: h.schekkerman@alterra.wag-ur.nl)

(3) Bureau Waardenburg bv, P.O. Box 365, 4100 AJ Culemborg, The Netherlands
(e-mail: i.tulp@buwa.nl)

(4) Bureau Waardenburg bv, P.O. Box 365, 4100 AJ Culemborg, The Netherlands
(e-mail: s.dirksen@buwa.nl)

Introduction

Dutch offshore areas are currently being considered as possible sites for future windfarms (Anonymus 2000). Offshore areas can hold high numbers of seabirds throughout the year and large numbers of waterbirds and terrestrial birds migrate over sea (e.g. Camphuysen & Leopold 1994, Camphuysen & Van Dijk 1983, Lensink & Van der Winden 1997). Wind turbines can affect birds in three ways. Birds may collide with the turbines, the turbines may cause disturbance of birds in resting or feeding areas, and/or, they may block migration routes or daily flight paths. In general, collision risks are highest at night, in particular during dark nights and bad weather conditions (Winkelman 1992a, 1992b). In terrestrial habitats, the collision risk is rather low, with a range of 4-20 birds per turbine per year (e.g. Winkelman 1992a), mainly because birds change their flight path at a distance or turn away just before the turbines (Winkelman 1992b, 1992c). Whether this also holds true for nocturnal flights in offshore areas, is not well known. In addition, the effect of wind farms on nocturnal flight behaviour in offshore areas is little known, especially in the light of disturbance of flight paths of sea birds. This paper deals with two studies aiming at filling some of these gaps in knowledge: a study on flight behaviour of diving ducks approaching a semi-offshore windfarm and a study on flight behaviour of sea ducks at an offshore windfarm. Based on these studies, the paper ends with recommendations for further research.

Study areas and methods

Lake IJsselmeer (a fresh water lake of 1800 km²) is well known for its large numbers of diving-ducks (e.g. Slager 1987, De Leeuw 1997). Activity patterns and flight altitudes of local movements of diving-ducks (Tufted Duck *Aythya fuligula* and Pochard *A. ferina*) in Lake IJsselmeer were studied during February-March 1995, February-March 1997 and November-January 1997/1998. This was followed by a case-study on nocturnal flight behaviour near a line of four middle-sized (500 kW) wind turbines situated in between inshore resting areas and offshore feeding sites of diving-ducks in Lake IJsselmeer during the winters of 1995/1996, 1996/1997 and 1997/1998. In the second study, nocturnal flight behaviour of Eider ducks was studied near the Tunø Knob windfarm in Denmark. This windfarm was built in 1994, 7 km offshore in the Kattegat, and consists of ten 500 kW turbines in two parallel 800-m long rows of five turbines at 400 m from each other. Large numbers of Eiders (*Somateria mollissima*) and small numbers of Common Scoters (*Melanitta nigra*) spend the winter in the vicinity of this site. A study of potential disturbance effects of this windfarm was undertaken by researchers of the Danish National Environmental Research Institute (NERI, Guillemette *et al.* 1998). This study comprised only the daylight period. As collision risks are largest in twilight and darkness, Bureau Waardenburg and Alterra, in close co-operation with NERI, studied nocturnal flight activity of sea ducks near this wind farm in the winter of 1998/1999. Using radar observations, visual observations and surveys from an observation tower located close to the farm, as well as ship-based radar and visual observations, data were collected on the nature and intensity of nocturnal flight activity of Eiders in the vicinity of the farm. We used a Furuno FR 8050 ship radar for the observations of flight paths (*cf.* Cooper *et al.* 1991, Dirksen *et al.* 1996). Observations were made during both moonlit and moonless nights. In both studies, the observations covered the entire period during darkness in which birds passed between feeding and resting areas.

For further methodological information we refer to the original reports and papers from these projects: Spaans *et al.* (1998), Van der Winden *et al.* (1996), Tulp *et al.* (1999).

Results

Nocturnal flight patterns of diving ducks near a semi-offshore wind farm in Lake IJsselmeer

This work was done in two parts. A first series of observations was carried out during six nights in 1995/1996. In November 1995, 400-600 Tufted Ducks and Pochards roosted along the dike opposite the wind farm during the day at distances of 500-1500 m from the turbines. In March 1996, there were 600-800 birds present. The ducks were equally distributed along the dike, suggesting that the wind farm did not disturb the ducks at these distances. This

result corresponds with the findings of Winkelman (1992d), who found a disturbance distance of up to 150 m for diving-ducks in Lake IJsselmeer. Birds mainly flew to the feeding grounds after dusk and returned to the roosts just before dawn. So, most flight movements occurred during darkness, just as in a situation without turbines.

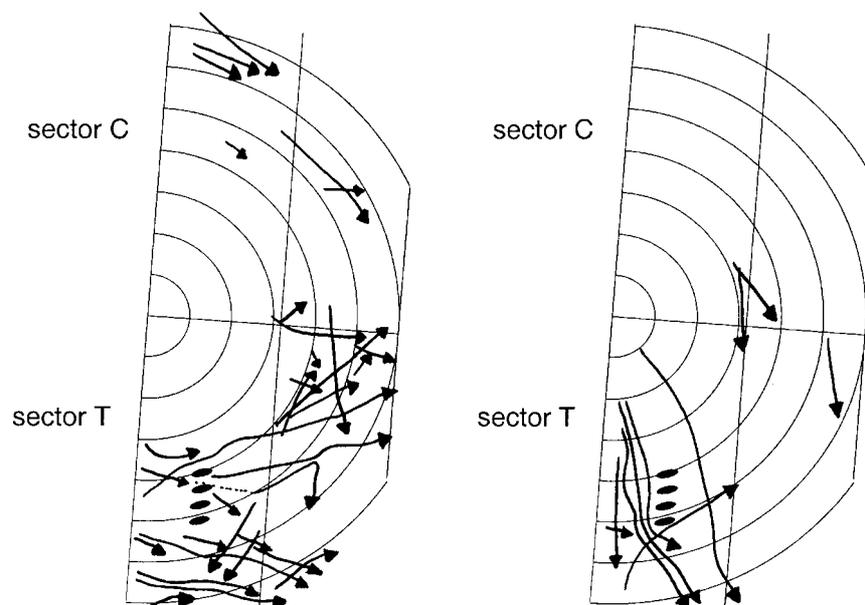


Fig. 1: Examples of flight paths of Tufted Ducks and Pochards near a line of four wind turbines (ovals) in a semi-offshore situation, observed with marine surveillance radar. Left: moonlit night (29 March 1996), right: moonless night (23 November 1995).

During moonlit nights, we recorded twice as many echoes in the turbine sector (T, Figure 1) as in the equally-sized control sector (C, Figure 1; 202 against 114). The reverse was seen during moonless nights (turbine sector 40 echoes, control sector 81 echoes). In both types of night, the main flights were perpendicular to the dike (moonlit nights 84% perpendicular to the dike, 16% parallel to the dike; moonless nights 69% and 31%, respectively). In the control sector, the proportion of flights perpendicular to the dike did not differ between moonlit and moonless nights (81% and 73%, respectively, X2 test, n.s.). In the turbine sector, however, the proportion of flights perpendicular to the coast differed significantly in relation to the phase of the moon (moonlit nights 87%, moonless nights 60%, X2 test, $P < 0.001$).

The birds passed the line of wind turbines in various ways (Figure 1). Most birds passed it on the outer side, both during moonlit (82%, $N = 103$) and moonless nights (73%, $N = 11$). During moonless nights, only 9% of the birds crossed the line by passing between the turbines (against 18% in moonlit nights), whilst 18% turned away from the turbines (against

0% in moonlit nights). The differences in flight distribution between moonless and moonlit nights are statistically significant (Kruskal-Wallis test, $P < 0.001$).

The second series of observations was carried out during eight nights in early 1997 and the winter 1997/1998. The general pattern of occurrence of resting groups and their flight behaviour was comparable. Numbers of Tufted Duck were high in February/March 1997 (up to 3100), when they were accompanied by a maximum of 2500 Scaup. During December – January 1997/1998 numbers of Tufted Duck were lower (max. 1340), with some tens of Pochard and without Scaup being present. Table 1 presents the data on the number of flight movements during darkness in the two sectors

Tab. 1: Numbers of flight movements (radar echo trails detected) during darkness in each sector, divided over directions (parallel to dike, perpendicular to dike).

	Turbine-sector		Control-sector		T:C
	parallel	perpen- dicular	parallel	perpen- dicular	total
<i>new moon (4 nights)</i>					
total	241	239	174	181	1,4
% of total	50%	50%	49%	51%	
<i>full moon (4 nights)</i>					
total	634	280	576	331	1,0
% van total	69%	31%	64%	36%	

At full moon more parallel than perpendicular flight movements were established in both sectors (T-sector: $X^2 = 49.4$; C-sector: $X^2 = 22.2$, both $p < 0.001$). Table 2 presents a more detailed analysis of the flight behaviour of groups flying within 500 m of the windturbine line. On their way to the feeding grounds, the ducks have to cross this line, either between the turbines or outside (but only in Table 2 when doing so within 500 m of the outer turbines).

Tab. 2: Flight movements (radar echo trails detected) within 500 m of the windturbines: flight path directions in relation to the way the line of the turbines is crossed.

	T: between over turbines	L: along turbines	A: along after redirecting	O: not crossing	total
<i>full moon (parallel to line of turbines)</i>					
subtotal	1	48	9	68	126
% of subtotal*	2%	83%	16%		
<i>full moon (perpendicular to line of turbines)</i>					
subtotal	14	95	16	43	168
% van subtotal*	11%	76%	13%		
total full moon	15	143	25		
	8%	78%	14%		
<i>new moon (parallel to line of turbines)</i>					
subtotal	1	15	14	36	66
% of subtotal*	3%	50%	47%		
<i>new moon (perpendicular to line of turbines)</i>					
subtotal	9	73	13	35	130
% van subtotal*	9%	77%	14%		
total new moon	10	88	27		
	8%	70%	22%		

* without category O (not crossing).

Within the movements parallel to the dike and the line of turbines there is a difference between full moon and new moon nights: at full moon, 16% of the echoes crossing the line redirected its flight path because of the turbines, while 47% did so at new moon. Always only low numbers crossed the line of turbines between two turbines. This can be shown to be proportionally low. The total length of the line through which the crossings were sampled is 1600 m (3 * 200 m between turbines, 2 * 500 m outside). The line of turbines is 37.5% of this length. Both at full and new moon only 8% of all crossings was between two turbines, which is significantly lower than to be expected when crossings would be randomly divided (full

moon: $X^2 = 67.9$; new moon: $X^2 = 46.7$, both $p < 0.001$). This is another indication of active avoidance of crossing the windfarm between turbines by flying around the line of turbines.

Nocturnal flight patterns of Eider ducks near a semi-offshore wind at Tunø Knob

Eiders showed nocturnal flight activity both in situations with and without turbines. Most flights were relatively short (max. 1 km) and occurred within the feeding area and between feeding and resting areas. Flight activity occurred throughout the night and the intensity was predominantly determined by (moon)light conditions. In the absence of moonlight, flight activity was lower than during twilight. When the moon was out, nocturnal flight activity was 3-6 times as high as in nights without moon, and comparable to the activity during dusk. During dusk and at night, flight activity in the vicinity of the farm was lower than away from the farm. This effect was noticeable up to a distance of 1000-1500 m from the nearest turbine and increased in strength closer to the farm. The effect was strongest in moonlit nights, small during dusk and non-existent at dawn. We tentatively interpret these effects to be the result of active avoidance behaviour by the Eiders, rather than a passive reflection of feeding distribution.

Within the farm sector (windfarm plus the area up to 500 m outside the farm) more groups of Eiders flew along the outside of the farm than through the farm compared to expectations based on the farm's dimensions. Groups approaching perpendicularly to the longitudinal axis of the farm crossed the farm less often than groups approaching the farm parallel to the long axis. Although conditions for birds approaching from both directions differed, this seems to indicate that Eiders prefer to fly through an opening of 400 m rather than one of 200 m. The proportion of groups flying through the farm was similar under different light conditions. Seven percent of all movements changed track when approaching the farm. Most changes of track occurred under moonlit conditions.

Common Scoters were also nocturnally active. Their movements concerned short displacements within the feeding area. Nocturnal flight activity was more intense under moonlit conditions than under dark conditions. In these aspects Common Scoters resembled Eiders.

Discussion

The results of our studies may provide some tools for planners of wind farms in (semi)-offshore areas. Most local daily movements of feeding and resting waterbirds are below a height of 100 m, both during the day and at night (e.g. Van der Winden *et al.* 1999). The same results were found for other species groups on land by Winkelman (1992b, 1992c). We

therefore believe that local movements of birds are predominantly at present-day wind turbine heights, irrespective of species and landscape. In contrast, the flight altitude of birds during seasonal migration may vary between one metre and several kilometres. On average, nocturnal migrants fly higher than diurnal migrants. The former are therefore assumed to have a lower risk of colliding with wind turbines than birds flying during darkness between feeding and roosting areas. However, waders passing the Dutch coast during spring migration with head winds can continue their migration at low altitudes during the late evening and at night (Dirksen *et al.* 1996). In spring 1997, along the Afsluitdijk between the provinces of Noord-Holland and Friesland, we observed comparable behaviour by waders, gulls and thrushes on migration. Buurma & Van Gasteren (1989) came to the same conclusion for nocturnal autumn migrants of various species tracked by radar at night at Hoek van Holland. These observations indicate that in semi-offshore situations seasonal migrants may also migrate at wind turbine heights at night.

Our observations on the nocturnal movements of Tufted Ducks, Pochards and Eiders near (semi)-offshore windfarms suggest that these ducks either see or are otherwise aware of the turbines. During moonless as well as dark nights, birds avoided crossing the wind farm by flying around the farm when approaching the turbines. These observations suggest that local wintering ducks can cope rather well with wind turbines in semi-offshore situations, leading to a lower collision risk than expected when no evasive behaviour would be shown. Winkelman (1992b, 1992c) came to the same conclusion for land birds in a terrestrial situation. It is possible that habituation plays an important role in local wintering birds. Whether migrants passing a wind farm react in the same way remains therefore uncertain. The nocturnal behaviour of the ducks indicate, however, that a line of turbines can act as a flight path barrier for birds when the line is perpendicular to the flight path between the feeding and roosting areas. This may in particular be a problem when turbine lines are long compared to the distance between feeding and resting areas. By interrupting long lines the barrier effect can probably be diminished, because birds can take alternative routes to their feeding or resting areas. This should be taken into account by the planning of wind energy projects in such situations. The results of this study can be applied in making decisions about wind farms in the North Sea. A study on the local situation, however, remains crucial to be able to apply the results from the study in Denmark in the right way. Knowledge on the local flight patterns during the night and the location of roosting and feeding areas of sea ducks is essential to evaluate and minimise risks.

Recommendations for further research

For offshore windfarms in the North Sea and the Baltic Sea, collisions, flight path barrier and disturbance effects are potential risks for birds. Collision risks may apply especially to seasonal migration, local seabirds and for breeding seabirds that feed at sea. Flight path barriers may arise if wind farms are large or long (lines) and this might affect local feeding and resting birds. It is unknown if turbines act as barriers for migrating birds. Finally wind turbines may disturb resting or feeding seabirds.

In contrast to terrestrial habitats, still little information is available about the possible effects of turbines on birds in offshore situations. Some basic information is necessary for sound planning of offshore windfarms.

For sufficient knowledge on collision risks information is needed about densities of migrating birds at wind turbine altitudes. Apart from that, information is needed about collision risks in offshore situations. In both cases both method development and data collection are still urgently needed.

For sufficient insight in flight path barrier effects, research is needed on flight behaviour of local resting and feeding birds as well as migrants in situations with and without wind turbines. Examples of this research type on diving ducks and Eider Ducks are presented in this paper. Especially information is needed from windfarms of various sizes and designs.

A first study of disturbance effects of wind turbines was conducted at Tunø Knob. This study showed no clear disturbance effects on feeding Eider Ducks during daytime (Guillemette *et al.* 1998). This type of study with a BACI setup, has to be replicated for more situations and other species, both during day and night. In this case also studies at larger windfarms are needed.

Acknowledgements

The studies were financed by Novem, on behalf of the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. The studies in Denmark were in close cooperation with the Danish National Environmental Research Institute (NERI), where we especially thank Ib Clausager and Jesper Kyed Larsen for their logistic support and contribution in the field work. We also thank Leo M.J. van den Bergh for his contribution to the various important aspects of fieldwork. Various organizations and people were of great help by informing us on specific locations, assisting in the field, giving permits for their properties.

References

- Anonymus (2000): Milieu-Effectrapport locatiekeuze demonstratieproject Near Shore Windfarm. Ministerie van Economische Zaken & Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 's Gravenhage.
- Buurma, L.S. & H. van Gasteren (1989): Migratory birds and obstacles along the coast of the Dutch province of South Holland: radar observations from Hoek van Holland and victims of the electric power line over the Maasvlakte compared, also in relation to the allocation of windturbines. The Hague: Koninklijke Luchtmacht.
- Camphuysen, C.J. & M.F. Leopold (1994): Atlas of seabirds in the southern North Sea. IBN Research Report 94/6, NIOZ-Report 1994-8, Institute for Forestry and Nature Research, Dutch Seabird Group and Netherlands Institute for Sea Research, Texel.
- Camphuysen, C.J. & J. van Dijk (1983): Zee- en kustvogels langs de Nederlandse kust, 1974-79. *Limosa* 56: 81-230.
- Cooper, B.A., Day, R.H., Ritchie, R.J. & C.L. Cranor (1991): An improved marine radar system for studies of bird migration. *J. Field Ornithol.* 62: 367-377.
- De Leeuw, J.J. (1997): Demanding divers. Ecological energetics of food exploitation by diving ducks. Ph.D. thesis. University of Groningen, Groningen. Van Zee tot Land 61, Rijkswaterstaat, Directorate IJsselmeergebied, Lelystad.
- Dirksen, S., Spaans, A.L. & J. van der Winden (1996): (Nocturnal migration and flight altitudes of waders at the IJmuiden northern breakwater during spring migration). *Sula* 10: 129-142.
- Lensink R. & J. van der Winden (1997): Trek van niet-zeevogels langs en over de Noordzee: een verkenning. Rapport nr. 97.023, Bureau Waardenburg bv, Culemborg.
- Guillemette, M., Larsen, J.K. & I. Clausager (1998): Assessing the impact of the Tunø Knob wind park on sea ducks: the influence of food resources. NERI Technical Report No. 263. National Environmental Research Institute, Kalø.
- Slager, B. (1987): De beschikbaarheid van driehoeksmosselen (*Dreissena polymorpha*) voor duikeenden in het IJsselmeergebied. Lelystad: Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.
- Spaans, A.L., van der Winden, J., van den Bergh, L.M.J. & S. Dirksen (1998): Vogelhinder door windturbines. Landelijk onderzoekprogramma, deel 4: nachtelijke vliegbewegingen en vlieghoogtes van vogels langs de Afsluitdijk. Bureau Waardenburg report 98.015. Culemborg: Bureau Waardenburg / Wageningen: Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN-DLO).
- Tulp, I., Schekkerman, H., Larsen, J.K., van der Winden, J., van de Haterd, R.J.W., van Horssen, P., Dirksen, S. & A.L. Spaans (1999): Nocturnal flight activity of sea ducks

near the windfarm Tunø Knob in the Kattegat. Bureau Waardenburg bv, Institute for Forestry and Nature Research (IBN-DLO) and National Environmental Research Institute (NERI). Bureau Waardenburg report 99.64, Culemborg.

Van der Winden, J., Dirksen, S., van den Bergh, L.M.J. & A.L. Spaans (1996): Nachtelijke vliegbewegingen van duikeenden bij het Windpark Lely in het IJsselmeer. Bureau Waardenburg report 96.34. Culemborg: Bureau Waardenburg / Wageningen: Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN-DLO).

