15883

Deutsche Hydrographische Zeitschrift
German Journal of Hydrography
Supplement 8

ISSN 0946-2015
© BSH, Hamburg und Rostock

Elektrosmog im Meer durch gleichstromerzeugte elektrische und magnetische Felder - eine Literaturstudie

LUTZ DEBUS

Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

Zusammenfassung

Das im Vorfeld der Inbetriebnahme einer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung durch die Ostsee erkannte Wissensdefizit zur Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf aquatische Lebensformen sollte im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie gedeckt werden.

Die Wirkung starker Felder (der Größenordnung: 10^{-2}V/cm) auf Fische wird in der Literatur ausführlich dargelegt. Die elektrische Feldstärke, die an der See-Elektrode auftritt, liegt etwa 1 Größenordnung unter der auf Fische wirksamen Größe. Der elektrische Einfluß auf Meeressäuger konnte als vernachlässigbar eingestuft werden.

Wenig geklärt sind bislang die Reaktionsmechanismen mariner Organismen auf schwache elektrische Felder der Größenordnung: 10^{-8} V/cm. Als unbekannt wurde die subletale Langzeitwirkung herausgestellt. Von besonderem Interesse ist die differenzierte Wirkung auf sessile und migrierende Organismen, auf Embryonalstadien und Larven vertebrater und evertebrater Vertreter.

Es ist allgemein bekannt, daß marine Organismen (Fische, Säuger...) das Erdmagnetfeld spüren. Inwieweit allerdings der z.B. besonders gründlich erforschte Aal seine nachweisbare Magnetfeldsensitivität tatsächlich zur räumlichen Orientierung nutzt, konnte bislang nicht eindeutig geklärt werden. Die bei Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen auftretenden Magnetfelder erreichen etwa im 6m-Kabelabstand die Intensitäten des natürlichen Erdfeldes und könnten theoretisch noch im Umkreis von 162m vom Aal erspürt werden.

Abschließend werden die Lage der bisher die Ostsee querenden Kabel und die dadurch entstehenden magnetischen Mißweisungen diskutiert und herausgestellt, daß es weiterführender Forschungen bedarf, um über mögliche Magnetwirkung von Einleiterkabeln auf aquatische Migranten (Aal, Lachs, Meerforelle, Plattfische, Säuger) relevante Aussagen treffen zu können.

Electrosmog in the sea by electric DC and magnetic fields (Summary)

The deficit in knowledge of the effects of electric and magnetic fields on aquatic organisms recognized before putting into operation a transmission of high voltage DC through the Baltic Sea shall be covered by the present literary study. In the literature the effect of strong fields (in the order of 10^{-2} V/cm) on fishes is described in detail. The electric field strength found at the sea-electrode is 1 size group under the order of magnitude affecting fishes. The electric effect on sea mammals could be classified as negligible. Response mechanisms of marine organisms on lower electric fields in the order of 10^{-8} V/cm are studied insufficiently up to now. The sublethal long-time effect was reported as unknown.

Of special interest is the differentiated effect on sessile and migrating organisms, on embryons and vertebrate and invertebrate larvae. It is generally accepted that marine organisms (fishes, mammals...) perceive the magnetic earth-field. However, it was not possible to clear up definitively until now, to what extent, for example the eel particularly thoroughly studied, really uses the proved sensivity for magnetic fields for spatial orientation.

The magnetic fields appearing between the cables in a distance of 8 m in high voltage DC transmissions reach the intensities of the natural magnetic field of the earth and thus, theoretically, could be perceived by the eel even in a range of 162 m. Finally, the position of present cables passing through the Baltic and magnetic fields produced by them are discussed. It was emphasized that further research is necessary to permit relevant statements on possible magnetic effects of one-conductor cables on aquatic migrants (eel, salmon, sea trout, flat fish, mammals).

1 Einleitung

Seit den 50er Jahren wird in der Ostsee Gleichstrom mit Hilfe von ein- oder zweileitrigen Seekabeln unter dem Meeresspiegel von einer Küste zur anderen transportiert. Abb. 1 verdeutlicht das Prinzipschaltbild einer HGÜ-Verbindung.

Bei Einleitersystemen werden neben dem Seekabel noch 2 Seeelektroden benötigt, um das Seewasser als Rückleiter benutzen zu können.

Seit Ende der 80er Jahre sind die Übertragungsleistungen auf etwa 400 bis 600 MW (Dänemark-Norwegen, Schweden - Finnland, Deutschland - Dänemark, Deutschland - Norwegen) gestiegen.

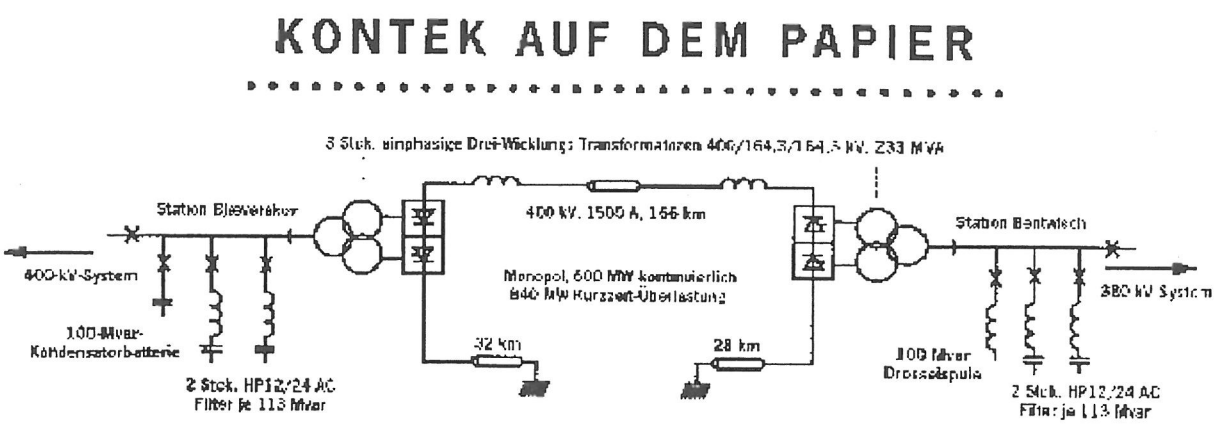

Abb. 1:Prinzipskizze der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung KONTEK aus: Seelands Stromverbindung zum Kontinent (Anon., 1996)

Auswirkungen auf marine Ökosysteme durch den Betrieb von Gleichstromübertragungen sind bis auf die Anfangsphase (1954: geringe Übertragungsleistungen) bisher nicht untersucht worden.

Im Oktober 1995 wurde direkt vor der Warnemünder Küste eine dieser See-Elektroden verlegt und für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung von Norwegen nach Deutschland in Betrieb genommen (Abb. 2).

In Vorbereitung auf diesen Umwelteingriff initiierte das Staatliche Amt für Umwelt- und Naturschutz MVP eine Untersuchung zu möglichen Auswirkungen des Betriebes derartiger Kabel auf aquatische Organismen.

Es war zu klären, welche Auswirkungen die bei der Gleichstromübertragung entstehenden elektrischen und magnetischen Felder auf aquatische Organismen, insbesondere auf Fische haben.

Seit 1925 (SCHÖNFELDER [1925]) wird elektrischer Strom zum Fischfang genutzt. Um die typische galvanotaktische und narkotische Wirkung zu erzielen, müssen Feldstärken um 0,01V/cm eingesetzt werden.

In Vorbereitung der ersten Seekabel-Verlegungen in der Ostsee wurden schon 1949 die Effekte der Stromübertragung auf Fische untersucht. Er-

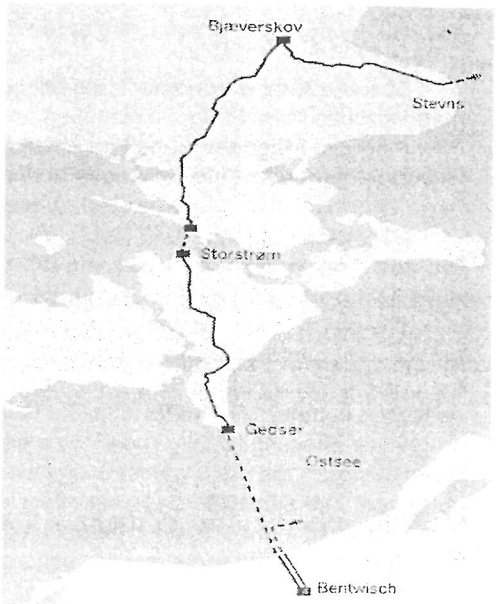

Abb.2: Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung zwischen Seeland und dem Kontinent. Bjaeverskov, Bentwisch: Konverterstatioen; gestrichelte Linie: 44 km Landkabel. Quelle: Seelands Verbindung zum Kontinent (Anon., 1996)

gebnis war eine Elektrodenkonfigurierung, die die anfänglich nachgewiesenen Beeinträchtigungen (es wurden Feldstärken über 0,01V/cm verwandt) der Fische vernachlässigbar machte.

In den folgenden 40 Jahren wurden keine weiteren Untersuchungen an See-Elektroden durchgeführt und aufgrund von Feldstärkeberechnungen anhand bekannter Kabelparameter meinte man, von einer biologischen Unbedenklichkeit ausgehen zu können.

Es gab allerdings Beobachtungen an Flußquerungen von 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.

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

Ein Magnetfeld würde an einem gleichstromführenden Einleitersystem sehr deutlich, im Falle eines Zweileitersystems (Hin- und Rückleiter nebeneinander) etwas abgeschwächter ausgebildet.

Zur Wirkung dieser 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 und Feldexperimente in der Ostsee zum magnetfeldorientierten Migrationsverhalten durchgeführt. Bei Säugern vermutet man die Fähigkeit, das Erdmagnetfeld zur Migrationsorientierung nutzen zu können.

2 Wirkung elektrischer und magnetischer Felder - eine Literaturstudie

Die oben angesprochenen Probleme wurden im Rahmen einer Literaturstudie näher erläutert.

2.1. Wirkung des elektrischen Feldes

Im Weiteren wird ausgehend von der Spezifik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung bei der Angabe von Stromdichten und Feldstärken nur die Reaktion von Fischen auf die Wirkung von Gleichstrom berücksichtigt. Impuls- und Wechselstrom wirken normalerweise schon in geringeren Stromstärken und erfordern eine gesonderte Betrachtung.

Das Verhalten von Fischen gegenüber elektrischen Feldern und Strömen im Meereswasser sollte unterschieden werden in Reaktionen auf starke elektrische Ströme mit Mindeststromdichten von $5x10^{-3}$ A/cm² und Mindestfeldstärken 0,01 V/cm und auf schwache der Größenordnung $3x10^{-6}$ A/cm² bzw. 10^{-8} V/cm.

Weiterhin hängt die Wirkung des Stromes von den biologischen Besonderheiten der Fischart (physiologischer Zustand, Größe, relative Leitfähigkeit im Vergleich zum Umgebungsmedium) ab.

2.1.1 Reaktionen auf starke elektrische Felder

Starke elektrische Felder rufen, basierend auf der Polarisierung von Nervenfasern und der dadurch erzeugten gerichteten Muskelzuckungen, bei Fischen erzwungenes Schwimmverhalten hervor (LAMARQUE 1967, PROTASOV ET AL. [1982], MEYER-WAARDEN und HALSBAND [1975]). Unterschieden wird dabei nach:

- Erregung: Zucken, Flucht;
- Elektrotaxis: zielgerichtetes Schwimmen (im Gleichstromfeld: hin zur Anode und weg von der Kathode;
- Elektronarkose: Lähmung.

Art und Stärke der elektrischen Einwirkung am konkreten Beispiel:

Anhand der Elektrodenringgröße und der Stromstärke läßt sich die Stromdichte und unter Hinzuziehung der Leitfähigkeit von Ostseewasser die an der Kathode herrschende Feldstärke berechnen (Tab. 1).

Es gilt: Elektrodenoberfläche = 4005700 cm² (Kupfer), Länge 5650 m, Stromstärke = 1500 A Gleichstrom, Leitfähigkeit von Ostseewasser = $125x10^{-4}$x $Ohm^{-1}cm^{-1}$ (bei 18 ‰, 8 °C).

: Tabelle 1

Abstand von der Elektrodenoberfläche (cm)	Stromdichte (A/cm²)	Feldstärke (V/cm)
0	0,000374	0,02000 = 2,00 V/m
10	0,000038	0,00304 = 0,30 V/m
40	0,000010	0,00082 = 0,08 V/m
100	0,000004	0,00033 = 0,03 V/m

Der von anderen Autoren (Untersuchungen der Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Hannover [1994]) über die gegenseitige Beeinflussung der HGÜ Baltic Cable und KONTEK errechnete höhere Feldstärkewert von 6,5 V/m bzw. 0,065 V/cm direkt an der Elektrodenoberfläche ist durch die angenommene geringere Oberflaeche von 186 m² (kürzere Querstreben, nur halbe wirksame Oberfläche, da der Meeresboden als nichtleitender Widerstand betrachtet wird) begründet.