Van der Winden, J., Spaans, A.L. & S. Dirksen (1999): Nocturnal collision risks of local wintering birds with wind turbines in wetlands. *Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz* Band 4: 33-38.

Winkelman, J.E. (1992a-d): De invloed van de Sep-proefwindcentrale te Oosterbierum (Fr.) op vogels, 1-4: aanvaringslachtoffers, nachtelijke aanvaringskansen, aanvliegedrag overdag, verstoring (with summaries). RIN-report 92/2-5. Arnhem: Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN-DLO).

Offshore-Windenergie – Technik und Potentiale

Gerhard Gerdes & Knud Rehfeldt

Deutsches Windenergie-Institut, DEWI, Ebertstr. 96, D-26382 Wilhelmshaven, Germany

Einleitung

Offshore-Windparks sind, obwohl allgemein breit diskutiert, bislang noch auf wenige Projekte beschränkt. Sie besitzen im wesentlichen Demonstrationscharakter und dienen der Erprobung der Technik im technologisch sehr anspruchsvollen Bereich der Anwendung im Meer. Diese Projekte befinden sich bislang ausschließlich in unmittelbarer Nähe der Küste; sie sind zwar technologisch wegweisend, demonstrieren aber erst eine Vorstufe zur Nutzung der Windenergietechnologie im eigentlichen Offshore-Bereich, fernab der Küsten. Die Entwicklung von Windenergieanlagen (WEA), die speziell für den Betrieb auf See ausgelegt sind, steht erst am Anfang. Die Erschließung von Gebieten auf See fernab der Küsten birgt enorme Potentiale, wenn die ökologischen, wirtschaftlichen und technischen Fragen sowie die Fragen der Konfliktnutzung geklärt werden können.

Bei der Betrachtung der Nutzungen im Meer lassen sich küstennahe und küstenferne Nutzungen mit den Begriffen Inshore und Offshore trennen. Mit Inshore sind Bereiche in einer Entfernung bis zu 10-15 km gemeint, mit Offshore die sich daran anschließenden küstenferneren Bereiche.

Technik von Offshore-Windparks

Wie einleitend erwähnt, sind Realisierungen von Windenergievorhaben derzeit noch auf wenig Projekte beschränkt. Man kann daher derzeit noch nicht von einem allgemeinen technischen Stand der Offshore-Windenergienutzung sprechen; zu sehr herrscht bei diesen wenigen Projekten noch der Demonstrationscharakter vor. Im Folgenden wird daher die derzeitige Offshore-Technik an einem Beispiel erläutert, dem dänischen Projekt Tunø Knob.

Beispiel Tunø Knob

Das Projekt „Tunø Knob Wind Farm“ liegt in der Ostsee, in einer Entfernung von ca. 6 km zum Festland und 3 km zur Insel Tunø Knob. Die Wassertiefe im Bereich des Windparks

beträgt 3.1 m bis 4.7 m. Die Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe der installierten Windenergieanlagen liegt bei 7.9 m/s (Aubrey 1997).

Das Projekt wurde als Demonstrationsvorhaben mit einer Gesamtleistung von 5MW konzipiert. Ziele war neben der technischen und wirtschaftlichen Demonstration die exemplarische Untersuchung von Einflüsse der Offshore-Windenergienutzung auf Umwelt, Avifauna und Landschaftsbild. Von besonderem Interesse hierbei war die Auswirkung auf Habitat- und Brutverhalten von Vögeln (Aubrey 1997).

Tunø Knob , Technische Daten

Der Windpark besteht aus 10 Windenergieanlagen vom Typ Vestas V 39 mit einer Leistung von je 500kW und einer Nabenhöhe von 43 m. Das Fundament ist ein sogenanntes Gewichtsfundament aus Stahlbeton, ausgeformt als Hohlzylinder mit einem Durchmesser von 10 m bei einer Höhe von 8 m. Das Gewicht beträgt leer 1000 t; nach Positionierung des Fundamentes wurde eine Füllung des Hohlzylinders mit 500 t Sand vorgenommen, so daß das Gesamtgewicht 1500 t beträgt. Netzanschluß und Verkabelung der Anlagen erfolgen auf einer 15 kV-Mittelspannungsebene. Die einzelnen WEA sind mit einer Ringverkabelung auf 10 kV-Ebene zusammengeschlossen; die Länge des Ringes beträgt insgesamt 2.5 km. Der Anschluß an das Energieversorgungsnetz des Festlands erfolgt mit einer 6 km langen 10 kV-Leitung an eine 60/10kV-Umspannstation an der Küste. Das Kabel ist in einer Tiefe von 1m im Seeboden verlegt. Der bisherige Ertrag des Windparks übertrifft die Energieproduktion einer entsprechenden Onshore-WEA gleichen Typs um das 1.5- bis 2-fache.

Unterschiede der Offshore-WEA zu Onshore-WEA, Tunø Knob

Die im Windpark Tunø Knob installierten WEA entsprechen im Wesentlichen dem ursprünglich für Onshore-Installation ausgelegten Anlage Vestas V 39. Die Unterschiede bestehen in einer Änderung der Betriebsart sowie einiger konstruktiver Merkmale. Die Drehzahl der WEA wurde um 10 % gegenüber der Onshore-Anlage erhöht, um eine effektivere Ausnutzung der auf See vorherrschenden höheren Windgeschwindigkeit zu erreichen. Die Technik der WEA wurde dahingehend verändert, daß Transformator und Schaltanlagen im Turm untergebracht sind und ein Kran zum Heben schwerer Maschinenkomponenten in die Gondel integriert wurde. Ein hochgesetzter Eingang verhindert das Eindringen von Wasser und Eis. Der Korrosionsschutz der Anlage wurde wesentlich verbessert um den beträchtlich höheren Anforderungen auf See zu entsprechen. Ein grauer Anstrich dient zur Verringerung der visuellen Wirkung des Windparks.

Vergleich der Technik von Offshore- und Onshore-WEA und zukünftige Technologie

WEA müssen für den Betrieb auf See bezüglich Technik und Konstruktion den stärkeren Windverhältnissen und extremen Umweltbedingungen angepaßt werden. Um eine bessere Ausnutzung der höheren Windgeschwindigkeiten zu erreichen werden Offshore-WEA für eine höhere Leistung pro Rotorfläche ausgelegt.

Für den wirtschaftlichen Betrieb auf See ist die Steigerung von Nennleistung und Rotor Durchmesser unabdingbar. Während an Land derzeit bereits WEA mit einer Leistung von 1 bis 1,6 MW vielfach aufgebaut werden, wird die Anlagengröße auf See – folgt man den Aussagen von Herstellern und Planern – mindestens 2,5 MW, möglichst jedoch 5 MW betragen. Die Vorteile der größeren Anlagen liegt in der gravierenden Verringerung von Infrastrukturaufwand (Fundamentierung, Netzanbindung) und - vor allem – Betrieb der Anlagen. Der Aufwand für den Zugang zu den Anlagen, gerade bei bewegter See, ist beträchtlich desgleichen die Anlieferung von Ersatzteilen und Entsorgung von Altteilen. Je geringer dieser Aufwand ausfällt, um so größer ist die Chance für einen wirtschaftlichen Betrieb.

Im Hinblick auf die Verringerung von Lasten auf Rotor, Antriebsstrang und letztlich die gesamte Konstruktion werden die WEA auf See ganz oder teilweise drehzahlvariabel sein und zur effektiven Regelung der Rotorleistung über eine Blattwinkelregelung verfügen.

In die Rotorgondel eingebaute Kräne werden den Einsatz von Schwimmkränen für Reparaturen an Hauptkomponenten wie Generatoren und Getrieben beträchtlich verringern.

Fundamente

Von der Technik der Fundamentierung von Bauten oder Plattformen im Bereich der Meere sind drei Verfahren für die Aufstellung von Offshore-WEA möglich: als Gewichtsfundamente, Pfahlgründungen und Dreibeingestelle. Angewandt wurden bislang Gewichtsfundamente und Pfahlgründungen.

Gewichtsfundament als Senkkasten

Gewichtsfundamente (Abb. 1) sind großvolumige Hohlkörper aus Beton, deren Abmaße durch das erforderliche Gewicht und die Wassertiefe bestimmt werden. Sie werden an Land oder auf künstlichen Inseln im Flachwasserbereich gebaut um anschließend mit Schiffen – z.B. nach Fluten der künstlichen Insel – an den geplanten Aufstellungsort geschleppt zu werden. Das Versenken des hohlen Fundaments erfolgt dann durch Verfüllung mit Sand oder Beton.

Das Gewichtsfundament benötigt einen ebenen Untergrund, auf dem es nach dem Versenken aufgrund seines großen Gewichts sicher ruht. Da die installierten WEA große Kippmomente in das Fundament einleiten und die Stabilisierung ausschließlich über Schwerkraft erfolgt, sind die Gewichtsfundamente nur für Wassertiefen bis etwa 10 m geeignet. Bei größeren Tiefen werden die für die sichere Aufstellung erforderlichen Massen zu groß für eine sinnvolle, wirtschaftliche Installation.

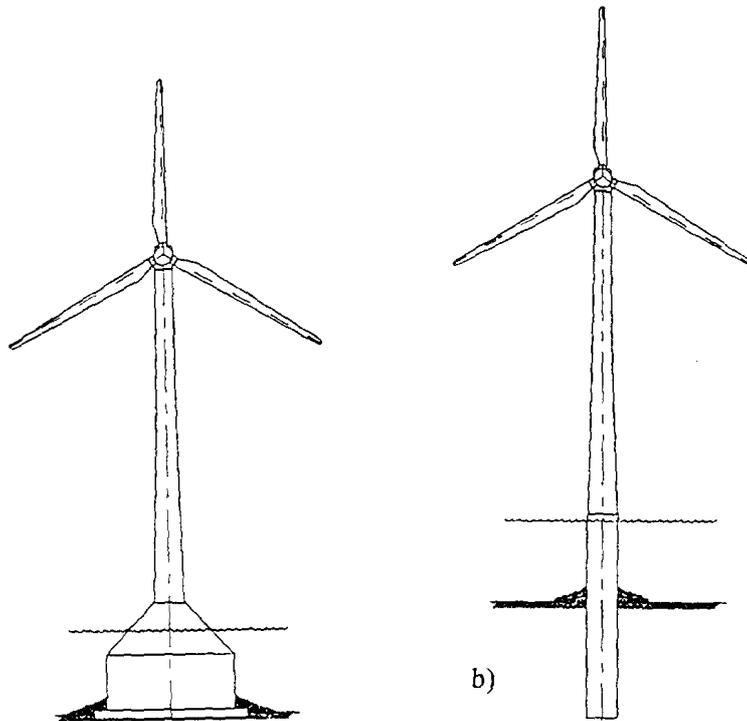


Abb. 1: Gewichtsfundament (links) und Monopile (rechts). (Diedrichs *et al.* 1995)

Einpfehlgründung (Monopile)

Das Fundament der Einpfehlgründung (Abb. 1 b) besteht aus einem Pfahl, der tief in den Untergrund eingebracht wird; die Tiefe im Boden richtet sich nach der Tiefe in der sich die sandführenden Schichten befinden. Pfehlgründungen sind im Bereich der Windenergienutzung in Küstengebieten an Land weit verbreitet; bei Vorhaben in Marschgebieten werden Pfehltiefen bis zu 30 m benötigt.

Der Pfahl des Monopiles besteht aus einem einfachen Rohr, in der Regel aus Stahl. Dieser Pfahl kann auf verschiedene Weise in den Untergrund eingebracht werden, durch Bohrung, Rammung oder Spülung in den Meeresboden. Welches Verfahren auf See am effektivsten und gleichzeitig ökologisch am verträglichsten ist, ist derzeit noch ungeklärt.

Dreibein-Fundamente (Tripod)

Das Dreibeinfundament (Abb. 2) besteht aus einer relativ aufwendigen Konstruktion, die die am Turmfuß angreifenden Kräfte auf drei weit gespreizte Verankerungen am Boden über

trägt. Die drei Füße des Fundaments sind durch relativ kurze Pfähle im Boden verankert. Der Tripoid wird vermutlich in der Regel an Land gebaut werden, wird dann per Schiff zum Aufstellungsort transportiert und dort auf den Meeresboden abgesenkt. Der Nachteil des Tripoids besteht in seiner relativ aufwendigen Konstruktion, der Vorteil in der einfachen Installation vor Ort sowie in einem vereinfachten Rückbau der Konstruktion.

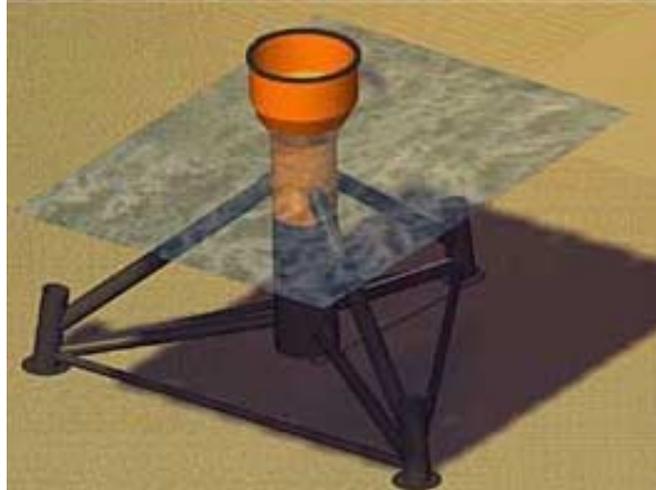


Abb. 2: Dreibeinfundament.

Wahl der Fundamente

Bis zu einer Wassertiefe von 10m kommen aus Kostengründen zunächst Gewichtsfundament in Frage, Monopile- oder Dreibein-Fundamente sind aber ebenfalls möglich. Bei Wassertiefen größer als 10m werden Gewichtsfundamente zu schwer und somit zu unwirtschaftlich.

Dreibeinfundamente verfügen über die aufwendigste Konstruktion, ihre Einbringung auf flachem Meeresboden wird jedoch als wesentlich einfacher als bei den anderen Fundamentarten angesehen. Das Absenken der Fundamente erfordert beispielsweise geringere Zeiten als die Einpfahlgründung, was auf bewegter See sicherlich von Vorteil ist.

Die Einpfahlgründung ist die einfachste Fundamentart, deren Einbringung auf See jedoch aufwendig ist und bei der die ökologisch verträglichste Art der Einbringung noch zu prüfen ist. Derzeit wird die Einpfahlgründung, nicht zuletzt wegen der großen Erfahrung mit Pfahlgründungen im Windenergiebereich, als wahrscheinlichste Fundamentierung im Offshore-Bereich angesehen.

Netzanschluß

Der Netzanschluß spielt eine zentrale Rolle für die Wirtschaftlichkeit von Offshore-Vorhaben. Die Übertragung großer Leistungen über lange Strecken verursacht erhebliche elektrische Verluste und birgt hohe Kosten der Verlegung von Seekabeln. Die flachen Zonen der Meere bergen immense Potentiale für die Offshore-Windenergie, die jedoch durch große Entfernungen zum Land und die damit einhergehenden Transportprobleme nur begrenzt erschließbar sind.

Für die Anbindung der Offshore-Windparks an das elektrische Netz an Land stehen prinzipiell verschiedenen Optionen zur Verfügung. Im Bereich der Entfernungen kleiner 10-15 km zur Küste besteht die Möglichkeit der Anbindung auf der Mittelspannungsebene bei Leistungen kleiner 200 MW. Für größere Entfernungen und/oder höhere Leistung muß die Anbindung auf Hochspannungsebene erfolgen. Hierbei ist zwischen der Wechselspannungs- und Gleichspannungsanbindung zu unterscheiden. Der Vorteil der Wechselspannungsübertragung ist die mögliche direkte Anbindung an das Energieversorgungsnetz an Land sowie eine übliche Umspannstation im Windpark. Der Nachteil ist die aufwendigere Verlegung von drei Kabeln oder einem dreiadrigen Kabel sowie höhere Verluste der Übertragung.

Die Hochspannungs-Gleichspannungs-Übertragung (HGÜ) erfordert eine aufwendige Gleichstrom/Wechselstromwandlung im Windpark und an Land. Die Verlegung von nur zwei Kabeln und die geringeren elektrischen Verluste bedeuten für größere Entfernungen jedoch einen Vorteil gegenüber der Wechselstromübertragung; dies zeigt der in Tabelle 1 aufgeführte Vergleich.

Die Wechselspannungsübertragung erzeugt aufgrund des kapazitiven Charakters der 3-phasigen Kabel Blindleistung, die mit zunehmender Länge beträchtliche elektrische Verluste erzeugt. Die Entwicklung von nach außen tretenden Magnetfeldern kann in beiden Fällen, der 3-phasigen Wechselspannungs- und der zweipoligen Gleichspannungsübertragung, vermieden werden, wenn die einzelnen Kabel jeweils in geringem Abstand zueinander verlegt werden.

Tabelle 1: Verluste in der Wechsel- und Gleichspannungsübertragung. Fall AC: Wechselspannungsleitungen mit 3 Phasen und Kompensation an beiden Leistungsenden. Fall DC: Hochspannungsgleichstromübertragung unter Berücksichtigung zusätzlicher Verluste von 2% durch Gleich-Wechselrichtung sowie Transformatorverlusten (Quelle: BMBF: Offshore-Windenergiesysteme).

Leitungslänge Wirkungsgrad	20 km	50 km	100 km
Fall AC	0,88	0,70	0,40
Fall DC	0,93	0,87	0,84

Mögliche Potentiale

Wie eingangs erwähnt lassen sich küstennahe und küstenferne Nutzungen mit den Begriffen Inshore und Offshore trennen. Die im Inshore-Bereich (maximal 10 - 15 km Entfernung zur Küste) zur Verfügung stehenden Potentiale sind wesentlich einfacher zu erschließen als die Offshore-Potentiale: die Entfernung zur Küste ist relativ gering, die Wassertiefen ebenfalls. Allerdings stehen in diesen Bereichen nur begrenzte Potentiale zur Verfügung, unter anderem schränken Naturschutzgebiete (Nationalparks), Verkehrs- und Fischereigebiet die Nutzung sehr ein. Die Konflikte mit konkurrierenden Nutzungen, Natur- und Umwelt (z.B. Landschaftsbild) werden für Inshore-Projekte ähnlich sein wie für Projekte an Land.

Für Pilotvorhaben bieten sich Inshore-Standorte an, da die technischen Risiken, die die "Offshore-Technik" derzeit aufgrund fehlender Erfahrungen noch hat, im küstennahen Bereich besser gehandhabt werden können. Zudem wird die Wirtschaftlichkeit der ersten Projekte noch bedeutend schlechter sein als die zukünftiger Projekte, wenn sich die Preise der neuen, großen WEA-Klassen verringert haben und durch größere Erfahrung in der Offshore-Windenergie-Technik die spezifischen Kosten für Fundamentierung und Netzanbindung sinken. Für die ersten Vorhaben werden daher kurze Entfernungen zum Land und geringe Wassertiefen notwendig sein.

Im eigentlichen Offshore-Bereich, in Entfernungen größer als 10-15 km zur Küste, gibt es vergleichsweise immense Potentiale für die Windenergienutzung. Weitgehend ungeklärt sind jedoch mögliche Konflikte mit konkurrierenden Nutzungen, Natur- und Umwelt. Die Anforderungen an die Technik der Anlagen und an kostengünstige Verfahren zur Fundamentierung und Netzanbindung sind hoch. Sollte der Offshore-Bereich sich jedoch erschließen lassen so lassen sich Beiträge zur elektrischen Energieversorgung erzielen, die enorm sind.

Wassertiefen, Deutschland - Dänemark

Offshore-Technik in der Deutschen Bucht bedeutet Wassertiefen größer als 10 m. Dies wird an der Darstellung in Abbildung 3 deutlich; es zeigt den Verlauf der Wassertiefe in der Deutschen Bucht in Entfernung zur ostfriesischen (Niedersachsen) und nordfriesischen (Schleswig-Holstein) Küste. Wenn sich durch eine fortschreitende Entwicklung in der Offshore-Windenergie-technik Projekte in Wassertiefen größer als 20 m wirtschaftlich realisieren lassen, ergeben sich enorme Potentiale für die Offshore-Windenergienutzung.