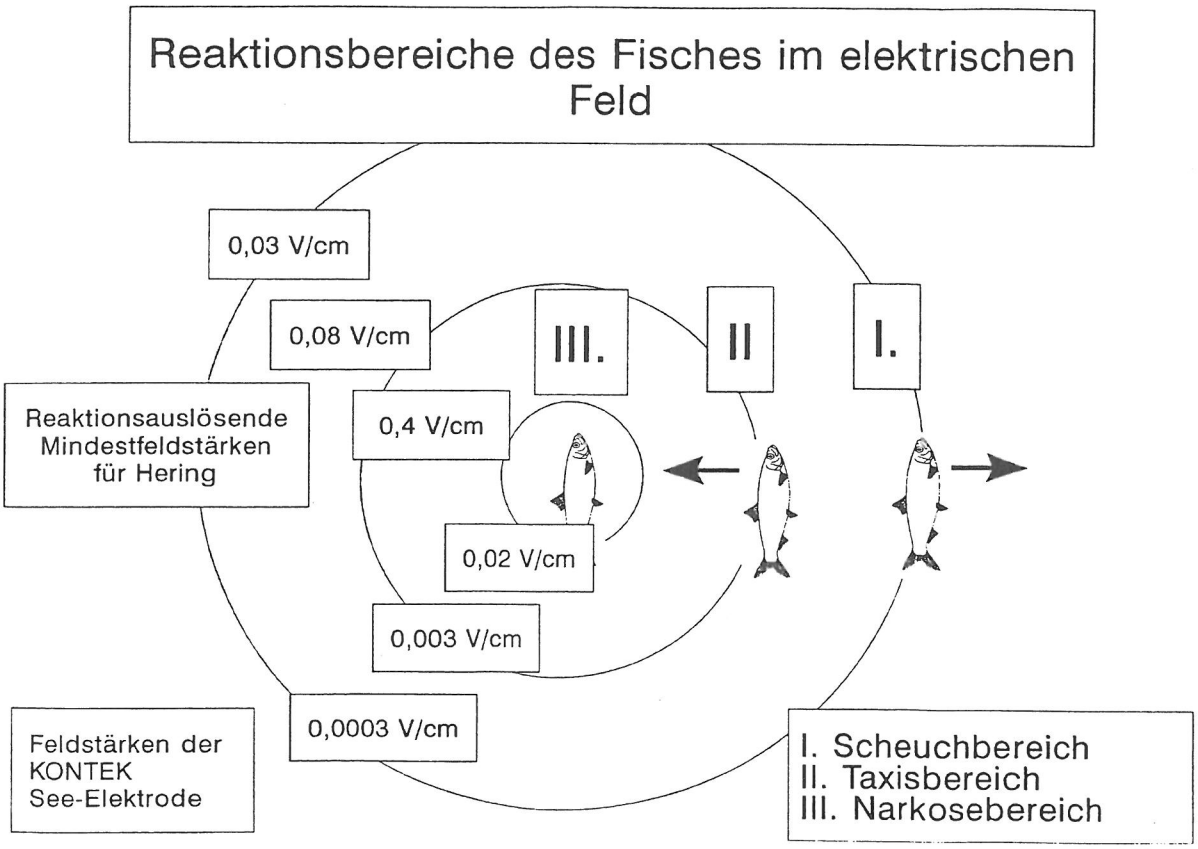

Abb. 3:Reaktionsbereiche des Fisches im elektrischen Feld

Besonderheiten biologischer Systeme im elektrischen Feld

Im Untersuchungsgebiet kommen etwa 30 Fischarten vor. 10 davon werden intensiv befischt (WINKLER [1991], Statistik des Fischereiamtes Rostock [1955-1993]). Sie alle können in den Wirkungsbereich der Elektrode gelangen.

Für viele Fischarten wurden die Feldstärke und Stromdichte experimentell bestimmt, welche mindestens erforderlich sind, um eine Reaktion hervorzurufen (STERNIN et al. [1977]).

Stellvertretend für die Vielzahl der Untersuchungen sind in Tabelle 3 einige charakteristische Werte der elektrischen Feldstärke (*E*) und der Stromdichte (*S*) bei welchen Reaktionen der Fische im homogenen Gleichstromfeld eintreten, angeführt (aus: STERNIN et al. 1972).

Die Ergebnisse zu Untersuchungen an Gleichstromübertragungskabeln bei Västervik/Schweden (HÖGLUND [1949], KOCZY [1949]) bestätigen oben gemachte Angaben über Grenzempfindlichkeiten von Fischen sehr gut.

Bei Verwendung einer Magnetitelektrode (Rohr etwa 80 x 12,8 cm), Salinitäten um 7,5 %, Wassertemperaturen 13,5 °C stellen sich die theoretisch berechenbaren Feldstärken, Stromdichten und das Verhalten der Fische (Strömling = Ostseehering = *Clupea harengus membras*) in verschiedenen Abständen von der Elektrodenoberfläche während eines Netzkäfigversuches wie in Tabelle 2 dar.

Abstand (cm)	El. Feldstärke E (V/cm)	Stromdichte S (A/cm^2)	Reaktion an der Anode
0	3,62	0,05	Lähmung
10	1,22	0,018	Narkose
100	0,095	0,0014	strebt zur Elektrode
200	0,032	0,00047	strebt zur Elektrode
> 200			weg von der Elektrode
500	0,006	0,000094	keine Reaktion

Tab. 2: Verhalten von Ostseeheringen in verschiedenen Abständen von Elektrodenoberfläche während eines Netzkäfigversuches

Bei Verwendung der Elektrode als Kathode zeigten die Heringe das typische Fluchtverhalten aus dem Bereich der Stromquelle (HÖGLUND [1949]).

Gleiche Entfernungen und Reaktionen werden für Brachsen (*Abramis brama*) und Barsche (*Perca fluviatilis*) beschrieben.

Elektrodenreichweite und Gestaltspannung

Neben den oben angeführten mindest erforderlichen Feldstärken und Stromdichten wurde festgestellt, daß jede Fischart eine für jeden Reaktionstyp (Scheuchen, Taxis, Narkose) spezifische Gestaltspannung U_l besitzt, die, sobald sie von Kopf bis Schwanz am Fisch anliegt, diese Reaktion hervorruft. Ihre Größe wird experimentell bestimmt. Sie ist unabhängig von Fischlänge und Fischart. Die Narkosegestaltspannung liegt bei den meisten Fischarten zwischen 1 bis 5 V (BOBZIN und FINNERN [1978]).

Im Meer ist sie größer als im Süßwasser, da das Verhältnis von Stromdichte Fisch/Wasser im Salzwasser kleiner ist als im Süßwasser. Dies beruht darauf, daß Meerwasser besser leitet als der Fischkörper und daher die Stromdichte im Fisch geringer als im Wasser ist. Damit wird aber die zur Reaktion erforderliche Gestaltspannung U_l größer (Abb. 4).

Mit $E_o = U_l \times l^{-1} \times k$ (E_o= Feldstärke, U_l = Gestaltspannung, l = Fischlänge, k = von der Lage des Fisches im Feld abhängige Größe) läßt sich zeigen, daß, je geringer die Länge eines Fisches ist, die eine Erregung hervorrufende Feldstärke um so größer werden muß.