Welche Potentiale allein im Bereich bis zu 30 km von der Küste erschließbar sind zeigt Abbildung 4. Bei einer Wassertiefe bis zu 40 m wäre ein Potential von etwa 250 TWh zu realisieren, mit dem theoretisch bereits mehr als die Hälfte des Stromverbrauchs der Bundesrepublik Deutschlands (ca. 430 TWh/a) zu decken wäre.

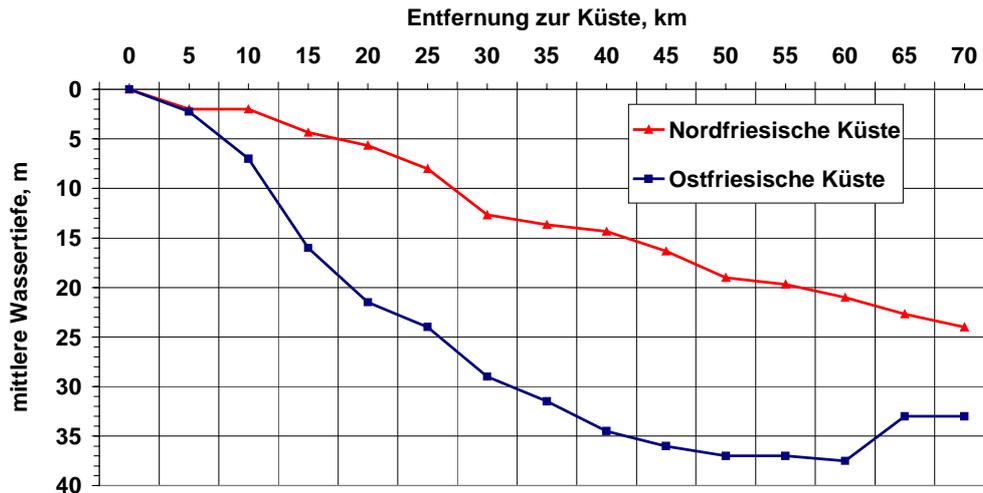


Abb. 3: Wassertiefen der Nordsee.

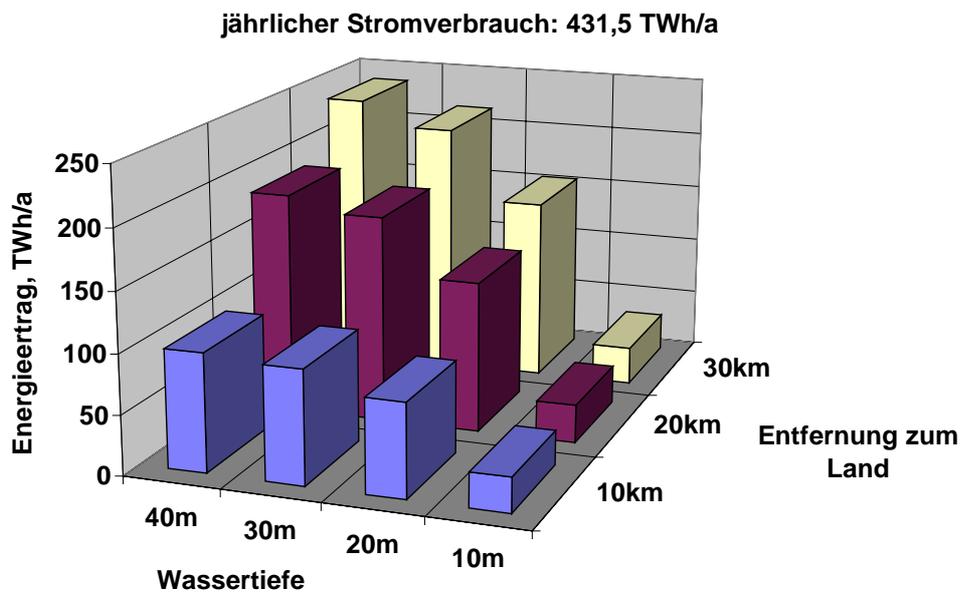


Abb. 4: Offshore-Potentiale in Deutschland (Matthies *et al.* 1995).

Ein weiteres Beispiel der enormen Potentiale zeigt die Abschätzung in Tab. 2. Vorausgesetzt wird der Einsatz von WEA der zukünftigen Leistungsklasse von 5 MW mit einem Rotordurchmesser von 110 m. Bei einer Aufstellungsgeometrie von 5 x 7 Rotordurchmesser wird eine Gesamtfläche von etwa 10.712 km² benötigt, um eine elektrische Energie von etwa 430 TWh/Jahr zu erzeugen. D.h. mit einer quadratischen Fläche mit einer Seitenlänge von 103 km kann mit Hilfe der Offshore-Windenergie der elektrische Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland theoretisch gedeckt werden. Das dies eine theoretische Zahl ist, deren technische Realisierung (Stichworte: Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch,

Speichermedien) eher ungewiß ist, sei dahingestellt; diese Zahl zeigt aber dennoch die enormen Potentiale, die durch die Offshore-Windenergienutzung zur Verfügung stehen. Realistischer in näherer Zukunft wäre sicherlich die zweite in Tab. 2 aufgeführte Fläche von 1.017 km², mit der etwa 10% des elektrischen Verbrauchs Deutschlands zu decken wäre.

Tabelle 2: Beitrag der Offshore-Energieerzeugung zur elektrischen Energieversorgung.

WEA 5MW, 110m Rotordurchmesser				
Aufstellungsgeometrie	5 x 7 Rotordurchmesser			
Fläche pro WEA	0,42 km ²			
Ertrag pro WEA	17 GWh			
Ertrag pro km ²	42 GWh			
	el. Verbrauch in Deutschland *)	benötigte Offshore Leistung	benötigte Fläche	Seitenlänge
Deutschland gesamt	435'000 GWh/a	128 GW	10837 km ²	104 km
10% davon	43'500 GWh/a	13 GW	1084 km ²	33 km
*) 1996				

Ähnliche Abschätzungen, wie in Abb. 4 dargestellt, wurden für Dänemark und die Niederlande durchgeführt. Das theoretische Offshore-Potential in Dänemark beträgt, wenn ähnlich wie in Abbildung 5 nur der Bereich bis zu 30 km Entfernung vom Land und einer maximalen Wassertiefe von 40 m angenommen wird, mehr als 500 TWh/a. Bei einem jährlichen Verbrauch elektrischer Energie von etwa 32 TWh/a könnten in dänischen, küstennahen Gewässern somit theoretisch das 15-fache des eigenen Verbrauches erzeugt werden.

In den Niederlanden beträgt nach dieser Studie das theoretische Offshore-Potential bis 30 km Entfernung etwa 230 TWh/a bei einem jährlichen Verbrauch von etwa 76 TWh/a. Auch in diesen Fällen ist mit Sicherheit dieses Potential innerhalb eines 30 km-Streifens nicht annähernd nutzbar. Gleichzeitig erschließen sich aber gerade auch im Falle Dänemarks und der Niederlande enorme Potentiale, wenn Gebiete noch weiter draußen im Meer erschlossen werden können.

Zusammenfassung

Die Offshore-Windenergienutzung steht am Anfang ihrer Entwicklung. Sowohl die technisch/wirtschaftliche Entwicklung als auch die Erfahrungen im Umgang mit dieser Technik

bezüglich der Konflikte mit anderen Nutzungen wie Schifffahrt, Fischerei und Militär sowie den Auswirkungen auf Natur und Umwelt sind noch ungeklärt.

Die technische Entwicklung der Anlagen mit Leistungen von 2,5 bis 5 MW steht in naher Zukunft bevor; ob diese Anlagen Offshore unter wirtschaftlichen Bedingungen betrieben werden können, ist neben der Entwicklung der Kosten der Anlagenherstellung und für Infrastruktur im Wesentlichen abhängig von der Vergütung des eingespeisten Stromes. In Deutschland ist es dementsprechend eine Frage, die von der künftigen Gestaltung des Stromeinspeisegesetzes für erneuerbare Energien bestimmt wird. Die Wahl der am besten geeigneten Fundamente und Form der Netzanbindung wird ebenso wie Reduktion der Kosten der WEA ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einer wirtschaftlichen Nutzung sein. Um dies zu erreichen, ist sicherlich derzeit die Realisierung von Projekten im Inshore-Bereich erforderlich.

In der Frage der konkurrierenden Nutzungen wie Schifffahrt, Fischerei, Militär sind mögliche Konflikte aufgrund der zum Teil sehr großzügigen Festlegung von Schutzgebieten in der Vergangenheit absehbar. Hier lassen sich jedoch sicherlich Lösungen finden, zumal sich die Nutzungen nicht notwendigerweise gegenseitig ausschließen.

Bezüglich der Einwirkungen von Offshore-Windparks auf Avifauna und Lebenswelt im Meer wurden bislang Untersuchungen lediglich an den vorgenannten Pilotprojekten durchgeführt. Inwieweit die Resultate dänischer, niederländischer und schwedischer Forschungen an Windparks in der Ostsee (Tunø Knob, Dänemark, und Bockstigen, Schweden) auf die Verhältnisse in der Nordsee übertragbar sind, ist noch unklar. Beispielsweise sei hier die Klärung der Auswirkungen von Schallemission von Offshore-WEA unter Wasser auf Meereslebewesen, speziell der Meeressäuger, zu nennen.

Ein wichtiges Instrument zur Verringerung von Nutzungskonflikten und negativer Beeinflussung der Natur ist sicherlich eine frühestmögliche Planung von Flächen zur Offshore-Windenergienutzung. Um eine solche Planung erfolgreich durchzuführen, ist die Beteiligung aller zuständigen Behörden und Vereinigungen aus Tourismus, Fischerei, Schifffahrt, Bergbau, Natur- und Umweltschutz erforderlich. Hierzu ist in einigen Bereichen, wie der Untersuchung der Auswirkungen auf Avifauna und mariner Lebenswelt, die Durchführung von Forschung an Pilotprojekten notwendig. Die Darstellung konfliktarmer oder – freier Flächen für Offshore-Windparks bietet Sicherheit für eine sinnvolle und effektive Nutzung von Offshore-Potentialen. Die Nutzung dieser Potentiale ist im Sinne einer umweltfreundlichen Energieversorgung von nicht zu unterschätzender Bedeutung.

Literatur

Aubrey, C. (1997): Project Profile Tunø Knob. Wind Directions: 12-14.

Diedrichs, V., Busch, R. & H. Bouillon (1995): Offshore-Windenergiesysteme. Abschlußbericht zum Fördervorhaben des BMBF: Nr. 0329645 (A u. B): 203 S.

Matthies, H.G., Nath, C., Schellin, T.E., Garrad, A.D., Wastling, M.A., Quarton, D.C. & J. Wei (1995): Study of Offshore Wind Energy in the EC. - Hrsg.: Germanischer Lloyd, Garrad Hassan and Partners & Windtest KWK. Verlag Natürliche Energien, Brekendorf, 272 S.

Hydro- und morphodynamische Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen

Werner Zielke

Institut für Strömungstechnik, Appelstraße 9A, D-30167 Hannover, Germany
zielke@hydromech.uni-hannover.de

Einführung

Einige Parks von Offshore-Windenergiekomplexen sind in Dänemark, Schweden und den Niederlanden bereits in Betrieb. Die derzeitigen Vorplanungen weiterer Parks in diesen Ländern und auch in Deutschland gehen aber weit über die Größe der bestehenden hinaus, und zwar sowohl was die einzelnen WKA angeht, für deren Leistung Werte bis zu 5 MW bei Nabenhöhen und Propellerdurchmessern von etwa 100 m und darüber angegeben werden, als auch bez. der Zahl der Anlagen in einem Park, einige Dutzend bis zu einige Hundert. Ging man bisher davon aus, daß als Standorte nur küstennahe Seegebiete mit nicht mehr als 10 m Wassertiefe in Frage kommen, so sind jetzt auch küstenfernere Standorte in Nord- und Ostsee mit Wassertiefen von 30 m Wassertiefe im Gespräch. Die Abstände der Anlagen innerhalb eines Parks sind von ihrer Größe abhängig und liegen etwa zwischen 400 und 700 m. Als Gründungsbauwerke kommen verschiedene Varianten in Frage (Abb. 1); in flachem Wasser z.B. Gewichtszylinder (Betonring mit einem Durchmesser von etwa 8 bis 12 m nachträglich mit Sand verfüllt) oder ebenfalls durch ihr Gewicht stabilisierte Tripoids; in tieferem Wasser gerammte oder eingespülte Stahlzylinder (mit Durchmessern zwischen 8 und 12 m), oder spezielle Konstruktionen auf gerammten Pfählen, wie Tripoids.

Als meeres technische Bauwerke sind die Offshore-WKA in hohem Maße dem Wind, den Meeresströmungen, den Wellen und, je nach Standort, den sich ändernden morphologischen Bedingungen ausgesetzt. Diese sind für die konstruktive Gestaltung der Anlagen einschließlich ihrer Gründung maßgeblich. Jedoch stellt sich zunehmend auch die Frage, in welchem Umfang die Anlagen die hydrodynamischen und morphodynamischen Verhältnisse in ihrer Umgebung verändern und zwar sowohl als Einzelbauwerk in ihrem unmittelbaren Umfeld als auch großräumiger durch das Zusammenwirken von Hunderten von Anlagen in einem WKA-Park. Die ökologische Relevanz dieser Veränderungen zu bewerten ist nicht Gegenstand dieser Abhandlung. Sie beschränkt sich auf eine geraffte qualitative Darstellung der physikalischen Auswirkungen und faßt zusammen, welche Methoden zur quantitativen Abschätzung verfügbar und wo Kenntnislücken vorhanden sind.

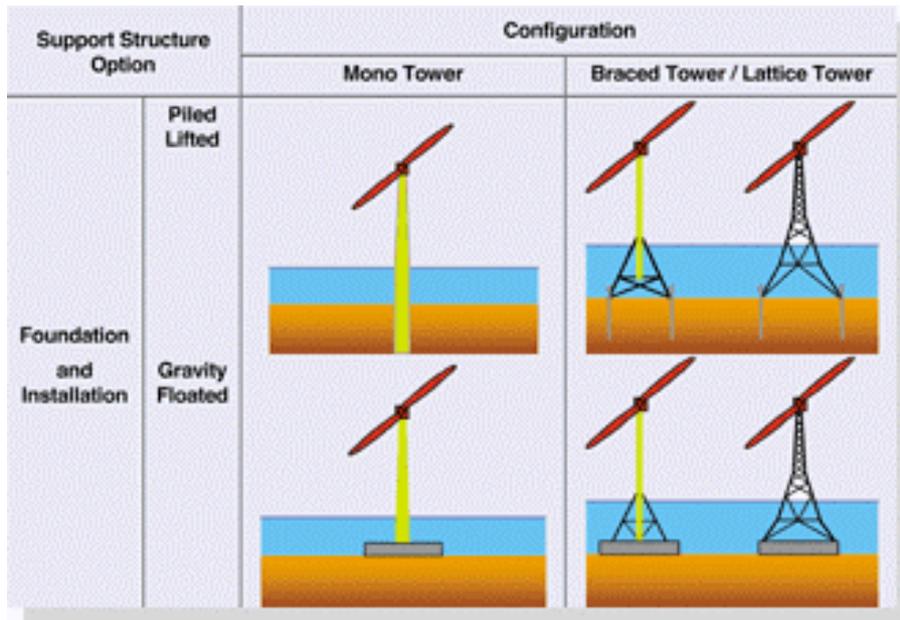


Abb. 1: Varianten der Gründung von Offshore-WKA (Kvaerner Oil & Gas Ltd).

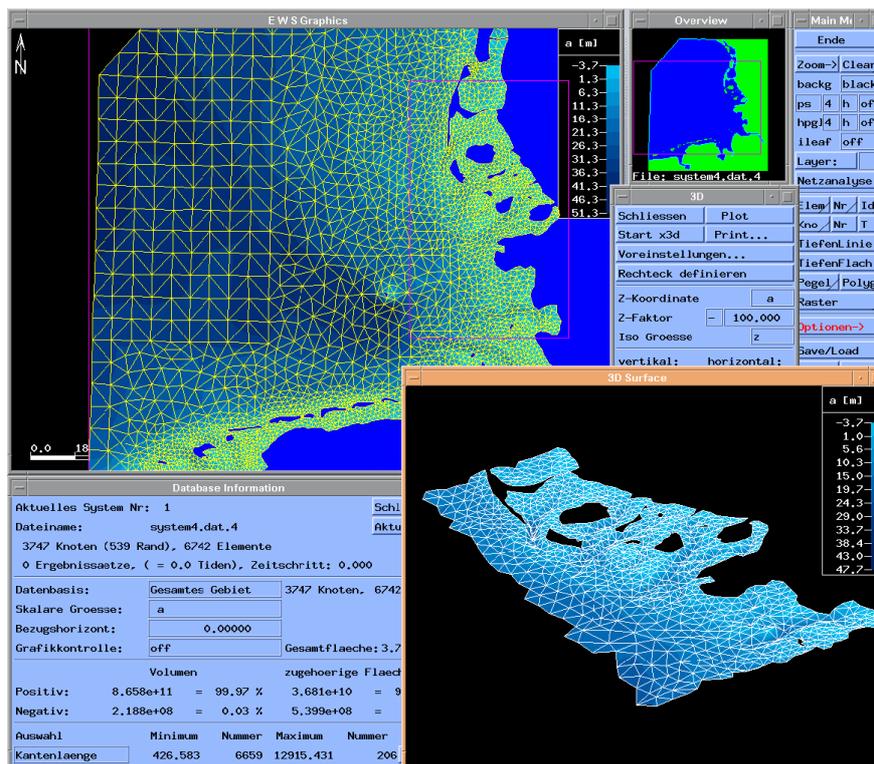


Abb. 2: Numerisches Modell der Deutschen Bucht. Anwendung des Modellsystems FREEFLOW des Instituts für Strömungsmechanik.

Angesprochen werden Wind, Meeresströmung, Seegang, Schwebstofftransport und Morphodynamik. Es wird jeweils zuerst die Frage aufgeworfen, welche natürlichen Bedingun-

gen an einem ausgewählten Standort gegeben sind, wie sich diese durch ein Einzelbauwerk verändern und wie durch eine Gruppe von Bauwerken. Als Werkzeuge zur Berechnung bieten sich vor allem hydrodynamisch-numerische Modelle an, die deshalb in ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten sind (Zielke *et al.* 1999).

Meeresströmung

Die astronomisch bedingten Tidewellen von 2 bis 4 m Tidehub in der Deutschen Bucht erzeugen Flut- und Ebbeströmungen, deren Geschwindigkeit je nach Lokalität stark variiert. In Meerengen wie dem Ärmelkanal oder in Ästuarien z.B. der Wesermündung können örtlich und kurzfristig 2,50 m/s erreicht werden. Großräumig sind eher 0,50 m/s zu erwarten. Demgegenüber weist die Ostsee nur einen Tidehub von 1 bis 2 dm auf, so daß auch die tidebedingten Strömungen meist weniger als 1 dm/s sind. Allerdings sind sie gerade deshalb in relativ höherem Maße als in der Nordsee auch von Wind, Wellen und Dichteunterschieden (durch Salinitäts- und Temperaturgradienten) beeinflusst.

Um die Strömungen an einem Standort zu ermitteln sind Naturmessungen geeignet, aber auch mathematische Simulationsmodelle haben seit einigen Jahren eine angemessene Genauigkeit erreicht. Für die Nordsee kommen tiefengemittelte zweidimensionale Modelle und die aufwendigeren dreidimensionalen Modelle in Frage. Für die Ostsee ist es dagegen zwingend, die Vertikalstruktur des Strömungsprofils durch Anwendung eines dreidimensionalen Modells zu berücksichtigen, sofern sich eine Berechnung nicht erübrigt, weil die Strömungen klein genug sind.

Als Beispiel wird in Abb. 2 die Diskretisierung eines Modells der Deutschen Bucht in einer Anwendung des Modellsystems FREEFLOW des Instituts für Strömungsmechanik der Universität Hannover gezeigt. Das Modell wird an den Rändern durch ein übergeordnetes Modell der gesamten Nordsee gesteuert, das über die Schelfkante hinausreicht. Die durch den Wind verursachten Schubspannungen an der Oberfläche sind berücksichtigt. Besonderer Wert ist auf eine gute Erfassung der bei Ebbe trockenfallenden Wattgebiete gelegt, da durch sie auch die Strömungen in den tieferen Bereichen beeinflusst werden. Ein von diesem Deutsche-Bucht-Modell gesteuertes Submodell ist in Abb. 3 dargestellt. Man erkennt, wie präzise z.B. die Tiefenstruktur im Büsumer Watt einschließlich der Priele durch das Modell erfaßt ist, und wie sich die Topographie auf die Wasserstandsschwankungen auswirkt. Das berechnete Geschwindigkeitsfeld für einen Teilbereich und für einen ausgewählten Zeitpunkt ist in Abb. 4 dargestellt.

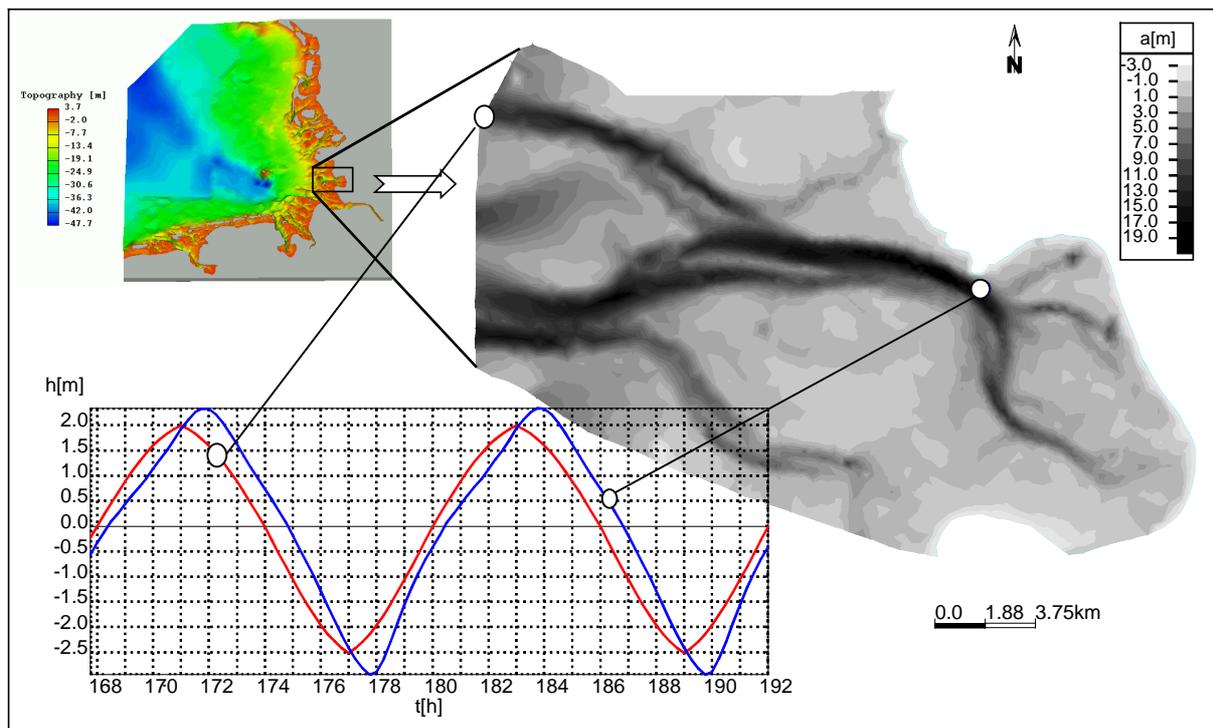


Abb. 3: Submodell zum Deutsche-Bucht-Modell. Einfluß der Topographie auf die Wasserstände.

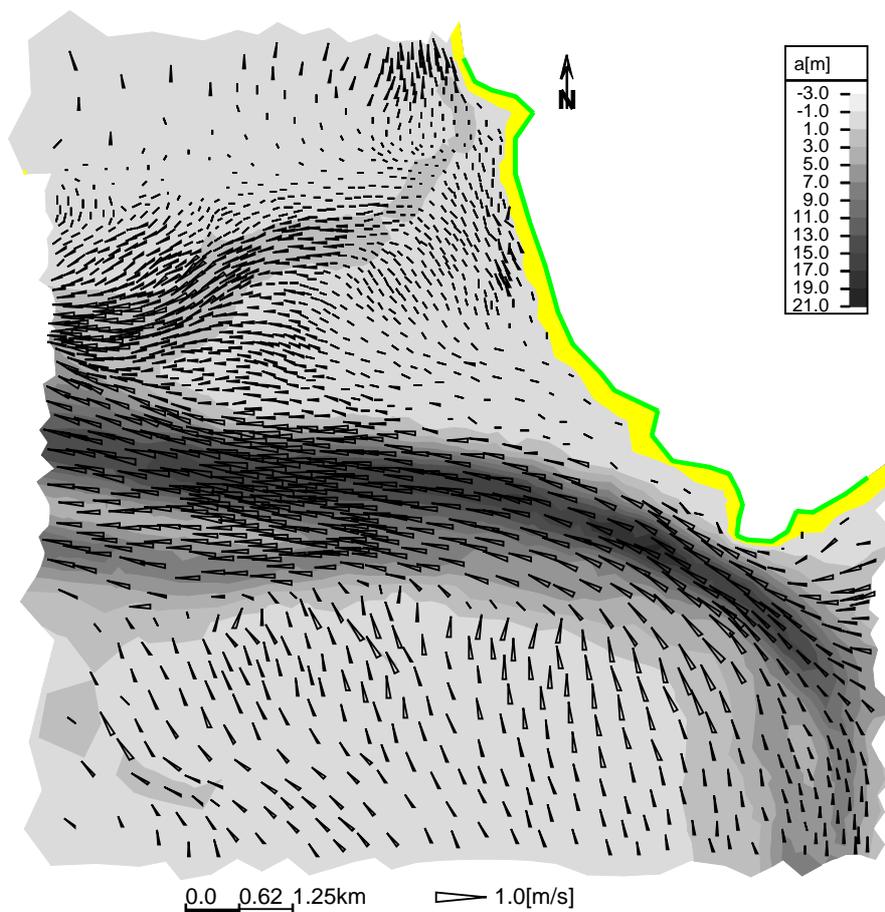


Abb. 4: Momentanverteilung der Fließgeschwindigkeit in einem Modellausschnitt.

Die Beeinflussung der Strömung durch ein einzelnes Bauwerk erstreckt sich seitlich auf einen sehr kleinräumigen Bereich. Bei einem Kreiszyylinder hat man z.B. im Abstand eines Bauwerksdurchmessers nur noch eine Geschwindigkeitserhöhung von etwa 10%, und im Abstand von zwei Durchmessern eine solche von etwa 4%. Hinter dem Bauwerk treten ein Ablösebereich und Wirbel auf, die über mehrere Bauwerksdurchmesser langsam abklingen, wobei die Intensität von den jeweiligen Strömungsbedingungen abhängt. Insgesamt weist die Strömung unmittelbar am Bauwerk eine sehr komplizierte räumliche Struktur auf, ohne deren Kenntnis z.B. die Kolkbildung an Bauwerken nicht erklärbar ist. Wie in Abb. 5 dargestellt, tritt vor und seitlich von einem umströmten Zylinder eine bodennahe von diesem weggerichtete Strömung auf, die einen Wirbel bildet, dessen Achse sich wie ein Hufeisen (*horseshoe vortex*) um den Pfeiler legt. Hinter diesem treten unregelmäßige Ablösewirbel auf. Eine präzise Berechnung dieser Strömung ist nur mit sehr aufwendigen dreidimensionalen numerischen Strömungsmodellen möglich, die neben der Impulsgleichung für alle drei räumlichen Richtungen (nicht-hydrostatische Annahme) einen anspruchsvollen Ansatz der Turbulenz beinhalten. Man kann dies derzeit noch nicht als Stand der Technik bezeichnen. Allerdings ist zur Beantwortung der meisten praktischen Fragen die genaue Kenntnis der Strömungsstruktur auch nicht nötig. Um trotzdem die Ergebnisse derartiger Modelle zu verdeutlichen sind in Abb. 6 das Berechnungsgitter und das berechnete zweidimensionale sowie in Abb. 7 das dreidimensionale Strömungsfeld wiedergegeben.

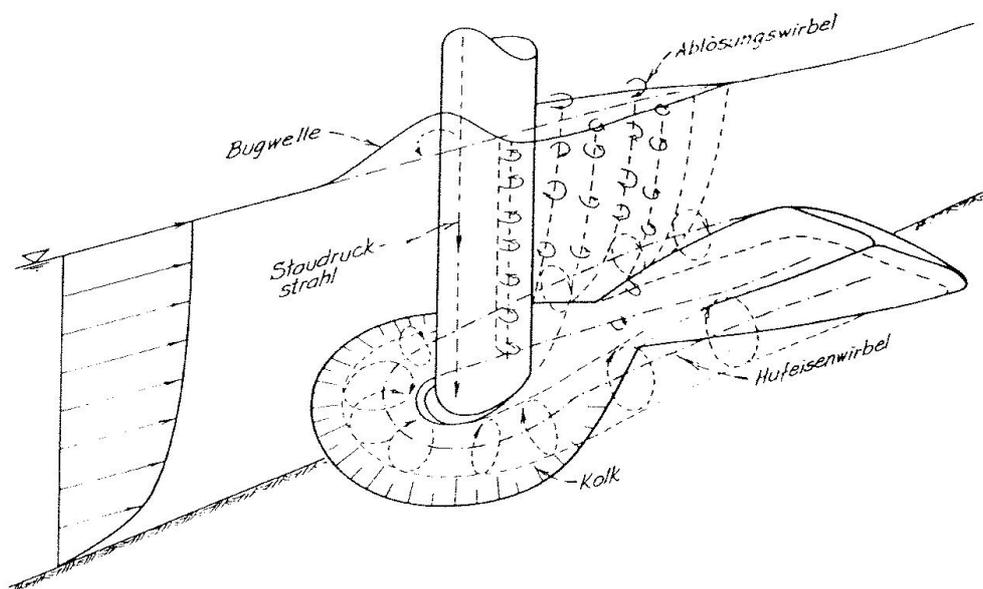


Abb. 5: Prinzipskizze einer Pfeilerumströmung mit entstehendem Hufeisenwirbel (Raudkivi 1981).

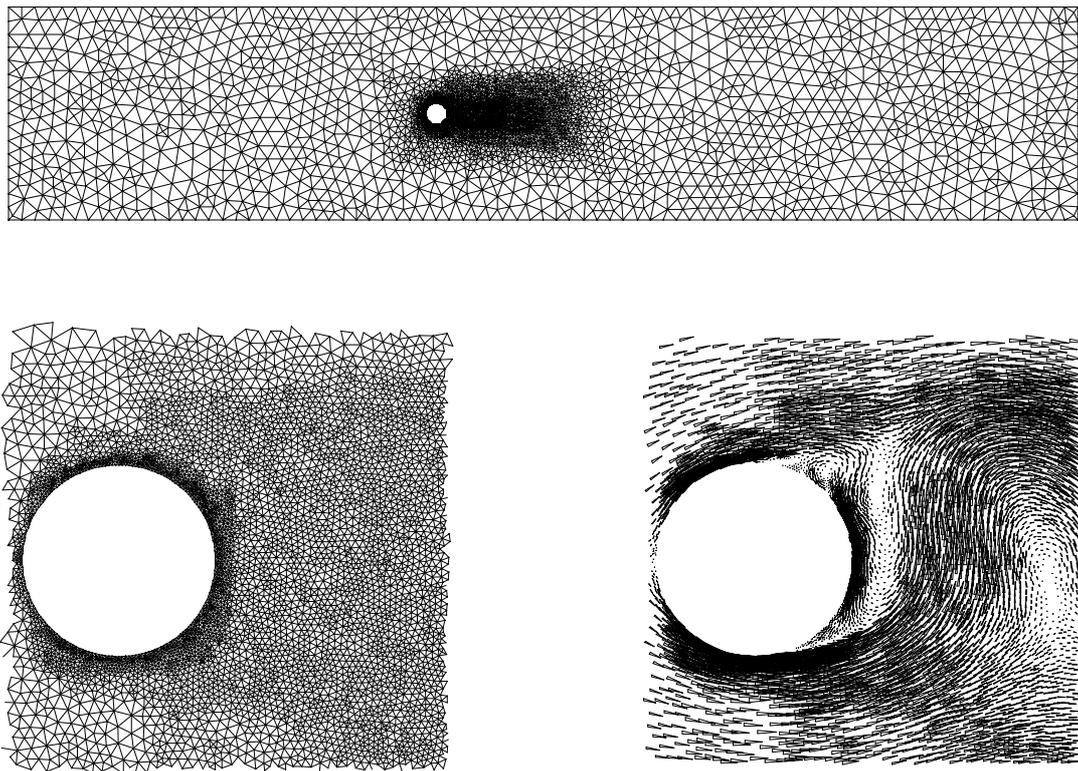


Abb. 6: Finite-Element-Netz zur Berechnung einer Zylinderumströmung und berechnete Geschwindigkeitsverteilung.

Fragt man sich nun, welche Behinderung der großräumigen Strömung durch einen Park mit Hunderten von WKA entsteht, so kann man folgende überschlägliche Berechnung durchführen: Auf jede einzelne Anlage wirkt eine Strömungskraft, die mit empirischen Ansätzen berechenbar ist. Multipliziert man diese Kraft mit der Zahl der Anlagen eines Parks, so ergibt sich eine integrale Widerstandskraft. Diese kann man mit der Reibungskraft vergleichen, die auf die großräumige Strömung vom Meeresboden ohne Berücksichtigung der Anlagen entsteht und die ebenfalls mit einfachen Ansätzen abschätzbar ist. Man wird dann erkennen, daß die bremsende Wirkung der Anlagen nur wenige Prozent der vom Boden auf die Strömung ausgeübten Reibung ist, allerdings steigt der Prozentsatz mit der Wassertiefe. Konkrete Werte für die Auswirkungen eines Windparks auf die regionalen Strömungsverhältnisse im Bereich des Standorts kann man mit den oben erwähnten großflächigen numerischen Modellen erhalten, indem man die Bodenreibung im Gebiet des Parks um den erwähnten Prozentsatz erhöht.

Insgesamt ist also mit einer nur geringen Reduzierung der großräumigen Meeresströmungen im Bereich eines Parks zu rechnen, was nicht im Widerspruch zu den lokalen Geschwindigkeitserhöhungen unmittelbar an jeder einzelnen WKA steht.

Seegang

Den natürlich gegebenen Seegang erhält man als Seegangsspektrum durch Messungen oder zunehmend auch durch Modellrechnungen. Großräumig werden statistische (sog. phasengemittelte) Modelle eingesetzt, für kleinräumige Gebiete auch deterministische (sog. phasenauflösende) Modelle. Als Beispiel für den letzten Typ ist das Modellergebnis für den Seegang am Strand von Zingst in Abb. 8 gezeigt.

Die Beeinflussung des Seegangs durch eine einzelne Anlage beschränkt sich, wie die der Strömung, seitlich auf Abstände von etwa einem bis zwei Durchmesser und dahinter auf einige Durchmesser. Dies ist in Abb. 9 erkennbar, das im Großen Wellenkanal des Forschungszentrums Küste (Univ. Hannover und T.U. Braunschweig) aufgenommen wurde. Die durch die Wellen induzierten Strömungen direkt an der Anlage und damit auch im Bodenbereich sind noch wesentlich komplizierter als bei der zeitlich konstanten Umströmung. Sie oszillieren mit der Periode der Wellen, so daß die entstehenden Ablösewirbel bei der Strömungsumkehr auf das Bauwerk treffen. Außerdem sind durch die Orbitalbewegungen der Welle die Geschwindigkeiten über die Wassertiefe sehr ungleich. Eine exakte Berechnung dieser Strömungen ist derzeit kaum möglich, aber für die hier im Vordergrund stehenden ökologischen Fragestellungen auch nicht nötig.

Zu beantworten ist auch die Frage, ob durch die große Zahl der Anlagen in einem Park das Wellenklima in diesem und in seiner Umgebung verändert wird. Durch die Wellendissipation an den Bauwerken dürfte eine geringfügige Dämpfung entstehen, deren Ausmaß mit Modellen abgeschätzt werden kann. In diesen sollte man auch die leichte Reduzierung des Windeintrags berücksichtigen, der durch die Windschattenwirkung der WKA entsteht. Insgesamt dürften die regionalen Auswirkungen der WKA auf den Seegang jedoch ähnlich gering sein wie die auf die Meeresströmung.

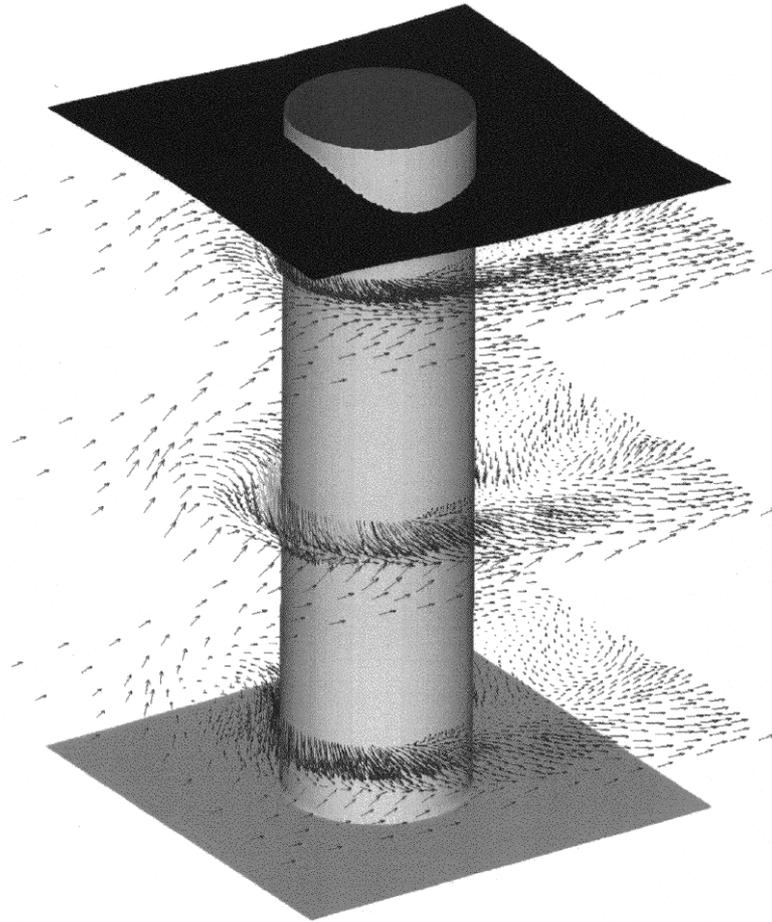


Abb. 7: Dreidimensional berechnete Umströmung eines Zylinders.