Berücksichtigt man die in der Größenordnung für viele Fische in salzigen Gewässern ähnlichen Empfind-

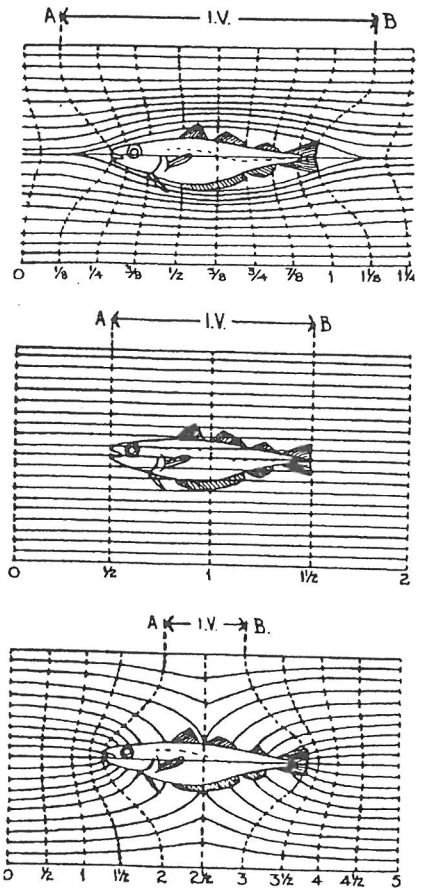

Abb. 4: Verlauf der elektrischen Kraftlinien bei einem Fisch in Salzwasser (oben), im Äquivalentbad (Mitte) und im Süßwasser (unten)
A - B: Gestaltspannung; 0 - 5: Spannung (V)

Quelle: nach CATTLEY aus MEYER-WAARDEN et al. (1975)

Art	Länge (cm)	Bedingung	Feldstärke E (V/cm)	Stromdichte S (A/cm²)	Reaktion
Europäische Sardelle (*Engraulis encrasicolus*)	12	16 - 18,5 ‰	0,018		erste ungerichtete Zuckung
Forellen	20	1000 mS/m	0,202	0,002	Elektrotaxis
Ostseehering (*Clupea harengus membras*)	15	5 - 7,5 ‰, 15 °C	0,0326		ungerichtete Zuckungen
			0,084		Elektrotaxis-> Anode
			0,416		Lähmung

Tab. 3: Charakteristische Werte der elektrischen Feldstärke (*E*) und Stromdichte (*S*) auf die die Fische im homogenen Gleichstromfeld reagieren

lichkeiten gegenüber homogenen Elektrofeldern (vgl. Tab. 3) und berücksichtigt man den schnellen Abfall der Feldstärke und Stromdichte an der Elektrode (Tab. 1) wird ersichtlich, daß schon im Abstand von 10 cm die Feldstärke so schwach ist, daß selbst eine Schreckreaktion beim Einschalten des Stromes unwahrscheinlich ist. Die Beeinflussung der Fische in den für den Elektrofang üblichen Gruppierungen kann ausgeschlossen werden.

Im Falle des direkten Kontaktes mit der Elektrode dürften Fische unabhängig ihrer Länge dann keine Reaktion zeigen, wenn ihre Gestaltspannung größer als 0,01 V ist. Dies trifft sowohl für den Plötz als auch für die Forelle zu. Die sich aus der Kreutzerschen Formel (STENGEL und FRIEDMANN [1977]) zur Berechnung der Reichweite (nur innerhalb dieser Reichweite kann der Fisch "seine" Gestaltspannung abgreifen) einer Elektrode ergebenden Abstände sind zu gering, als daß ein Fisch über seine Körperlänge die zur Reaktion notwendige Gestaltspannung abgreifen könnte (vgl. Tab. 4 und Abb. 5).

Gestaltspannung (V)	prozentuale Elektrodenreichweite von der Fischlänge
0,05	67,6
0,1	33,8
0,5	6,7
1	3,3
5	0,7

Tab. 4: Abhängigkeit der Fängigkeit einer Elektrode von der Gestaltspannung

Es wird die Einflußreichweite der Elektrode in Abhängigkeit von fischlängenunabhängiger Gestaltspannung gezeigt. Berücksichtigt wurden die konkreten Bedingungen des Elektrodenbetriebes vor Warnemünde: Stromstärke = 1500 A, spezifischer Wasserwiderstand = 0,8 Ohm x m, zylinderförmige Elektrode. Der Fisch reagiert auf die Elektrode nur dann, wenn das Verhältnis aus seiner Länge und der berechenbaren Elektrodenreichweite mindestens gleich oder größer 1 ist.

Gewisse besondere Umweltbedingungen, wie Aufliegen oder Übersanden der Elektrode können deren Elektrowerte derart verändern, daß Fische mit geringen Gestaltspannungen in unmittelbarer Elektrodennähe gewisse Wirkung verspüren würden.

Reaktionen von Meeressäugern

Genaue Angaben über Empfindlichkeitsgrenzen von Kleinwalen (insbesondere für den in der Ostsee beheimateten Schweinswal - *Phocoena phocoena*) oder Robben gegenüber elektrischen Gleichstromfeldern wurden in der Literatur nicht gefunden.

Vergleicht man aber die elektrischen Voraussetzungen für den kommerziellen Elektrowalfang mit Spezialharpunen (Stromstärken von 35 bis 60 A, Impulsstromleistungen von 30 bis 80 kW mittlere effektive Leistung einige kW, MEYER-WAARDEN und HALSBAND, [1975], STERNIN et al. [1972]) mit den Elektrodenringwerten (7500 V; 0,00037 A) im Falle eines Schnauzenkontaktes (1 cm²), würden die aufnehmbaren Leistungen um 3 Größenordnungen niedriger liegen. Eine Beeinflussung durch die Wirkung des elektrischen Stromes scheint daher unwahrscheinlich.

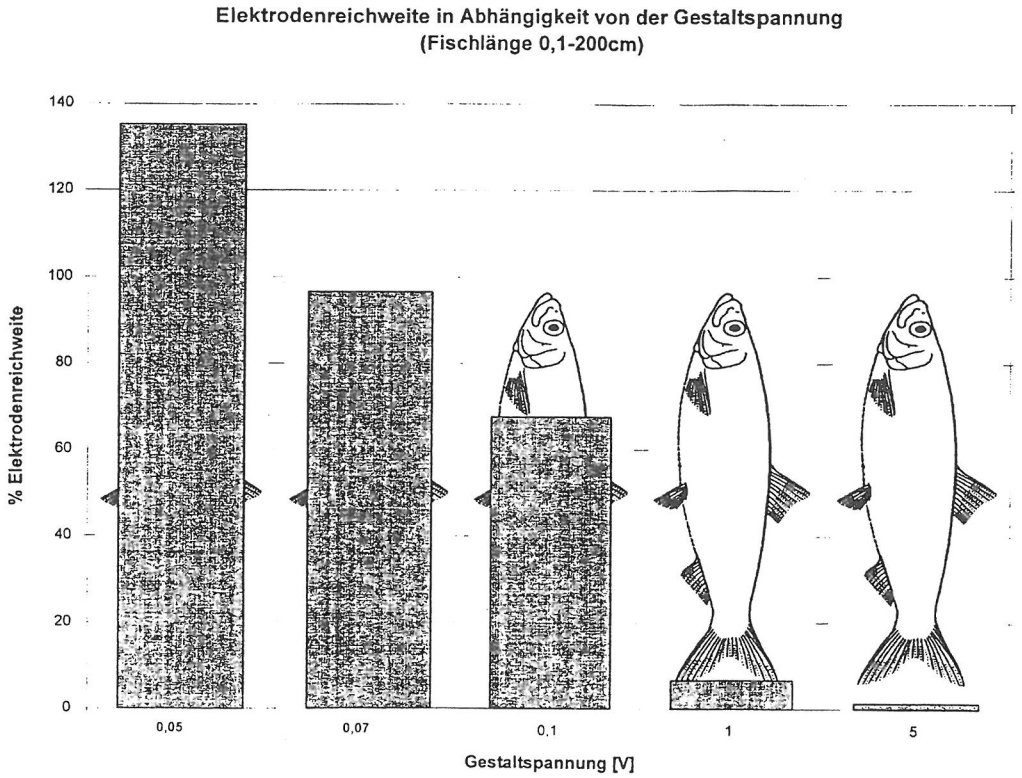

Abb. 5: Elektrodenreichweite in Abhängigkeit von der Gestaltspannung

2.1.2 Reaktionen auf schwache elektrische Felder

Schwache elektrische Felder der Größenordnung 1 µV/cm = 10^{-6} V/cm bilden sich in etwa bis zu 10 km Entfernung von der Elektrode.