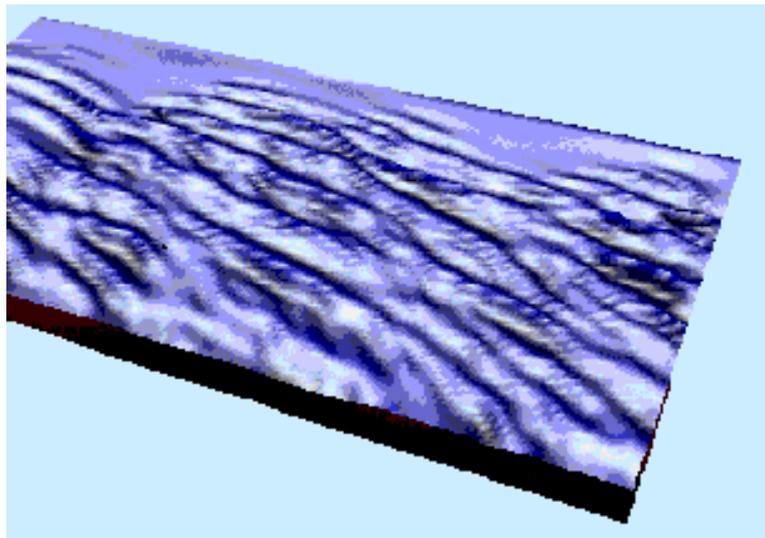


Abb. 8: Berechnetes Wellenfeld in einer Brandungszone.

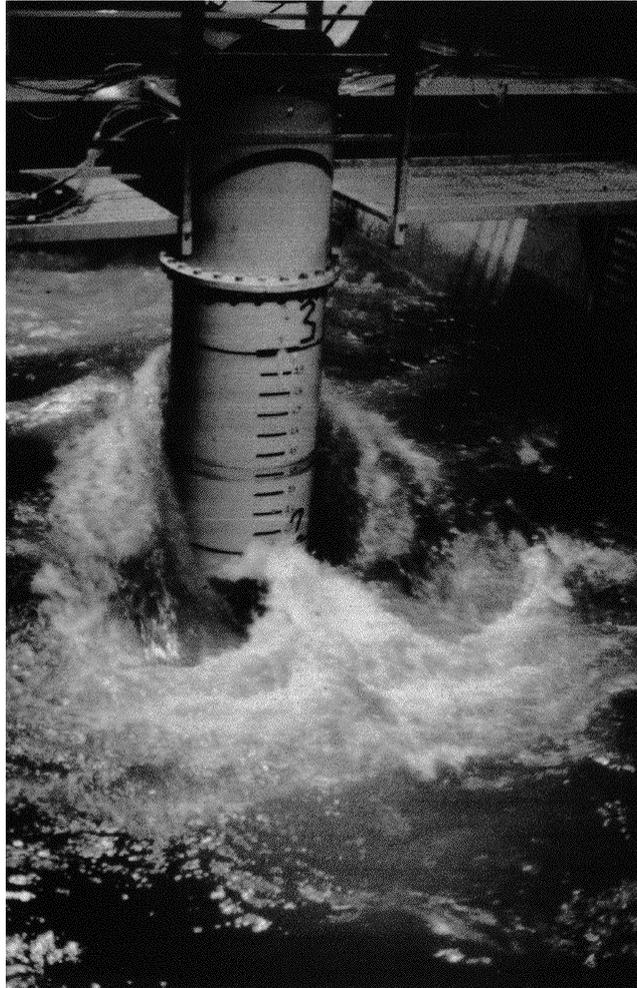


Abb. 9: Untersuchung der Einwirkung von Wellen auf einen Zylinder (Foto: Sparbohm, Forschungszentrum Küste Hannover).

Schwebstofftransport

Der natürlich vorhandene Schwebstoffgehalt der Strömung ist sehr standortabhängig und wird hier nicht weiter betrachtet. Im Vordergrund steht die Frage ob er durch einzelne Anlagen oder durch Gruppen von Anlagen verändert wird und damit auch die Trübung des Wasserkörpers. Dies ist durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten, verbunden mit verstärkter Erosion, prinzipiell denkbar, und es stellt sich die Frage nach dem Ausmaß.

Erosion kann vor allem unmittelbar am Fuß einer Anlage durch die dort stark erhöhten Geschwindigkeiten auftreten. Sehr feines Material kann dadurch über erhebliche Strecken in der Schwebelagere bleiben. Bei in Richtung und Betrag konstanter Geschwindigkeit wird sich ein Kolk entwickeln und so weit vertiefen bis die Erosion durch Erreichen eines Gleichgewichtszustandes stoppt. Die Tideströmung ist jedoch an jedem Punkt zeitlich und auch in

ihrer Richtung veränderlich (Strömungsrose). Hinzu kommt der Seegang, der ebenfalls in Stärke und Richtung variabel ist. Deshalb ist ein Gleichgewichtskolk nicht zu erwarten, so daß es immer wieder neu zu Aufwirbelungen kommen wird. In welchen Mengen dabei Schwebstoffe in den Wasserkörper eingeleitet werden ist schwierig abzuschätzen und bleibt einer konkreten Untersuchung vorbehalten. Allerdings werden zur Sicherung des Bauwerkes oft KOLKSicherungen in Form von Steinschüttungen oder Geotextilien eingebracht, die den Schwebstoffeintrag in der unmittelbaren Nähe des Bauwerks verhindern.

Außerhalb des unmittelbaren Nahbereichs der Anlagen, also verteilt über die gesamte Fläche eines Parks, wäre ein erhöhter Schwebstoffeintrag nur dann zu erwarten, wenn sich im Park die Meeresströmungen verstärken. Dies wird nicht der Fall sein; es wird wie oben ausgeführt eher zu einer (allerdings sehr kleinen) Verringerung der Strömungen kommen.

Sehr ernst zu nehmen ist dagegen das Entstehen von Trübungsfahnen während der Bauzeit, vor allem falls die Gründungskörper eingespült werden. Da die Bauarbeiten in einem Park möglicherweise über Jahre fortgesetzt werden, ist dies nicht nur eine kurzzeitige Beeinträchtigung. Wieviel Sediment eingeleitet wird hängt stark von der eingesetzten Technik ab.

Die Schwebstoffe werden sich in Abhängigkeit von den örtlichen Meeresströmungen und der Partikelgröße auch großräumig verteilen und sedimentieren (*blanketing*). Zur Berechnung dienen numerische Modelle der Strömungen und des Sedimenttransports. Entsprechende Untersuchungen für Brückenpfeiler in Meerengen sowie für angedachte technische Aktivitäten in der Tiefsee (Jankowski & Zielke 1999) zeigten einen hohen Anspruch an die Modelle, um verlässliche Aussagen zu erhalten.

Entscheidende Einflußgröße ist neben der Strömungsgeschwindigkeit die Partikelgröße bzw. deren Größenverteilung und daraus resultierend die Sinkgeschwindigkeit. Diese steigt bei kohäsivem Material durch Bildung von Sedimentflocken an. Auch treten im Nahbereich der Anlagen zusätzliche Absinkprozesse auf, die durch die konzentrationsbedingte höhere Dichte des Wassers entstehen (Dichteströmungen). Ohne Beachtung dieser Prozesse erhält man unrealistisch große Entfernungen für die Verdriftung des Materials. Eine charakteristische Darstellung von Ergebnissen aus einem numerischen Tiefseemodell, das diese genannten Effekte berücksichtigt, findet sich in Abb. 10. Dort ist sowohl eine Trübungswolke dargestellt als auch das sog *blanketing* d.h. die Dicke und flächenhafte Ausdehnung der Sedimentationsschicht, (Jankowski *et al.* 1997).

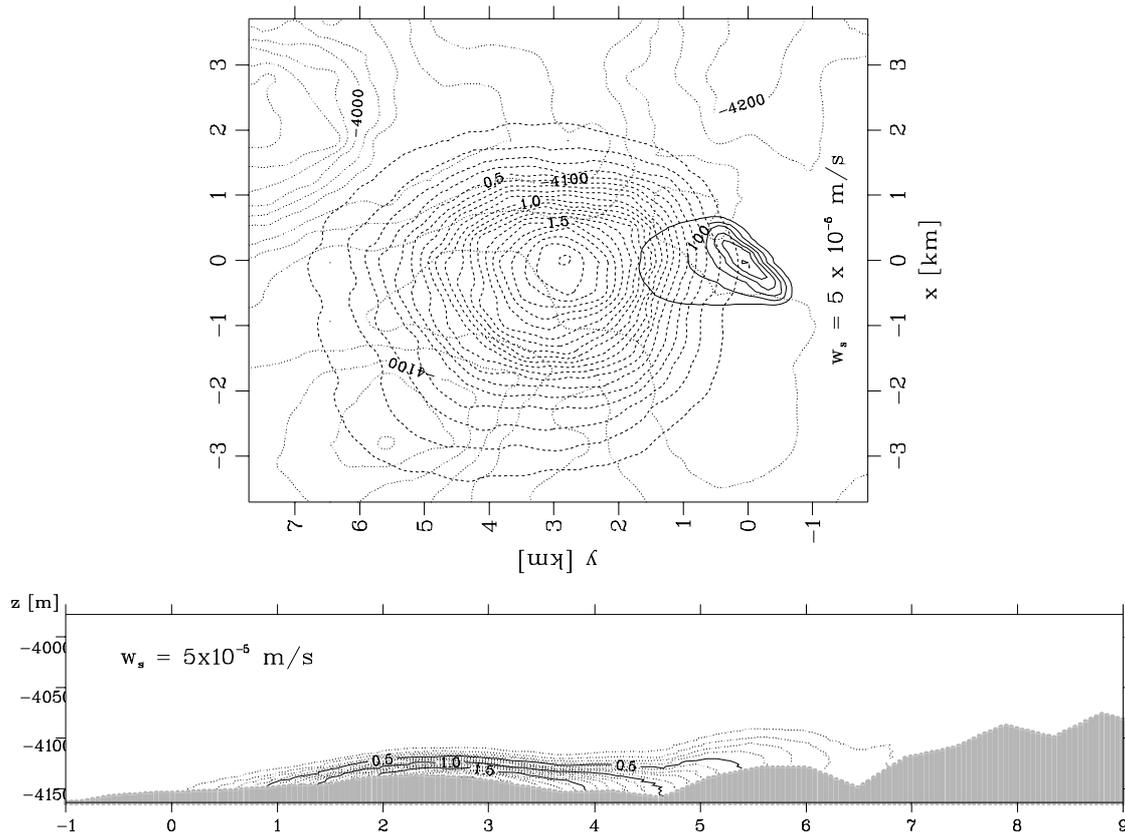


Abb. 10: Trübungswolke und *blanketing* durch Sedimentaufwirbelung verursacht durch technische Aktivitäten in der Tiefsee (Jankowski *et al.* 1999).

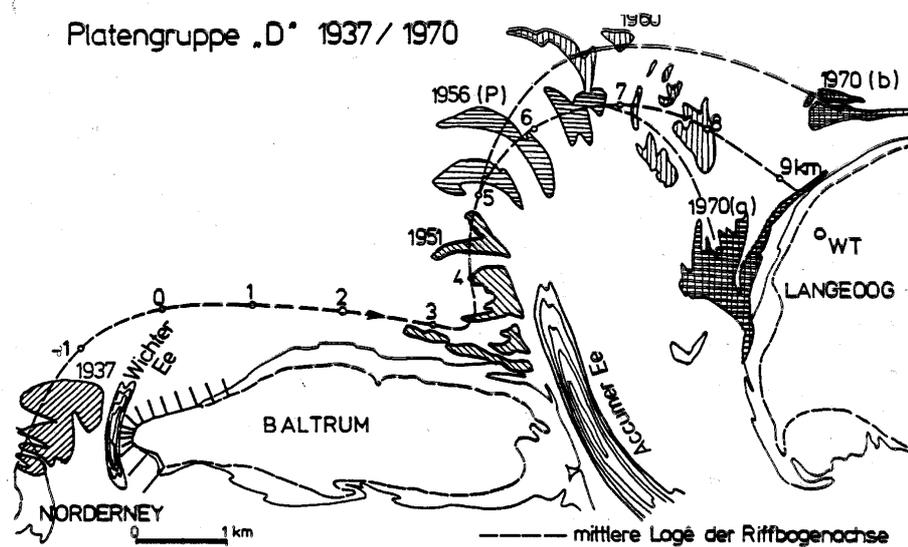


Abb. 11: Langfristige morphologische Veränderungen vor Baltrum und Langeoog (EAK 1993).

Morphodynamik

Morphodynamik ist die zeitabhängige Formänderung der Sohle eines Gebietes. Sie ist das Ergebnis der Wechselwirkung von Strömungen, Wellen und Sedimenttransportprozessen mit der beweglichen Sohle. Morphodynamik zu berechnen ist immer noch eine große Herausforderung vor allem, wenn es sich um morphologische Veränderungen über Jahre oder sogar Jahrzehnte handelt. Die morphologische Stabilität eines Gebiets ist ein wichtiges Auswahlkriterium für einen Standort. Wie aktiv ein Gebiet sein kann ist aus Abb. 11 ersichtlich, in dem die Verlagerung der Platen vor den Nordseeinseln Baltrum und Langeoog über mehrere Jahrzehnte wiedergegeben ist. Insofern ist die Erfassung der natürlichen Gegebenheiten ein außerordentlich wichtiger Schritt bei der Bewertung eines Standortes. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob ein geplanter WKA-Park die natürlich gegebene Morphodynamik verändert.

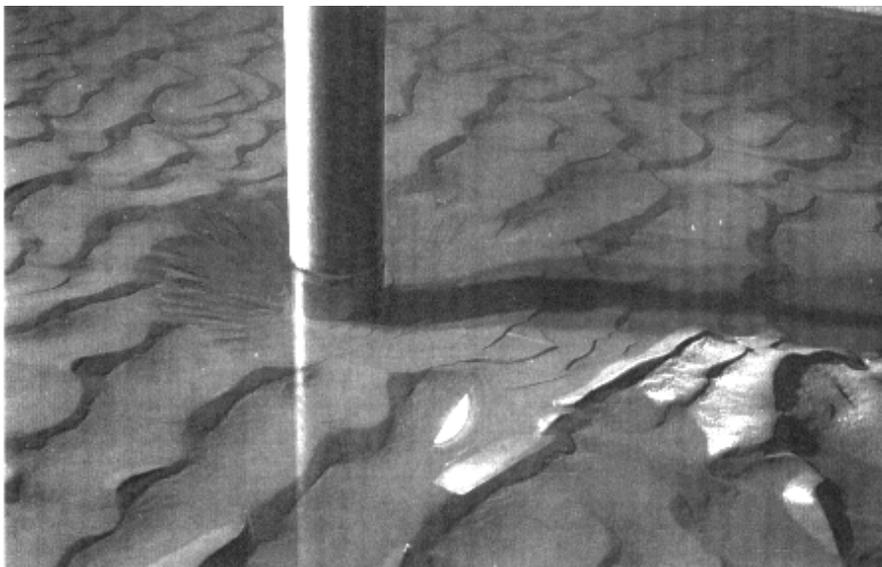


Abb. 12: Laboraufnahme eines Kolks um einen stationär umströmten Zylinder (Whitehouse 1998).

Als erstes sei auch dazu die einzelne Anlage betrachtet. Bei konstanter Umströmung stellt sich das Nahfeld der Strömung wie in Abb. 5 ein. Sie erzeugt je nach Bodenbeschaffenheit einen Kolk, wie er in Abb. 12 als im Labor aufgenommenes Foto wiedergegeben ist und in Abb. 13 als Prinzipskizze.

Man erkennt sehr schön, daß der Hufeisenwirbel eine Bodenvertiefung vor und seitlich des Pfeilers erzeugte und das Material etwa zwei bis drei Durchmesser hinter dem Pfeiler wieder sedimentierte und dort zu einer Erhöhung des Bodens führte, wobei zu bedenken ist, daß es sich hier um Sand handelt. Feineres Material würde weiter verdriften.

Eine genaue Reproduktion der dreidimensionalen Strömung und resultierenden Kolkbildung mit Hilfe eines numerischen Modells ist noch Gegenstand der Forschung. Dagegen

gibt es sehr viele empirische Gleichungen, die durch Anpassung an Labormessungen und zum Teil auch an Naturmessungen gewonnen wurden (Hoffmanns / Verheij, 1997). Sie erlauben die Abschätzung von Tiefe und flächenhafter Ausdehnung des Kolks.

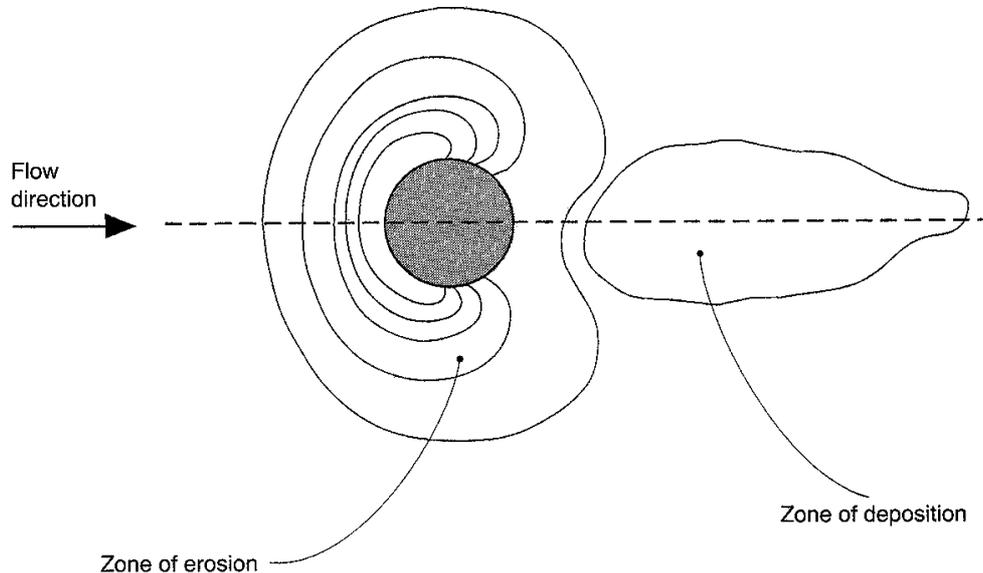


Abb. 13: Prinzipskizze eines Gleichgewichtskolks am stationär umströmten Zylinder (Whitehouse 1998).

Im Meer ändert sich durch Gezeiten sowohl die Richtung als auch der Betrag der Umströmung. Wellen beinhalten eine oszillierende Umströmung, wobei Wellenstärke und -richtung in Abhängigkeit vom Wind sehr unterschiedlich sein können. Der bisher diskutierte Gleichgewichtskolk setzte aber konstante Strömungsstärke und -richtung voraus. Er braucht zum Entstehen eine Zeit, die weit größer als die der Tideperiode ist. Deshalb wird der im Meer unter variablen Bedingungen auftretende Kolk flacher als der Gleichgewichtskolk sein, sich dafür aber um die ganze Gründung herum erstrecken. Auch hierfür gibt es Näherungsformeln (Whitehouse 1998). In der Regel wird man den Kolk allerdings nicht entstehen lassen sondern, wie oben schon erwähnt, ihn durch Steinschüttungen oder Geotextilien verhindern.

Es bleibt die Frage, ob über die lokale Kolkbildung hinaus sich regionale Auswirkungen einstellen, ob sich also großräumig die Morphodynamik eines Standorts durch die summarische Wirkung aller WKA verändern kann. Bedenkt man das dazu unter den Stichworten Strömung, Wellen und Schwebstofftransport Gesagte, so kann dies bei den sehr geringen erwarteten Änderungen dieser Einflußgrößen ebenfalls nur sehr gering sein. Abschätzungen mit numerischen Modellen sind unter Nutzung des Standes der Wissenschaft möglich. Genaue Berechnungen mittel- und langfristiger morphologischer Veränderungen sind dagegen immer noch eine große wissenschaftliche Herausforderung. Die notwendigen Modelle bein-

halten eine gekoppelte Berechnung von Strömung, Seegang, Sedimenttransport und Morphodynamik, wie in Abb. 14 zusammengefaßt.

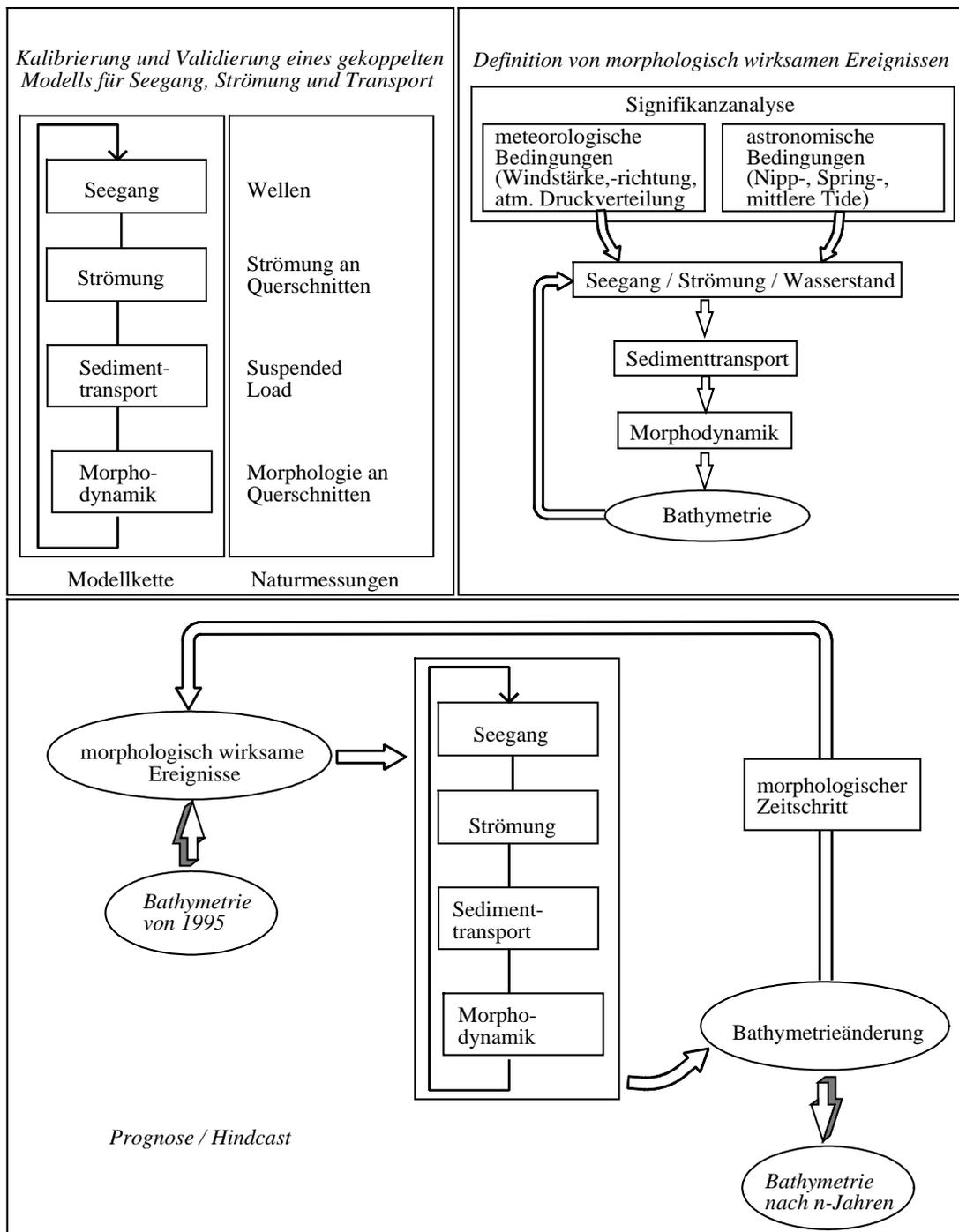


Abb. 14: Vorgehensweise bei der mittel- und langfristigen morphodynamischen Modellierung.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Meerestechnische Anlagen gibt es schon seit Jahrzehnten. Vor allem durch die Förderung von Erdöl und Erdgas aus dem Meeresboden haben sie oft eine gigantische Größe angenommen. Zwar sind Offshore-WKA im Vergleich dazu sehr klein, auch die bisher größten angedachten 5 MW-WKA, aber neuere Planungen sehen sie in Parks von mehreren Hundert Anlagen. Insofern stellt sich nicht nur die Frage wie sich einzelne Anlagen auf den Wind, die Meeresströmung, den Seegang und die Morphodynamik auswirken sondern wie die integrale Wirkung eines Parks auf sein Umfeld ist. Mit dieser Zielsetzung wird die klassische technische Fragestellung, in welcher Weise die Umweltbedingungen die Auslegung und Sicherheit eines Bauwerkes beeinflussen, umgekehrt.

Die zur Beantwortung dieser Fragen verfügbaren Werkzeuge reichen von empirischen Näherungsgleichungen bis zu aufwendigen dreidimensionalen numerischen Simulationsmodellen, wobei die numerischen Modelle ständig an Bedeutung und Leistungsvermögen gewinnen, ohne daß auf die empirischen ganz verzichtet werden kann. Numerische Modelle sind vor allem zur Berechnung der Strömung, der Wellen und des Schwebstofftransports weit entwickelt, haben jedoch für die Morphodynamik noch nicht einen Stand erreicht, der eine routinemäßige Anwendung erlaubt. Hier sind empirische Ansätze unverzichtbar. Es ist zu erwarten, daß sich angesichts der in namhaften Instituten laufenden Grundlagenforschung langsam aber stetig die Leistungsfähigkeit numerischer Modelle verbessert, was für die Meerestechnik und das Küsteningenieurwesen sehr bedeutsam wäre.

Ohne daß für diese Abhandlung spezielle Berechnungen durchgeführt wurden, kann man doch festhalten, daß sich die Auswirkung einer einzelnen Anlage nur über einen Bereich erstreckt, der wenige Durchmesser des Gründungsbauwerks beträgt. Sofern ein Kolkenschutz angebracht wird, wird nicht nur der Kolk sondern auch ein denkbarer lokaler Eintrag von Schwebstoffen verhindert.

Ein Park von Anlagen ist dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand zwischen den Bauwerken aus aerodynamischen Gründen mehrere hundert Meter beträgt. Dies bedeutet, daß bei den erwarteten Durchmessern der Gründungsbauwerke eine sehr geringe Verbauung der Durchströmungsquerschnitte von 1 bis 2% auftritt. Dadurch sind die großräumigen hydro- und morphodynamischen Auswirkungen zwangsläufig sehr gering. Trotzdem sollten sie standortbezogen quantifiziert werden, was durch den Einsatz von numerischen Simulationsmodellen in Verbund mit empirischen Ansätzen auch möglich erscheint. Ob diese z.T. sehr aufwendigen Berechnungen wirklich für jeden Standort in vollem Umfang nötig ist, ließe sich durch den Einsatz der Modelle in Form einer Parameterstudie untersuchen, die die denkbare Bandbreite von Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Seegangsverhältnisse und morphologische Beiwerte umfaßt. Naturgemäß müßte diese Studie baldmöglichst durchgeführt werde, wenn sie ihrem Zweck dienen soll.

Danksagung

Der Autor dankt seinen Mitarbeitern, Dipl. Ing. H. Hoyme und Dipl. Ing. H. Weilbeer, für Anregungen zum Inhalt sowie für einige der gezeigten Bilder (Hoyme: Bild 2,3,4 und 14; Weilbeer: Bilder 6 und 7), die ihren laufenden Forschungsarbeiten entnommen sind.

Literatur

EAK (1993): Die Küste, Heft 55.

Hoffmanns, G.J.C.M. & H.J. Verheij (1997): Scour Manual. A. A. Balkema, Rotterdam.

Jankowski, J.A., Malcherek, A. & W. Zielke (1996): Numerical modeling of suspended sediment due to deep-sea mining. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, NO.C2, pp 3545-3560.

Jankowski, J.A. & W. Zielke (2000): The mesoscale sediment transport due to technical activities in the deep sea. *Deep Sea Research*: in press.

Raudkivi, A.J. (1981): Grundlagen des Sedimenttransports. SFB 79 Wasserforschung im Küstenbereich, Universität Hannover.

van Rijn, L.C. (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publications, Amsterdam.

Whitehouse, R. (1998): Scour at Marine Structures. Thomas Telford Publications. London.

Zielke, W. & R. Mayerle (1999): Küstengewässer. In: Zielke, W. (Hrsg): Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. DVWK-Schriften Heft 127, Wirtschafts- und Verl.- Ges. Gas und Wasser.

Impact studies of sea-based windpower in Sweden

von Håkan Westerberg

National Board Fisheries, Institute for Coastal Research, Nya Varvet 31, SE-426 71 Västra Frölunda, Sweden, hakan.westerberg@fiskeriverket.se

Introduction

The first offshore windmill in the world – “Svante” - was started in 1990 close to the shore on the Southeast coast of Sweden. This pilot plant has a tripod foundation, a 35 m tower and a 220 kW Windworld AS turbine. An important part of the project was a 5-year, comprehensive environmental impact study, including birds and fish. The plant was restarted in 1994 after a fire late in 1993 and it is planned to operate until 2006. A commercial project with a group of 5 turbines of 500 kW and with 40 m high towers was built in 1997 south-west of Gotland approximately 3 km from land. There is a grey-seal haulout 1.5 km from this windfarm and the impact of the construction work and the operation of the farm has been studied.

Those two projects, and one farm with 12 units under construction in the Gotland area, are the only sea-based wind energy installations in Sweden so far. There are a large number of planned projects however. Applications for planning permit of more than 1000 MW of wind-farms around Sweden are pending a decision in the High Court whether state subsidies of sea-based windpower is possible according to the waterlaw. The goal of the Swedish government is that windpower shall replace one nuclear reactor in the coming 10 years period. This implies the erection of about 200 1 MW units/year, which seems unrealistic without siting a large fraction of the farms at sea.

This review will summarise the results from a fishery investigation made at “Svante” during the period 1990-96. The results have been reported in full in Westerberg (1994) and Westerberg (1997). The bird studies at “Svante” was presented by Karlsson (1994). The investigations at Gotland relating to marine biota only covers the grey-seals. A report of this study is forthcoming (Sundberg & Söderman 1999) and the results will be described briefly here.

Underwater noise

A major concern for possible impact on fish is the underwater sound and vibrations generated by a windpower plant. The hearing of fish is acute in the low frequency range, up to approximately 500 Hz, somewhat varying with species, and sounds play an important role in the behaviour of fish as this is the only efficient medium carrying information over long distances. The sound detection system of fish works with particle displacement and acceleration rather than acoustic pressure as in terrestrial animals. The acceleration sensitivity of fishes is very high even at infrasonic frequencies, down to below 1 Hz (Enger *et al.* 1993, Sand *et al.* 1986). It has also been found that the reaction to infrasound is strong and involves fright and avoidance responses (Knudsen *et al.* 1992).

Hydroacoustic measurements in the infrasound range requires some caution regarding the methods. The hydrostatic pressure fluctuations due to surface gravity waves can contaminate the measurements and it is thus important that the hydrophone is placed sufficiently deep and is decoupled from all movements of the boat. Eddies around the hydrophone give dynamic pressure fluctuations and this can be minimised by putting a dome around the hydrophone. With those precautions a series of noise measurements were made at "Svante" at different distances and wind speeds. The main result was that the noise from the plant at low wind speed was dominated by narrow frequency bands that were multiples of the blade rotation frequency (2.08-2.13 Hz depending on the power output).

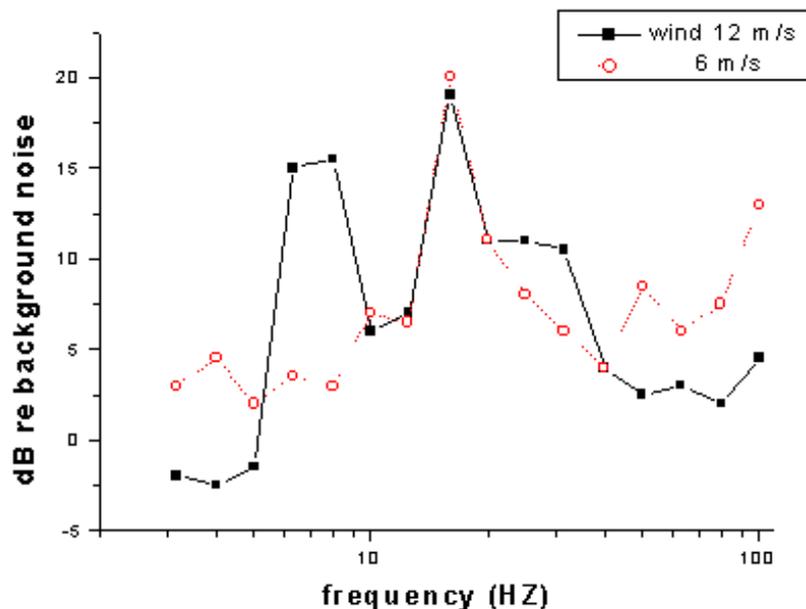


Fig. 1: The noise level in 1/3 octave bands relative to the background noise measured at 4 m depth 100 m from the windmill. The sound pressure level at the peak at 16 Hz are 102 and 113 dB re 1 μ Pa, 1 m for the wind speeds 6 and 12 m/s respectively.

The largest energy was at the 8:th harmonics. At higher wind speed a broad-band spectral peak appear around 6-8 Hz. Fig. 1 shows the excess spectral level above the ambient noise at 6 and 12 m/s measured at 100 m distance. In this particular case it seems that the noise from the windmill and the background noise increases at the same rate, so that the relative noise intensity is constant. The attenuation is approximately 3 dB for a doubling of the distance to the mill.

Effects on the stationary fish fauna

The depth at "Svante" is 6 m and the coastline is relatively straight and without islands. The bottom substrate is sand and gravel with some boulders. Experimental fishing was carried out at 9 different stations along the 6 m isobath, from 50 m to 1.6 km from the mill. Fishing was made at alternate nights where one night was with the windmill operating and one stopped. Bottom set gillnets having a random succession of panels of different mesh-width were used to sample a large range of fish species and sizes. The total fishing efforts was 82 net-nights. The species present in the catch was the same regardless of the state of the windmill. A total of 18 fish species were caught, cod, roach and shorthorn sculpin being the most common. The composition is typical for this part of the coast and no species that should have been expected were absent.

A fundamental problem is to compare fishing results over time. Three zones with about equal number of stations in each were defined; zone I from 0 to 200 m distance from the windmill, zone II between 200 and 800 m and a reference zone at larger distance. With the assumption that the reference zone was unaffected by the windmill the mean catch per effort (CPUE) in this zone for a certain day was used to normalise the catches in the other zones during the same day. The normalised CPUE's averaged over all nights with the windmill on respective off were compared. The result is shown in Fig. 2. One interpretation of this is that there is an attraction to zone I during times with the windmill stopped, and that this is balanced due to an avoidance when the mill is on. The attraction may be an effect like that of an artificial reef, but there is no measurement of the variation of fish abundance along this part of the coast before the windmill was constructed, so the difference may be due to other causes. What is measured is the catchability of fish, and the observations can be caused by a difference in activity level rather than by the fish abundance.

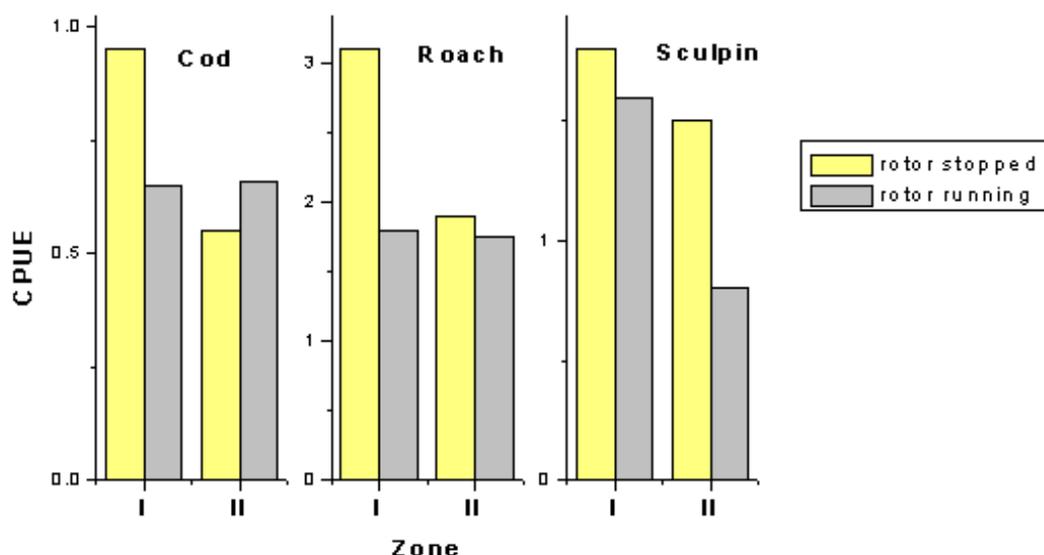


Fig. 2: The average CPUE normalised with the catch in the reference area for the zone close to the windpower plant (zone I) and at a distance between 200 and 800 m (zone II). The result is shown for the three most abundant species and with the windmill on and off.

Eel migration

The coast where “Svante” lies is the most important area for the fishery of migrating, silver eel. The possible disturbance of eel migration by the windmill was investigated by telemetry tracking and an analysis of the catch statistics at eel pound nets near the site of the mill. Time series of daily catches at several eel pound nets along the coast have been kept as part of other fishery investigations since 1982, and the data before the start of the windmill could be compared to that during 5 years of operation.

The telemetry trackings were made by active tracking with a boat equipped with a directional hydrophone. Decca and radar was used for positioning. Newly caught eels from a net north of the release site were tagged externally with ultrasonic tags and released at one or two nautical miles north of the windmill. The release was made about 500 m from the shore. Each night two eels were tracked; one with the windmill on and one with the mill stopped. The trackings continued to approximately 1 nm south of the windmill.

Altogether 7 eels were tracked with the windmill stopped and 9 when it was operating. All but two eels (one during operation and one when the mill was stopped) headed south in the general direction of the shoreline. This is the natural migration direction. There were no significant difference in migration speed or distance to the windmill in the two groups. In both cases most of the eels tended to increase the distance from the shore when they proceeded south. This means that the passing distance was 1000-2000 m typically and 500 m minimum. No behaviour could be related to the presence of the windmill at this distance.

The eel catch data are confounded by two factors; there is a large, ongoing decline in the eel catches in the whole Baltic, due to a failing recruitment since the 60-ies, and there are also very large fluctuations of the catch on a short time scale, which is influenced by wind and the phase of the moon. The former makes it difficult to separate a change in the total yearly catch before and after the start of the windmill from the general decline, and the latter means that a comparison between periods when the mill have been operating and stopped only can detect very large effects.

The analysis was focused on two pound nets, one 1200 m north of the mill (D) and one (B) approximately the same distance south. As a reference a third pound net (O) 5 km to the north was used. After correction for the large-scale trend in eel catch by normalising the catches at B and D with O the average yearly catch for the period 1985-89, before starting the plant, was compared to the period 1991-96 when it was in operation. This showed an increase of 1.5% at D and a decrease of approximately 5% at B. Neither difference is significant. The large variation between years and the short periods makes such comparison blunt, however. A power analysis shows that a minimum difference of 35% is needed to be detected with an 80% probability using a t-test at the 5% level.

Another way to treat the data is to compare daily catch data when the wind speed was below the threshold value of the turbine – approximately 5 m/s – to periods when the wind was high enough to ensure that the mill was operating. As the catch varies with the wind-speed also this comparison was made for two datasets for each speed interval; one taken during the 5 years before the start and one for the 5 year period afterwards. The result shows no significant difference in mean CPUE at low (0-5 m/s) wind speeds at D or B, but a statistically significant decrease at B of 22% at winds from 10-15 m/s. No corresponding decrease is found at D. Taking the frequency of wind speed above the threshold value into account this should translate to a yearly decrease of 15% at B.