Dies ist eine Größenodrnung, wie sie regelmäßig an natürlich im Meer entstehenden, ständig vorhandenen oder sich spontan bildenden elektrischen Feldern gemessen werden kann.

Diese besitzen nach STERNIN et al. [1972] etwa Stromdichten von 3 x 10^{-6} A/cm^2. PROTASOV et al. (1982) geben allerdings einen Wert von 3 x 10^{-6} A/m^2 (= 3 x 10^{-10} A/cm^2) an.

Sehr wenig geklärt sind bisher die Reaktionsmechanismen mariner Organismen auf solch schwache Felder.

Sogenannte "elektrische" und "nichtelektrische" Fische reagieren aufgrund Vorhandenseins von entweder gut ausgebildeten oder aber unspezialisierten Organen (im wesentlichen Organe der Seitenlinie und aus ihnen im Verlauf der biologischen Evolution hervorgegangene spezialisierte Sinneszellen - z.B. Lorenzinische Ampullen) auf schwache elektrische Felder unterschiedlich.

"Elektrische" Fische

Die Empfindlichkeit von mit Elektrorezeptoren ausgestatteten Fischen (Nilhecht Gymnarch - BASOV [1974]) liegt um 1 µV/m (= 10^{-8} V/cm) (PROTASOV et al. [1982]).

So kann z. B. der Kleine Katzenhai (*Scyliorhynus canicula*) das eine Flunder (*Pleuronectes platessa*) umgebende elektrische Feld (0,4 µV/cm = 4 x 10^{-5} V/cm) wahrnehmen und somit zur Beutefindung nutzen (DIJKGRAAF und KALMIJN [1966]).

Der Katzenhai kommt in der Ostsee, speziell vor der Mecklenburger Küste nicht vor, wird aber an den dänischen Küsten der Nordsee, im Skagerrak und Kattegat gefangen (DUNCKER [1960]).

Tiere mit derartigen Sensoren könnten auf der Nahrungssuche beim Durchschwimmen des elektrischen Feldes einer See-Elektrode erhebliche Beeinflussung erfahren.

"Nichtelektrische" Fische

Untersuchungen zum Wahrnehmungsverhalten gegenüber schwachen elektrischen Feldern durch

Fische ohne spezialisierte Elektrorezeptoren liegt für eine große Artenanzahl vor.

So wurde bei der Untersuchung des Migrationsverhaltens von Acipenseriden (Störe) entdeckt, daß Flüsse querende hochvoltige Überlandleitungen den Laichaufstieg behindern. Die Fische durchschwimmen erst nach einer gewissen Zeit die Überlandstromleitungen, dort wo sie abweichend von ihrer ursprünglichen Route die geringste elektromagnetische Feldbeeinflussung erfahren (PODDUBNYJ et al. [1978, 1979] zit. in PAVLOV [1989]).

Es wurde entdeckt, daß Fische von einem meßbaren elektrischen Feld umgeben sind (BASOV [1985]). Potentialdifferenzen zwischen 25 bis 250 µV werden aufgebaut (BASOV [1985]).

Besonders starke Felder werden an Wanderarten gemessen.

Schwarmfische sollen dieses bei der Formierung zu Schwärmen als Ganzheitssignal nutzten können. Berechnungen des einen solchen Fischschwarm umgebenden Dipols ergaben, daß die maximalen Potentialdifferenzen des Schwarmdipols 17 mal größer sind, als die Potentialdifferenz das einen Einzelfisch umgebenden elektrischen Dipols (PROTASOV et al. [1982]: 194).

Eine Elektrorezeption ohne spezialisierte Organe ist möglich und wird "passive Elektroorientierung" genannt (BASOV [1985]: 65).

Bei Versuchen in der Bucht Titovskoe Ozerko der Barentssee mit sehr niedrigen Feldstärken (0,005-0,001 mV/cm = 5×10^{-6} V/cm) wurde eine gerichtete Schwimmbewegung von Heringen entlang der Feldlinien beobachtet. Allerdings ließen sich diese Ergebnisse im Labor nicht nachvollziehen (STERNIN et al. [1972]).

Eine andere Variante der Reaktion von Fischen auf schwache elektrische Felder kann im Verhalten gegenüber den tellurischen Strömen beobachtet werden. Dies sind durch Wechselwirkung der solaren Teilchenstrahlung mit dem geomagnetischen Feld entstehende elektrische Ströme. Sie erreichen im Meer Feldstärken von 1 mV/km (1×10^{-8} V/cm) und Stromdichten um 3×10^{-6} A/m^2 (= 3×10^{-10} A/cm^2).

MIRONOV [1948] und PROTASOV et al. [1982] fanden positive Korrelationen zwischen der geomagnetischen Aktivität (entnommen aus dem Bulletin Jaga Geomagnetical Data) und dem Heringsfang (entnommen aus dem Bulletin Statistical Peshes Maritimes) in der Norwegischen See und negative Korrelationen zum Heringsfang an der Murmansker Küste.

Erklärbar waren diese Erscheinungen durch Abwanderverhalten der Heringe aus Schelfgebieten mit "hoher" Feldstärke (100 mV/km = 1×10^{-6} V/cm) während Zeiten intensiver Sonnenaktivität in tiefer gelegene, ruhigere Seegebiete (Norwegische See) (PROTASOV et al. [1982]).

Der Einfluß der Tellurströme auf das Wanderverhalten von Fischen wurde bisher aufgrund der horizontalen Inkonstanz dieser Einflußgröße von etwa 1 µV/m ausgeschlossen.

ROMMEL [1973] gibt eine Empfindlichkeit des Europäischen Aals gegenüber Stromdichten von 0,00167 µA/cm^{-2} (= $0{,}00167 \times 10^{-6}$ A/m = $1{,}67 \times 10^{-9}$ A/cm^2 und des Pazifischen Lachses von 0,0015 µA/cm^{-2} = $1{,}5 \times 10^{-9}$ A/cm^2 an.

Induktionsströme, die durch die Wechselwirkung zwischen dem Erdmagnetfeld und ozeanischen Strömungen entstehen, bilden elektrische Felder mit Feldstärken von 40 mV/km (etwa 120×10^{-6} A/m^2 = $1{,}2\ 10^{-8}$ A/cm^2) (MC CLEAVE ET AL. [1971]). Für den amerikanischen Aal Anguilla rostrata wurde seine Elektroempfindlichkeit mit 0,67 mV/cm bestimmt (ROMMEL and MCCLEAVE [1972]).

Eine Orientierung an elektrischen Feldern in der Größenordnung der vom Seekabel erzeugten 10^{-6} V/cm wäre für Aal und Lachs also möglich.

Differenzierte Reaktionen sessiler und migranter Embryonen und Larven vertebrater Vertreter

In der zur Verfügung stehenden Literatur waren Untersuchungsergebnisse zu Reaktionen sich entwickelnder biologischer Systeme auf elektrische Felder unterrepräsentiert. PROTASOV et al. [1982] kommen in einer Literaturdurchsicht zum Schluß, daß eine Beeinflussung der Entwicklung, des Wachstums, der Regeneration und anderer biologischer Prozesse durch langzeitig wirkende elektrische Felder unbestreitbar gegeben ist. Die Feldwirkungen sind komplizierter Natur. Da die Experimente nicht immer eindeutige Resultate liefern, wird eine indirekte Wirkung des elektrischen Feldes über andere biologische Prozesse vermutet.

Reaktionen Evertebrater

Die Einflüsse von elektrischen Feldern während des Betriebes von Gleichstrom-Seeübertragungen auf wirbellose Organismen sind durch einige wissenschaftliche Untersuchungen abgeschätzt

worden (HÖGLUND [1949], STERNIN et al. [1972]; PROTASOV et al. [1982]). Die vorhanden Angaben hierzu beziehen sich entweder auf Süßwasserarten der Gattung Zuckmücken (*Chironomus*), Dreikantmuschel (*Dreissena*) u.a. oder um im Brack- oder Salzwasser lebenden Seitenschwimmerkrebschen (*Gammarus*), Meeresasseln (*Idothea*), Schlickkrebschen (*Corophium*) und Meeresborstenwürmer (*Nereis diversicolor*) (nach POWILEIT [schriftl. Mitt.]).

Eine Wirkung auf Zooplankter und Benthosorganismen tritt im Süßwasser bei Feldstärken von 0,2-5V/cm (STERNIN ET AL. [1972]) als Galvanotaxis und Galvanonarkose ein.

Die Grenzwerte der Sterblichkeit für im Salzwasser lebende Wirbellose sollen nach PROTASOV et al. 1982) niedriger sein, als die für Süßwasserwirbellose. Einwirkzeiten wurden nicht genannt.

Für *Crangon sp.* wurde Sterblichkeitsraten von 0,5% bei Feldstärken von $E_{0,5}$= 2,2-5 V/cm und Sterblichkeitsraten von 50% bei E_{50}= 3-10 V/cm gemessen.

Eine Ausnahme macht Nereis diversicolor dessen Sterblichkeiten zwischen 0,5%-50% bei Feldstärken $E_{0,5}$ - E_{50} von größer als 10 V/cm erreicht werden.

Nach PROTASOV et al. [1982]: 299) sind die Sterblichkeiten von Wirbellosen gegenüber Wechsel und Gleichstrom etwa gleich und betragen einige Zehntel V/cm (rund 0,5 V/cm).

HÖGLUND [1949] und KOSZY [1949] beobachteten an Ostseearten bei Feldstärken von 1,22 V/cm in der direkten Umgebung (10 cm Entfernung) der Elektrode typische Reaktionen des Auf-die-Elektrode-zuschwimmens (Galvanotaxis) bis hin zur Lähmung.

Subletale Effekte

Als unbekannt wurde die subletale Langzeitwirkung herausgestellt.

2.2 Wirkung des magnetischen Feldes

Auf folgende Fragen ist zu antworten:

- Spüren aquatische Organismen Magnetfelder?
- Dient das Erdmagnetfeld als Orientierungshilfe?
- Welche magnetischen Größenordnungen erzeugt das HGÜ-Kabel?

2.2.1 Spüren aquatische Organismen Magnetfelder?

Viele Autoren konnten bestätigen, daß Fische Magnetfelder auch in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes spüren und auf künstlich hervorgerufenen Änderungen derselben reagieren (BRANOVER et al. [1971], VASILYEV et al. [1973], TESCH [1974], TESCH UND LELEK [1973], KARLSSON [1984]).

Besonders hervorzuheben sind die gut ausgeprägten Reaktionen von Haien, Rochen und Stachelrochen (*Uranolophus halleri*) auf Felder, schwächer als das Erdmagnetfeld (KALMIJN [1977, 1982]).

Eine gesteigerte Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldänderungen (in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes) weisen besonders Fischarten auf, die in ihrem Lebenszyklus (insbesondere Laichwanderungen) Migrationen vollführen (ABALMAZOVA [1985]).

Ein wichtiges Untersuchungsobjekt zur Klärung dieses Problems ist der Europäische Aal (*Anguilla anguilla*).

In Laborexperimenten (mit Richtungsverdrehung oder Ausschaltung der horizontalen und vertikalen Komponenten des natürlichen Erdmagnetfeldes) wurde nachgewiesen, daß der Aal eine hohe Empfindlichkeit gegenüber erdmagnetfeldähnlichen Feldern: 47 µTesla, aber auch noch schwächeren Magnetfeldern, etwa 3,8% der Intensität des Erdmagnetfeldes besitzt (TESCH et al. [1992]).

Die während der jährlichen Wanderungen von den Blankaalen eingeschlagene NW-Richtung auf dem Kontinentalschelf und die SO-Richtungswahl des stationären Gelbaals (TESCH [1974a]) ließ sich mit Laborexperimenten zumindest durch die Richtungsorientierung der Aale entlang der NW-SO-Achse der Versuchstanks bestätigen. Eine eindeutige Richtungswahl der Blankaale nach NW und der Gelbaale nach SO konnte in den Experimenten nicht nachgewiesen werden.

Der auslösende Faktor dieser sowohl nach NW als auch nach SO ausgerichteten Schwimmaktivität konnte noch nicht analysiert werden (TESCH et al. [1992]).

Insbesondere bleibt ungeklärt, ob der Aal Änderungen des Neigungswinkels der vertikalen Komponente des Erdmagnetfeldes zur Richtungswahl verwendet.

An wandernden Formen der bodennah lebenden Barbe aus dem Schwarzen Meer (*Mullus barbatus ponticus*) und der pelagischen Stöckermakrele

(*Trachurus mediteraneus ponticus*) konnten Magnetfeldempfindlichkeiten bei nach unten wirkenden Magnetfeldänderungen der Vertikalfeldkomponente festgestellt werden (ABALMAZOVA [1985]).

2.2.2 *Wird das Erdmagnetfeld als Orientierungshilfe bei der natürlichen Migration benutzt?*

Obwohl experimentell bestätigt wurde, daß Fische Magnetfelder erkennen, steht der Nachweis, ob diese Fähigkeiten auch für die natürliche Orientierung benutzt wird, noch aus (KALMIJN [1982]).

Die für die Ostsee durch Markierungs- und Verfolgungsexperimente gefundene SW-Wanderrichtung der Aale (TRYBOM und SCHNEIDER [1908], MÄÄR [1947], KARLSSON [1984]) könnte auf ein magnetkompaßgesteuertes Verhalten deuten (KARLSSON [1984]). Diese Richtung kann durch eine zweite Kompaßrichtung (LD) ersetzt werden, sollte es dem Tier nicht mehr möglich sein, die Migration in SW-Richtung fortzusetzen (Markierungsversuch von MARTINKÖWITZ [1960, 1961]) (Abb. 6).