Reaction of grey seals

Close to the Näsrevet windfarm is a well established grey seal haulout site. A thorough census, counting number of seals and days with seals observed, was made of the seals both before, during the construction and during the first year of operation of the windfarm. This was supplemented with more intense studies of the haulout behaviour in 1999. The result gave no indication that the windpower plant *per se* affected the seals. During the construction period and in connection with maintenance work on the farm boats passes close to the haulout and this caused temporary disturbances. There is no sign that the seals are abandoning the site however.

Conclusions

The few studies presented here are all that has been made in Sweden regarding effects of windpower on marine fauna. Essentially no additional data is found internationally. The chief limitations of the results are that all the fish work relates to a single, small and obsolete plant, which is unrepresentative for the modern, large farms which are planned or under construction. Nevertheless the data demonstrates small but detectable effects. The causal mechanisms are not fully clear. The foundation of the windpower plant seems to act as an artificial reef which attracts fish. During operation the catches of benthic fish decreases, either due to avoidance of the near zone, or due to an effect on fish activity. The underwater noise in the low frequency range is a probable cause. Fish migration past the plant seems to be affected in the case of eels. There are no observations of the details in the process causing this and noise or electromagnetic effect from cables to the shore are both possible. No study has been made of other migrating species, as salmon or herring. The monitoring of grey seals shows that the seals accepted the windpower plant at relatively close range, but the results will lead to a recommendation regarding the transports to and from the farm.

There is evidently a need for further research to quantify possible effects of large-scale installations. The first priority should be fundamental hydroacoustic studies of existing modern wind farms in Sweden and Denmark, which should cover the infrasonic part of the spectrum and chart the noise environment at different distances and wind speed. Another important field should be the studies of migrating species, and the possible masking effect of windfarm noise on communication sounds during spawning.

References

- Enger, P., Sand, O. & F. Knudsen (1993): Detection and reaction of fish to infrasound. ICES mar. Symp. 196: 108-112.
- Karlsson, J. (1994): Fågelstudier i anslutning till havsbaserat vindkraftverk vid Nogersund i Blekinge. BIOCONSULT Slutrapport nov. 1994.
- Knudsen, F., Enger, P. & O. Sand (1992): Awareness reaction and avoidance responses to sound in juvenile Atlantic salmon. J. Fish Biol. 9: 523-534.
- Sand, O. & H.E. Karlsen (1986): Detection of infrasound by Atlantic cod. J. Exp. Biol. 125: 197-204.
- Sundberg, J. & M. Söderman (1999): Windpower and Grey Seals: an impact assessment of potential effects by sea-based winpower plants on a local seal population. unpubl. Manuscript.
- Westerberg, H. (1994): Fiskeriundersökningar vid havsbaserat vindkraftverk 1990-1993. Rapport 5 Fiskeriverket UKJ.
- Westerberg, H. (1997): Havsbaserat vindkraftsverk vid Nogersund: Effekter på blankålsfisket. PM 970404 Fiskeriverkets Kustlaboratorium.

Potentieller Einfluß von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Säuger

Klaus Lucke

Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Universität Kiel, Hafentörn, 25761 Büsum, Germany, lucke@ftz-west.uni-kiel.de

Marine Säugetiere im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee

Die geplante Verlagerung der Standorte von Windkraftanlagen vom terrestrischen in den marinen Bereich führt zu Eingriffen in den Lebensraum mariner Säugetiere. Die kritische Betrachtung möglicher Auswirkungen eines derartigen Eingriffes kann für den Bereich der Deutschen Bucht sowie der südwestlichen Ostsee auf Wale und Robben beschränkt werden. Während Wale vollständig zu einer aquatischen Lebensweise übergegangen sind (=holaquatisch), verlassen Robben das Wasser u.a. zum Fellwechsel, Gebären und Säugen (=semiaquatisch). Folgende Arten kommen vor:

Schweinswal (*Phocoena phocoena*): Schweinswale sind vor allem in den küstennahen Gewässern der gemäßigten Breiten auf der nördlichen Hemisphäre verbreitet, so auch in der Nord- und Ostsee. Kombinierte Flug- und Schiffszählungen ergaben 1994 für die Nordsee und angrenzende Gebiete einen Bestand von 352.000 Tieren (Hammond *et al.* 1995). Für das Gebiet der eigentlichen Nordsee wird der Bestand auf 271.000 Tiere geschätzt. Der Schweinswal ist damit die häufigste Walart der Nordsee.

Schweinswale besiedeln auch die Ostsee. Dabei weisen sie allerdings ein extremes Gefälle in ihrer Verbreitung in Richtung Osten auf. Während sie in den dänischen Gewässern des Skagerrak, Kattegat und der Beltsee noch relativ zahlreich anzutreffen sind, verringert sich die Bestandsdichte zur Kieler Bucht hin deutlich. Noch geringer ist ihre Abundanz im Bereich der Mecklenburger Bucht. Östlich der Darßer Schwelle werden diese Tiere schließlich nur noch vereinzelt gesehen. Mitunter dringen sie aber auch bis in finnische Gewässer vor. Der Bestand für den Bereich der deutschen Ostseegewässer wird derzeit, basierend auf den Ergebnissen von Flugzählungen zwischen 1994 und 1996, auf weniger als 1.000 Tiere geschätzt.

Genetische Untersuchungen an gestrandeten Schweinswalen von der schleswig-holsteinischen Nord- und Ostseeküste haben gezeigt, daß es nur einen sehr geringen genetischen Austausch zwischen den Schweinswalen der Ost- und Nordsee gibt und es sich somit

bei den Tieren der Ostsee wahrscheinlich um eine separate Population handelt (Tiedemann *et al.* 1996). Eine exakte Trennung der Populationen aus der dänischen Beltsee und westlichen Ostsee ist derzeit noch nicht durchführbar. Klarheit über die Populationsgrenzen in diesem Gebiet soll eine weitere genetische Untersuchung liefern, die sich auf Tiere aus dem Bereich der dänischen und deutschen Ostsee beschränkt. Eine genaue Differenzierung der Populationen ist vor allem im Zusammenhang mit Aussagen über die Gefährdung sowie für Maßnahmen zum Bestandsschutz der Tiere von Bedeutung.

Weißschnauzendelphin (*Lagenorhynchus albirostris*): Weißschnauzendelphine sind die zweithäufigste Walart in Nord- und Ostsee. Für diese in ihrer Verbreitung auf die kalten bis temperierten Breiten des Nordatlantik beschränkte Art wurde 1994 für die Nordsee und angrenzende Gebiete ein Bestand von ca. 7.800 Tieren ermittelt (Hammond *et al.* 1995). Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich auch auf den deutschen Nordseebereich, sie gelten hier aber nicht als heimisch. In der Ostsee sind sie nur als Irrgäste zu finden.

Atlantischer Weißseitendelphin (*Lagenorhynchus acutus*): Atlantische Weißseitendelphine sind eher auf der offenen See zu Hause und bilden dort häufig Schulen von mehreren hundert Tieren. Nur im Sommer sind diese Tiere in kleineren Schulen auch im Küstenbereich anzutreffen. Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich vom nördlichen Nordatlantik bis in die Nordsee hinein. In der Ostsee sind sie ebenfalls nur als seltene Gäste anzutreffen. Ihr Bestand für die Nordsee und angrenzende Gebiete wird derzeit auf weniger als 4.000 Tiere geschätzt (Hammond *et al.* 1995).

Von den in der Nordsee vorkommenden Bartenwalen ist nur der **Zwergwal (*Balaenoptera acutorostrata*)** in den deutschen Gewässern anzutreffen. Der Bestand der Zwergwale wurde 1994 auf ca. 8.400 Tiere hochgerechnet (Hammond *et al.* 1995). Sporadisch kommen in der Deutschen Bucht und westlichen Ostsee außerdem die folgenden Zahnwale vor: Großer Tümmler (*Tursiops truncatus*), Gemeiner Delphin (*Delphinus delphis*), Rundkopfdelphin (*Grampus griseus*), Schwertwal (*Orcinus orca*), Langflossen-Grindwal (*Globicephala melas*) und Pottwal (*Physeter macrocephalus*).

Die Robben sind im Bereich der Deutschen Bucht und südwestlichen Ostsee nur mit drei Arten vertreten:

Seehund (*Phoca vitulina*): Der Seehund ist über den gesamten deutschen Nordseebereich verbreitet und dort auch heimisch. Seine Liegeplätze sind über das gesamte Wattenmeer von den Niederlanden bis nach Dänemark verstreut. Der Bestand wurde 1999 auf ca. 15.200 Tiere geschätzt. In der Ostsee reicht die Verbreitung des Seehundes über Skagerrak und

Kattegat bis zur Arkonasee. Ihr südöstlichster Liegeplatz ist Rødsand bei Gedser in Dänemark. Einen isolierten Bestand gibt es darüber hinaus auf Gotland und Öland in Schweden. Der Seehund war früher auch im deutschen Ostseeraum beheimatet, verschwand aber aufgrund zu starker Bejagung in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts aus diesem Bereich.

Kegelrobbe (*Halichoerus grypus*): Die Verbreitung der Kegelrobbe erstreckt sich in der Ostsee gegenwärtig über den nordöstlichen Bereich, vom Finnischen und Bottnischen Meerbusen bis südlich nach Gotland. Darüber hinaus gibt es isolierte Vorkommen an der schwedischen Südküste und in Dänemark. Die Bestandszahlen liegen in diesem Gebiet bei über 5.000 Tieren (mit steigender Tendenz). Die einzige Kolonie im deutschen Nordseebereich existiert auf einer Sandbank vor der Insel Amrum. Diese Kolonie weist lediglich eine Größe von ca. 100 Tieren auf. Darüber hinaus scheint Helgoland von den Kegelrobben als Liegeplatz genutzt zu werden.

Ringelrobbe (*Phoca hispida*): Die Ringelrobbe ist im Bottnischen- und Finnischen Meerbusen beheimatet und somit in ihrer Verbreitung in der Ostsee noch stärker auf den nordöstlichen Teil beschränkt als die Kegelrobbe. Ihre Bestandszahlen liegen in der Ostsee mit weit mehr als 5.000 Tieren noch über der Bestandsgröße der Kegelrobbe, ebenfalls mit steigender Tendenz.

Schlüsselart Schweinswal

Da Schweinswale die einzige in deutschen Gewässern permanent heimische Walart sind, und bei ihnen eine hohe Sensibilität gegenüber technischen Eingriffen in ihren marinen Lebensraum zu erwarten ist, wird diese Art bei der folgenden Betrachtung der möglichen Auswirkungen von Windkraftanlagen als Schlüsselart für die marinen Säugetierarten behandelt.

Schweinswale sind mit maximal 1,80 m Länge eine der kleinsten Zahnwalarten. Als eine der nicht sehr tief tauchenden Arten – bisher wurden Tauchtiefen von maximal etwa 300 m nachgewiesen - stellen die Nord- und Ostsee als flaches Schelf- bzw. Randmeer einen geeigneten Lebensraum für diese Spezies dar. Schweinswale gelten als Nahrungsopportunisten und zeigen stellenweise eine Präferenz für bodenlebende Fische (Lick & Adelung 1997).

Eine Besonderheit der Schweinswale, wie auch einiger anderer Zahnwalarten, ist ihre Fähigkeit zur Echolokation. Sie erzeugen und empfangen Ultraschallsignale (die weit über dem von Menschen wahrnehmbaren Frequenzbereich liegen) und analysieren die zurückkommenden Echos. Sie erreichen dabei Frequenzen von über 150 Kilohertz (kHz). Der

menschliche Hörbereich liegt, zum Vergleich, zwischen 20 Hertz (Hz) und 20 kHz. Da akustische Energie im Wasser einer geringeren Abschwächung unterliegt als alle anderen Energieformen, ist die Echolokation eine optimale Anpassung an ihren Lebensraum. Die Tiere können sich mit Hilfe der Echolokation in ihrer Umgebung orientieren, Hindernisse und Feinde vermeiden und vor allem ihre Nahrung orten und charakterisieren. Möglicherweise spielen die Echolokationssignale bei manchen Arten auch eine Rolle in der innerartlichen Kommunikation, worüber allerdings auf dem gegenwärtigen Stand der Forschung für die Schweinswale noch keine klaren Aussagen gemacht werden können.

Schweinswale sind nahezu vollkommen von ihrem akustischen Sinn abhängig. Da die Sichtweiten unter Wasser in unseren Breiten meistens eher im Bereich von cm bis wenigen Metern liegen, können sich die Tiere nur sehr begrenzt als Alternative auf ihren optischen Sinn verlassen. Stört oder verletzt man den akustischen Sinn der Tiere, so stellt dies eine gravierende, möglicherweise sogar letale Bedrohung für die Tiere dar.

Mögliche Auswirkungen von Offshore-Windkraftanlagen und ihre Erfassung im Rahmen von Begleituntersuchungen

Die Errichtung sowie der Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen sind mit mehreren potentiellen Gefährdungsfaktoren für die genannten marinen Säugetierarten (Schlüsselart: Schweinswal) verbunden.

Habitatverlust: Als erstes ist in diesem Zusammenhang der mögliche Habitatverlust für die Tiere im Bereich der Windkraftanlagen zu nennen. Ein derartiger Verlust kann durch die Störung oder Zerstörung der lokalen ökologischen Gegebenheiten hervorgerufen werden. Dies ist vor allem in Zusammenhang mit ungestörten Paarungs- und Aufzuchtgebieten sowie dem Bestand und der Verteilung der Nahrungsorganismen der Tiere von Bedeutung. Für die Ostseepopulation der Schweinswale mit ihrem relativ eng umgrenzten Lebensraum können derartige Veränderungen bereits eine starke Gefährdung darstellen.

Zur Identifizierung eines solchen wichtigen Habitats sollte eine vorgeschaltete Untersuchung im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung erfolgen. Da eine visuelle Überwachung aufgrund der witterungsbedingten Beschränkungen (verlässliche Sichtungen sind nur bis zu einer Windstärke von max. 3 Beaufort zu erzielen) nicht sehr aussichtsreich ist, bietet sich hier in bezug auf die Schweinswale ein akustisches Monitoring mit Hilfe von sogenannten Klickdetektoren an. Mit Hilfe dieser Geräte können die Ultraschallsignale der Schweinswale automatisch registriert und entweder zur permanenten Überwachung eines Gebietes direkt zu einer Empfangsstation übertragen oder aber zur späteren Auswertung aufgezeichnet werden.

Die Reichweite dieser Klickdetektoren ist abhängig von der Schallstärke des Echolokations-signales und der Hintergrundgeräusche. Eine zuverlässige Detektion ist mit Hilfe dieser Methode bis zu einer Windstärke von ca. 5 Beaufort durchführbar.

Weitere wichtige Anhaltspunkte über den Aufenthaltsort und die Bewegungen der Tiere können unter Einsatz von Satellitentelemetrie erlangt werden. Zu diesem Zweck werden die Tiere mit einer Geräteeinheit versehen, die unter anderem aus einem Satellitensender sowie einem Fahrtenschreiber besteht. Diese Methodik wird zur Erforschung der Beifangproblematik in der Stellnetzfisherei bereits erfolgreich eingesetzt. Bei Schweinswalen, die ohne Verletzungen aus den Stellnetzen befreit werden können, besteht die Möglichkeit, sie zu untersuchen und mit entsprechenden Sendern zu versehen. Diese Methode ist inzwischen soweit entwickelt, daß ein umfassender Einsatz in der dänischen und deutschen Ostsee denkbar wäre. Dabei muß allerdings auf zufällige Beifänge wie in der dänischen Fischerei zurückgegriffen werden, da ein aktives Fangen der Tiere nicht vertretbar wäre.

Schalleintrag und akustische Empfindlichkeit: Ein weiterer potentieller Gefährdungsfaktor ist durch den direkten und indirekten Schalleintrag der Windkraftanlagen in den Wasserkörper und die damit verbundenen möglichen physiologischen und verhaltensbiologischen Folgen für die Tiere gegeben. Der Grad der Beeinflussung eines Tieres durch akustische Signale hängt direkt von seiner Hörempfindlichkeit ab. Ist ein Tier beispielsweise sehr sensibel für Geräusche, so werden die Auswirkungen intensiver akustischer Signale entsprechend größer sein als bei einem weniger empfindlichen Tier. Hervorzuheben ist, daß die Schweinswale eine hohe Hörempfindlichkeit im gesamten Bereich zwischen 1 bis 150 kHz aufweisen. Sie sind deutlich hörempfindlicher als Ringelrobben oder Seehunde (Abb. 1). Auf der x-Achse ist die Frequenz in einem logarithmischen Maßstab aufgetragen. Auf der y-Achse sind Dezibelwerte angegeben, ein Maß für den Schalldruck eines akustischen Signals. Dezibel ist eine abstrakte Einheit und muß deshalb immer in Bezug zu einem Referenzwert – in der Unterwasserakustik 1 Micropascal, gemessen für einen Schalldruck in 1 m Entfernung zur Schallquelle [re 1 μ Pa @1m] – gesetzt werden. In der Luft liegt der entsprechende Referenzwert bei 20 Micropascal [re 20 μ Pa @1m].

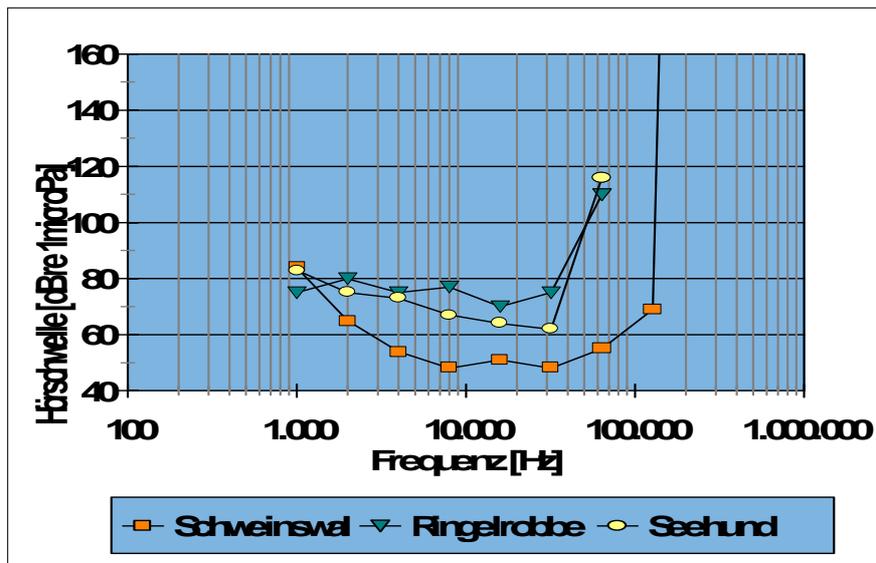


Abb.1: Hörempfindlichkeitskurven (Audiogramme) eines Schweinswales (*Phocoena phocoena*), einer Ringelrobbe (*Halichoerus grypus*) und eines Seehundes (*Phoca vitulina*).