TESCH et al. [1992] vermuten, daß die SW-Wanderrichtung auf den besonderen geomagnetischen Bedingungen in der Ostsee beruhen (eine um 1 µ Tesla = +2% größere Total-, eine um 11% größere Horizontal- und eine um 4% größere Vertikalintensität des Magnetfeldes im Vergleich zum Hamburger Gebiet).

Im Bereich des Nordseeschelfes wird von TESCH [1979] eine magnetgesteuerte NW-Wanderrichtung diskutiert, die in eine WSW-Richtung übergeht, sobald der Aal den Kontinatalabhang erreicht.

Abb. 6: Wanderrichtung von Aalen in der Ostsee

Ausgehend von der Möglichkeit, daß Magnetfeldänderungen der Größenordnung des Erdmagnetfeldes und noch schwächerer Felder erkannt werden können, diskutieren TESCH et al. [1992], ob Aale für ihre Laichmigration das Erdmagnetfeld als Kompaß benutzen, um von Nordeuropa bis zum Sargassomeer zu gelangen.

So bestehen Vorstellungen, daß die Aale, sobald sie den europäischen Kontinentalabhang erreichen, Linien gleicher magnetischer Induktion (49 µTesla), die von Nordirland bis zu den Bermudainseln verlaufen, folgen könnten (WENDT [1990]).

Jedoch ist der physiologische Wirkmechanismus der Wahrnehmung des Erdmagnetfeldes auch heute noch nicht restlos geklärt (TESCH et al. [1992]).

Ob der Aal das Erdmagnetfeld direkt spürt (TESCH [1974b]) oder aber ob er die im Fischkörper durch die Fischbewegung im Magnetfeld induzierten elektrischen Ströme wahrnimmt, wie von BRANOVER et al. [1971] und GLEISER and KHORDORKOVSKJ 1971) dargestellt, ist noch strittig.

Bisher konnte nachgewiesen werden, daß die Schädel-, Wirbelsäulen- und Schultergürtelknochen des Aales magnetisierbares Material mit einer magnetischen Sättigung von 10^{-3} emu/g enthalten (HANSON et al. [1984]).

Vorstellungen über gleiche Grundlagen des Migrationsverhaltens vom Atlantischen Lachs (*Salmo salar*) bedürfen weiterer Feld- und Laborexperimente. Sie sollen klären, ob der Lachs das Erdmagnetfeld für seine langen Wanderungen nutzen kann (TESCH [1979]).

Das Magnetfeld und Meeressäuger

Das geomagnetische Feld soll eine Orientierungshilfe für Wale darstellen. Änderungen dieses Feldes sollen Ursache für das immer wieder zu beobachtende Stranden der Meeressäuger sein. Diese These wurde auf einem Internationalen Meeressäuger-Symposium im Delphinarium von Harderwijk am Ejsselmeer als Forschungsergebnis des California Institutes of Technolgy vorgestellt (Neues Deutschland, 3.5.1994).

2.2.3 *Größenordnungen der durch HGÜ erzeugten Magnetfelder*

Anhand der bekannten Beziehungen für die ma-

gnetische Feldstärke und Induktion um einen idealisierten geraden, unendlich dünnen elektrischen Leiter läßt sich die Stärke des vom Hochspannungs-Gleichstromkabel erzeugten magnetischen Feldes abschätzen:

$$H = I/2\,\pi \times s$$

wobei H = magnetische Feldstärke [A/m]; I = Betriebsstrom [A]; s = Abstand vom Kabel [m].

$$B = H \times \mu_o \times \mu_{rel}$$

wobei B = magnetische Induktion als Ausdruck der Intensität [Tesla]; μ_o = magnetische Feldkonstante = $4\,\pi \times 10^{-7}$ V x s/A x m; $\mu_{rel} = 1$.
Daraus folgt:

$$B = 2I/s \times 10^{-7} \text{ Tesla.}$$

Die totale Intensität des Erdmagnetfeldes bei Hamburg beträgt 47,5 µTesla, in der Ostsee etwa 48,5 µTesla (TESCH et al. [1992]). Diese magnetischen Induktionen werden im Abstand von etwa 6 m um das Seekabel erzeugt.

Vergleicht man diesen Wert mit den oben gemachten Ausführungen über die Empfindlichkeit des Aales auf magnetische Induktion, kommt man zum Schluß, daß der Aal das vom Kabel erzeugte magnetische Feld wahrnehmen kann. Die um das Kabel entstehende magnetische Induktion dürfte nach den Angaben von TESCH et al. [1992] (der Aal spürt 3,8% des natürlichen Feldes) noch im Abstand von 162 m für den Aal spürbar sein.

Beim Durchschwimmen eines solchen Korridors mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,3 m/sek würde sich der Aal im Falle der Querung des Kabels im 90°-Winkel etwa 9 Minuten im Bereich des anders gerichteten Magnetfeldes befinden.

Diese Zeit sollte nach TESCH et al. [1992] dem Aal genügen, um Veränderungen des Magnetfeldes festzustellen und darauf zu reagieren.

Wie die Untersuchungen von UHLIG und SCHULZ [1993] zeigen, kann ein nach Magnetkompaß fahrendes und sich dem Kabel unter einem spitzen Winkel näherndes Schiff vom Kabel durchaus "eingefangen" und in dessen Richtung weitergeleitet werden.

Falls sich der Aal tatsächlich am Erdmagnetfeld orientiert, wären ähnliche Wirkungen auf ihn denkbar.

In diesem Zusammenhang wäre es interessant, mehr über die in den Mitteilungen der Preußen-Elektra vom Januar 1994 erwähnten "jahrelangen Beobachtungen an den Seekabeln Konti-Skan und Fenno-Skan" zu erfahren. Wie zu berichten war, hatte der Betrieb der Anlagen auf die Fauna keinen Einfluß.

Obwohl bisher beim Betrieb von Hochspannungs-Gleichstromkabeln in der Ostsee keine nachteiligen Folgen festgestellt wurden, sollen in Zukunft betriebsbegleitende Untersuchungen den Energieübertragungsbetrieb am Baltic Cable beobachten. So wird die schwedische Nationale Fischereibehörde eine Analyse der Fangstatistik und Verhaltensstudien mit Hilfe von Ultrasonartelemetrie an Blankaalen durchführen (WESTERBERG, schriftl. Mitt.).

2.2.4 HGÜ-Kabel in der Ostsee

Die seit 1954 in der Ostsee verlegten HGÜ-Kabel (Abb. 7) queren alle die Migrationswege des europäischen Aales: W- (Fenno-Skann) und SW-(Gotland) Küste Schwedens, Kattegat (Konti-Skan 1+2) und Skagerrak (Skagerrak), Baltic-Cable und Kontek.

Mißweisungen größeren Ausmaßes vom magnetischen natürlichen Nordpol weg könnten durch das Konti-Skann-Kabel (seit 1965, seit 1988 geringer Einfluß, da 2. Kabel verlegt) und durch das Fenno-Skan (seit 1989) gegeben sein.