Man kann akustische Signale in Hinblick auf ihre Wirkung auf marine Säuger generell in vier Zonen unterteilen (Abb. 2):

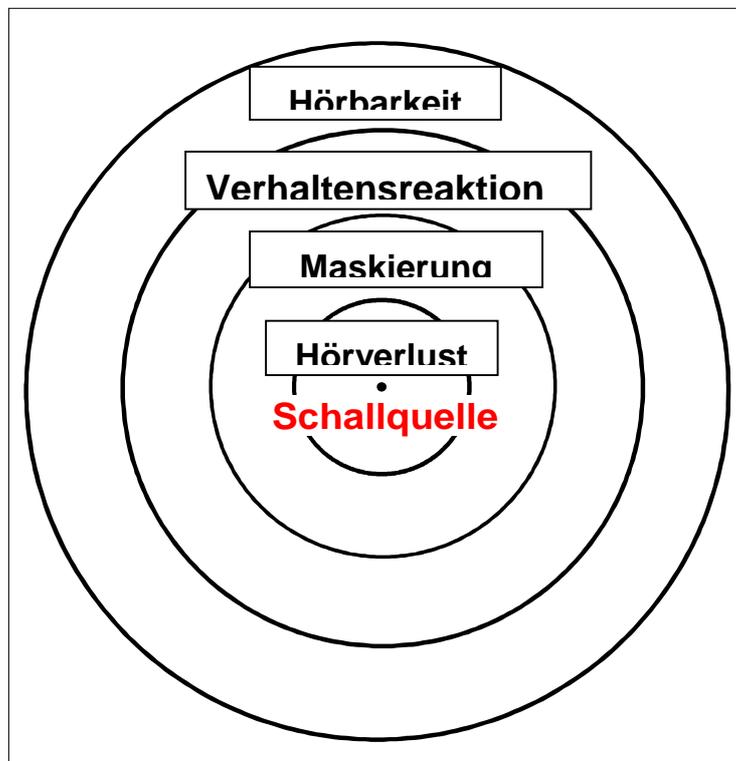


Abb.2: Schematische Darstellung der vier Einflüßzonen akustischer Signale auf marine Säuger.

1. Zone der Hörbarkeit

In diesem größten Bereich kann ein Tier die von der Schallquelle erzeugten Geräusche hören. Es ist in diesem äußeren Bereich mit keinerlei Beeinträchtigung der Tiere durch die Geräusche zu rechnen.

2. Zone der Verhaltensreaktion

Eine Zone, in der die Tiere physiologische oder Verhaltensreaktionen zeigen. Diese Zone ist normalerweise kleiner als die Zone der Hörbarkeit, da marine Säuger im allgemeinen nicht auf schwach wahrnehmbare Geräusche reagieren. Kommt es aufgrund der Geräusche zu einer Unterbrechung oder Verhinderung einer wichtigen Verhaltensweise, so kann dies durchaus signifikante Auswirkungen auf das einzelne Tier oder auch eine gesamte Population haben. Bisher konnten derartige Auswirkungen noch nicht quantifiziert werden, so daß keine eindeutigen Aussagen in diesem Zusammenhang gemacht werden können. Es gibt jedoch Hinweise auf motivationsbedingte Unterschiede in der Reaktion der Tiere auf Störungen, d.h. eine Abhängigkeit der Reaktion der Tiere von dem zum Zeitpunkt der Störung gezeigten Verhaltensmodus. Die gravierendsten Auswirkungen könnten die dauerhafte Vertreibung aus einem wichtigen Habitat oder sogar eine panikartige Fluchtreaktion sein, die zur Strandung der Tiere führen kann. Es gibt Fälle, in denen ein derartiger Zusammenhang zu vermuten ist.

3. Zone der Maskierung

In dieser Zone sind die Geräusche intensiv genug, um die Wahrnehmung biologisch relevanter akustischer Signale, beispielsweise Kommunikationsgeräusche oder Echolokationssignale sowie Geräusche von Nahrungs- oder Feindorganismen zu maskieren. Die Tiere können dann diese für sie wichtigen Signale entsprechend nicht mehr wahrnehmen. Die Maskierung von Geräuschen ist mit großer Wahrscheinlichkeit mit einer signifikanten Beeinträchtigung der Tiere oder einer Population verbunden und kann sogar letale Folgen für die Tiere haben. Zusätzlich zu den Maßnahmen, die im Zusammenhang mit dem Habitatverlust genannt wurden – akustisches Monitoring und Satellitentelemetrie - sollte bei Einsatz sehr schallintensiver Verfahren (z.B. Explosionsrammen) mit Hilfe von akustischen Vergrämern sichergestellt werden, daß sich keine Tiere im Gefahrenbereich aufhalten. Der dauerhafte Betrieb entsprechend schallintensiver Anlagen wäre abzulehnen. Akustische Vergrämer sind autonom einsetzbare Geräte, die in unregelmäßigen Abständen oder aber bei Detektion eines vorher programmierten Signals (z.B.: Echolokationssignal eines Schweinswals) akustische Signale unterschiedlicher akustischer Signatur (Frequenzcharakteristik, -verlauf und Dauer der Signale) aussenden, und so zumindest bei Schweinswalen eine aversive Vermeidungsreaktionen hervorrufen. Entsprechende Geräte existieren bereits für einige marine Säugetierarten,

für andere (v.a. Robben) hingegen müssen sie noch entwickelt werden. Der Einsatz solcher Geräte kann höchstens eine temporäre Lösung darstellen, da zum einen Gewöhnungseffekte noch nicht ausgeschlossen werden können, der Einsatz zum anderen einen zusätzlichen Schalleintrag in den Wasserkörper bedeutet („akustische Umweltverschmutzung“).

4. Zone des Hörverlustes bzw. der Gewebeschädigung

Dies ist eine Zone in der Nähe von Schallquellen, die derart hochintensiven Schall emittieren (z.B.: Explosionen), daß es zu einer physiologischen Beeinträchtigung oder sogar Schädigung der Hörorgane sowie anderer Gewebe im Körper der marinen Säuger kommen kann. Die Beeinträchtigungen bestehen zunächst in der zeitweiligen Verschiebung der Hörschwelle der Tiere. Dieser temporäre Effekt hat zur Folge, daß ein derart beeinträchtigtes Tier seine akustische Umwelt nicht mehr oder nur noch stark eingeschränkt wahrnehmen kann, da es vorübergehend betäubt ist. Die Hörschwellenverschiebung ist vermutlich ein Effekt, der durch eine physiologische Überbelastung der auditorischen Sinneszellen hervorgerufen wird. Bisher wird angenommen, daß eine Überschreitung der Hörschwelle um ca. 80 dB im Toleranzbereich unseres Gehörs liegt und diese Angaben auch auf andere Arten, so auch marine Säugetiere, übertragbar sein könnten. Diese Grenze von 80 dB sinkt in Abhängigkeit von der Anzahl der Schallimpulse und Dauer der Beschallung, d.h. eine längere oder wiederholte Belastung führt bereits bei geringerer Schallintensität zu einer temporären Verschiebung der Hörschwelle. Bei stärkerer Beschallung kann die Hörschwellenverschiebung (maximal: der vollständige Hörverlust) irreversibel sein, so daß von einer Schädigung bzw. Verletzung des Tieres aufgrund einer permanenten Hörschwellenverschiebung gesprochen werden muß. Beide Effekte (temporäre und permanente Hörschwellenverschiebung) haben starke bis letale Folgen für die Tiere und die Population zur Folge. Derartige Schallemissionen sollten komplett vermieden werden. Falls dennoch die Gefahr besteht, daß sie nicht ganz ausgeschlossen werden können, sollte begleitend eine visuelle und akustische Überwachung der gesamten Umgebung sowie akustische Vergrämungsmaßnahmen („Pinger“) eingesetzt werden, um das Risiko einer Schädigung von Tieren zu minimieren.

Eine genaue Beurteilung der Auswirkungen akustischer Emissionen auf marine Säugetiere ist auf dem gegenwärtigen Stand der Forschung derzeit nicht möglich, da die hierzu nötigen Basisdaten noch nicht vorliegen. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß diese Datenlücke aller Voraussicht nach bereits innerhalb der nächsten zwei Jahre zumindest in ihren Grundzügen geschlossen werden kann, da entsprechende Studien zur Zeit laufen. Ziel dieser Studien ist es zum einen, die Belastbarkeit des Gehörs einiger mariner Säugetierarten zu untersuchen, zum anderen die physischen Auswirkungen hochintensiven Schalls auf das Gehör und den gesamten Organismus zu erforschen. Auf diesem Weg sollen Grundlagendaten zur quantitativen Beurteilung einer Schädigung durch Schall erzielt werden. Sobald diese Studien

abgeschlossen sind, sollte es möglich sein – basierend auf den bereits genannten Messungen – Aussagen über die tatsächliche Gefährdung zumindest einiger mariner Säugetierarten zu treffen.

Bei der Betrachtung des Schalleintrages durch die Anlagen muß sowohl der über als auch der unter Wasser befindliche Teil der Anlagen als Schallquelle berücksichtigt werden. Ein indirekter Schalleintrag erfolgt über den Luftweg vom Rotor, Generator etc. ins Wasser, während in der Anlage auftretende Schwingungen über den unter Wasser befindlichen Teil der Masten direkt in den Wasserkörper weitergeleitet werden (Abb. 3).

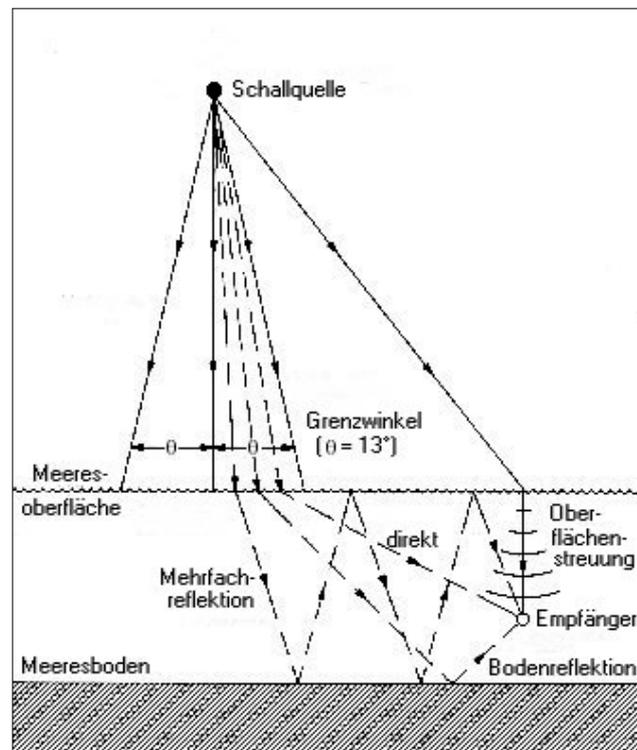


Abb.3 Diagramm der Übertragungswege des Schalls aus der Luft in den Wasserkörper (nach Richardson *et al.* 1995).

Die indirekte Übertragung des Schalls aus der Luft in den Wasserkörper ist auf einen Sektor von 13° unter der Schallquelle beschränkt. Bei einer Windkraftanlage ist die intensivste Schallabstrahlung aus dem Bereich der Gondel (= Schallquelle) zu erwarten. Über Schwingungen, die auf den Mast übertragen werden - somit den direkten Schalleintrag ins Wasser - liegen bisher nur unzureichende Angaben vor. Es handelt sich dabei aber vermutlich um Frequenzen im Körperschallbereich ($\sim 2\text{--}2,5$ Hz). Eine akustische Wahrnehmung dieser Frequenzen ist außer für Zwergwale für keine der in Frage kommende Arten wahrscheinlich. Die möglichen Auswirkungen von Körperschall auf den Organismus sind bisher noch weitgehend unerforscht.

Der Schalleintrag in den Wasserkörper sowie seine Weiterleitung unter Wasser ist von Faktoren wie der Wassertiefe, Wellenbewegung, Bodenbeschaffenheit und den akustischen Charakteristika des Geräusches selbst abhängig. Um die Intensität zu berechnen, mit der ein solches indirekt übertragenes Geräusch unter Wasser empfangen wird, werden spezielle Schallübertragungsmodelle nötig sein, die den Anlagentyp und die jeweiligen topographischen Gegebenheiten berücksichtigen.

Es wird außerdem erforderlich sein, direkte Schallmessungen an den Anlagen durchzuführen, um diese errechneten Werte zu validieren. Dazu sollten zusätzlich zu den bereits für Anlagen an Land vorgeschriebenen Schallmessungen bei Offshore-Windkraftanlagen künftig auch Unterwasserschallmessungen durchgeführt werden. Diese sollten nicht wie bisher über den Frequenzbereich von 0-5 kHz gemittelt, sondern detaillierter erfaßt werden, da nur so Aussagen über eine mögliche Beeinflussung der marinen Säuger möglich wird. Um weitere Aussagekraft zu erlangen, müßten derartige Messungen vor Beginn jeglicher Baumaßnahmen sowie im Bau- und Betriebszustand durchgeführt werden.

Weitere Parameter der akustischen Emissionen müssen bekannt sein, um die Auswirkungen auf den Schallempfänger, in diesem Fall ein mariner Säuger, einschätzen zu können. Ausgehend von der grundlegenden akustischen Empfindlichkeit der Tiere sind neben der Schallintensität und Dauer der Signale vor allem die Frequenzbandbreite von Bedeutung (d.h. handelt es sich um breitbandige Geräusche oder sinusförmige Schwingungen, die als Töne wahrnehmbar sind). Letztere Unterscheidung ist von Bedeutung, da die Tiere vermutlich eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber diesen Schallqualitäten besitzen.

Elektromagnetische Felder: Die im Bereich der Ableitungskabel je nach Kabeltyp entstehenden elektromagnetischen Felder haben möglicherweise einen direkten Einfluß auf die Tiere. Es ist allerdings bisher nicht möglich, Aussagen über die genaue Wirkungsweise (qualitativ) und eventuelle Auswirkungen (quantitativ) derartiger Felder auf marine Säuger zu machen. Auch in diesem Zusammenhang besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Sämtliche Veröffentlichungen zu diesem Thema beruhen bislang auf einer indirekten Analyse unter Abgleich von Strandungspunkten mariner Säuger und Anomalien im Erdmagnetfeld an diesen Stellen.

Der Einsatz von Gleichstromkabeln ist auf Grund der im Vergleich zu anderen Kabeltypen entstehenden stärkeren elektromagnetischen Felder abzulehnen. Die durch ihre begrenzte Übertragungslänge nur eingeschränkt einsetzbaren Drehstromkabel wären in diesem Zusammenhang deutlich zu bevorzugen. Die beste Übertragungsart scheint neueren Angaben zur Folge in der Verwendung von sogenannten „Flat-Type-Kabeln“ zu liegen, da bei diesen Kabel die geringsten elektromagnetischen Felder erzeugt werden.

Schlußfolgerungen

Im Zusammenhang mit der potentiellen Gefährdung von marinen Säugetieren durch die Errichtung von Offshore-Windkraftanlagen sind die folgenden Punkte von besonderer Bedeutung:

- es kann durch den Bau von Offshore-Windkraftanlagenkomplexen zum Verlust der Habitate der Tiere kommen,
- die Auswirkungen akustischer Emissionen sind bisher nicht quantitativ beurteilbar,
- die Auswirkungen elektromagnetischer Felder sind bisher weder qualitativ noch quantitativ beurteilbar,
- in vielfacher Hinsicht besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Betrachtung der potentiellen Gefährdung mariner Säuger durch die Errichtung von Offshore-Windkraftanlagen führt deshalb zu den folgenden Empfehlungen:

- eine Umweltverträglichkeitsprüfung sollte bei Offshore-Anlagen auch im Unterwasserbereich vorgenommen werden.
- akustisches (Unterwasser-) Monitoring sollte verbindlicher Bestandteil der Untersuchungen werden.
- bei dem Einsatz schallintensiver Verfahren müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden, für den Dauerbetrieb der Anlagen müssen derartige Verfahren vollständig vermieden werden.
- die Ableitung des Stroms sollte über Kabel erfolgen, die kein oder ein möglichst geringes elektromagnetisches Feld erzeugen.
- Die Erforschung der möglichen Auswirkungen akustischer und elektromagnetischer Emissionen von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Säuger muß intensiviert werden.

Literatur

- Hammond, P.S., Benke, H., Berggren, P., Borchers, D.L., Buckland, S.T., Collet, A., Heide-Jørgensen, M.P., Heimlich-Boran, S., Hiby, A.R., Leopold, M.P. & N. Øien (1995): Distribution and abundance of the harbour porpoise and other small cetaceans in the North Sea and adjacent waters. Final Report, LIFE 92-2/UK/027.
- Lick, R. & D. Adelung (1997): Untersuchungen an Kleinwalen als Grundlage eines Monitorings. Abschlußbericht, BMBF-Verbundprojekt 03F0139A.
- Richardson, W.J., Greene, C.R.G. Jr., Malme, C.I. & D.H. Thomson (1995): Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego.

Tiedemann, R., Harder, J., Gmeiner, C. & E. Haase (1996): Mitochondrial DNA sequence patterns of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) from the North and Baltic Sea. Zeitschrift für Säugetierkunde, Vol. 61, S. 104-111.

Teilnehmerliste des Workshops
"Technische Eingriffe in marine Lebensräume"
27. - 29. Oktober 1999 am Bundesamt für Naturschutz
Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm

Hans-Dieter Bast	Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock
Dieter Boedeker	Bundesamt für Naturschutz - Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
Ullrich Bruchmann	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Holger Brux	IBL Umweltplanung
Ulrike Burke	Wasser-und Schifffahrtsdirektion Nord
Uwe Carstensen	Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.
Ib Clausager	Danmarks Miljøundersøgelse - National Environmental Research Institute, Dänemark
Christian Dahlke	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Dr. Lutz Debus	Universität Rostock, Fachbereich Biologie - Allgemeine und spe- zielle Zoologie
Helma E. Dirks	Prognos GmbH
Peter Dost	BUND Cuxhaven
Dr. Bernhard Dreher	Umweltbundesamt
Dr. Siegfried Ehrich	Bundesforschungsanstalt für Fischerei - Institut für Seefischerei
Dr. Lothar Fiedler	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Dr. Ronald Fricke	Staatliches Museum für Naturkunde
Claus-Christian Frieß	Bundesforschungsanstalt für Fischerei - Institut für Ostsee- fischerei
Dr. Stefan Garthe	Institut für Meereskunde an der Universität Kiel - Abt. Meereszoo- logie
Gerhard Gerdes	Deutsches Windenergie - Institut (DEWI)
Dr. Fritz Gosselck	Institut für Angewandte Ökologie Forschungsgesellschaft mbH
Helmut Gravenhorst	Oberbergamt Clausthal - Zellerfeld
Bernd Hälterlein	Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wat- tenmeer
Dr. Jens Heuers	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Peter Hübner	Bundesamt für Naturschutz - Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
Dr. Thomas Klenke	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - Institut für Chemie u. Biologie des Meeres
Frans B. J. Koops	N.V. KEMA, Niederlande
Klaus Kramer	Hamburgische Electricitäts Werke AG
Kirsten Kröger	Bundesamt für Naturschutz - Außenstelle Leipzig
Dr. Jan Kube	Vogelwarte Hiddensee
Dr. Uwe Kullnick	Universität Duisburg- Institut für Mobil- und Satellitenfunktechnik
Klaus Löwe	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Klaus Lucke	Forschungs- und Technologiezentrum Westküste, Außenstelle der CAU Kiel
Dr. Stephan Marhold	J. W. Goethe-Universität Frankfurt - AG Magnetoneurobiologie
Thomas Merck	Bundesamt für Naturschutz - Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
Dirk Nentwig	Umweltministerium des Landes Mecklenburg-Vorpommern
Dr. Henning von Nordheim	Bundesamt für Naturschutz - Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm
Claudia Reese	Aktionskonferenz Nordsee e.V.
Friedrich Rischmüller	Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord-West
Dr. Manfred Rolke	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
Dr. Karsten Runge	Büro für ökologische Folgenbewertung
Rainer Schulz	Schutzstation Wattenmeer
Alfred Schumm	WWF Germany - Project Office Baltic Sea
Dr. Friedrich-Wilhelm Tesch	AWI - Biologische Anstalt Helgoland
Albrecht Tiedemann	Umweltbundesamt
Stephan Tyedmers	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste
Håkan Westerberg	National Board of Fisheries - Institut of Coastal Research, Schweden
Drs. Jan van der Winden	Bureau Waardenburg bv, Niederlande
Dr. Michael L. Zettler	Institut für Ostseeforschung Warnemünde
Prof. Dr. Werner Zielke	Universität Hannover - Institut für Strömungsmechanik