Die nach Berechnungen der Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik an den Überschneidungspunkten der beiden HGÜ-Kabel Baltic-Cable und Kontek erhöhten Werte der magnetischen Induktion (Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik [1994]) sind auf wenige hundert Meter im Umkreis begrenzt. Da sie aber die gleichen Richtungsmißweisungen hervorrufen, wie das 160 km quer über die Ostsee verlaufende Kabel, sind sie vermutlich ohne spezifisch andere Auswirkungen.

Eine Mißweisung, wenn auch in geringem Umfang (UHLIG und SCHULZ [1993]), ist auch dann gegeben, wenn der Strom durch zwei nahe beieinander liegende Kabel in jeweils verschiedene Richtungen fließt.

Für die Kabel Skagerrak (Abschwächung der Mißweisung durch beide Stromrichtungen seit 1977) und Gotland (seit 1987 beide Stromrichtungen, davon eine nach West!) dürften solche geringen Mißweisungen vorgelegen haben (vgl. Abb. 7).

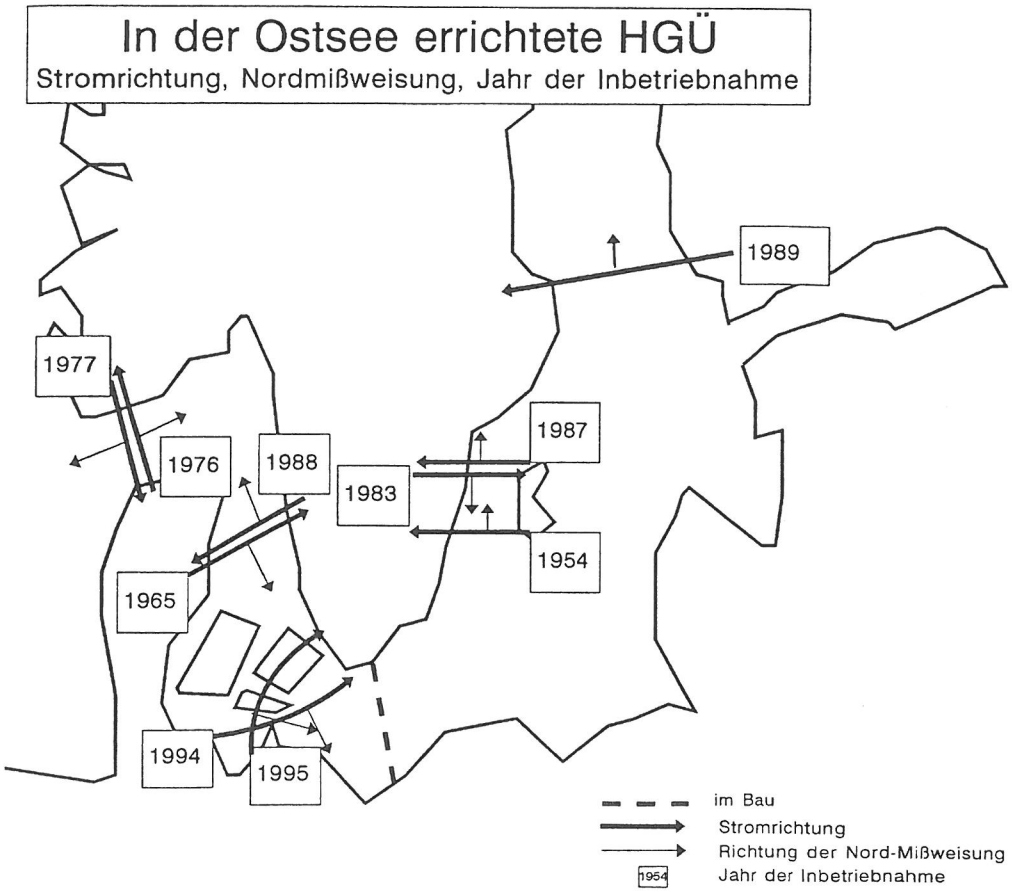

Abb. 7: In der Ostsee errichtete Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungskabel

3 Schlußfolgerungen

Bei den theoretisch berechenbaren Stromdichten und Feldstärken in 10 cm Entfernung von der See-Elektrode (Durchmesser: 1000 m, Material: Kupfer) und entsprechend geringeren Werten in größerer Entfernung (siehe Tab. 1) sind Schreck- oder Lock-Wirkungen auf die Organismen nur im unmittelbaren Nahbereich um die Elektrode zu erwarten.

Aquatische Organismen nehmen schwache elektrische Felder wahr. Unbekannt sind die Auswirkungen der über das gesamte Aquatorium zwischen den Elektroden durch Fische spürbaren schwachen E-Felder.

Untersuchungen über mögliche Schädigung durch subletale Dauerbelastung liegen nicht vor.

Die Fähigkeit mariner Organismen, Magnetfelder zu spüren, ist nachweisbar. Ob diese Fähigkeit zur Orientierung in der Umwelt benutzt wird, blieb trotz durchgeführter Feldexperimente bisher unklar.

Falls dies aber - insbesondere bei Wander- und Schwarmfischen (Aal, Lachs, Hering)- der Fall sein sollte, muß mit einer nachteiligen Beeinflussung durch die Stromübertragung gerechnet werden.

Der Elektrodenring muß, da er dem Sediment aufliegt, als Unterwasserhindernis betrachtet werden. Ein mechanischer Kontakt mit Ankereinrichtungen wäre denkbar.

4 Forschungsbedarf

- Subletale Effekte von Dauerbelastungen durch schwache elektrische Felder auf Evertebraten sind unserer Kenntnis nach allerdings kaum bekannt und müßten in Langzeit-Laborexperimenten bzw. im Freiland an der Elektrode selbst gezielt untersucht werden (schriftl. Mitt. [POWILEIT]).

- Um über mögliche Magnetfeldwirkung von

Einleiterkabeln auf aquatische Migranten (Aal, Lachs Meerforelle, Plattfische, Säuger) relevante Aussagen treffen zu können, bedarf es weiterführender Feldforschung (insbesondere Markierung), vor allem aber auch Grundlagenforschung zu Mechanismen der Magnetfeldwirkung.

Folgende Organismen sollten besonders berücksichtigt werden:

- sessile und vagile Evertebrate: Mollusken, Würmer, Krebse in Elektroden- und Kabelnähe
- migrierende und schwarmbildende Fische: Aal, Hering, Lachs, Meerforelle, Stör, Plattfische
- nicht kommerziell aber ökologisch wichtige Massenarten: Stichling, Jungfische
- Säuger: Schweinswal, Robbe

Folgender Methodeneinsatz wird vorgeschlagen:

1) Literaturrecherche zu Angaben der Fangstatistik von paneuropäischen Fanggebieten zum Glasaalaufkommen und Aalfang. Bisher deutet sich die Abnahme der Glasaalfänge als kein ostseespezifisches Problem. Es tritt europaweit auf.
2) Konsultation in- und ausländischer Forschungseinrichtungen zur Fragestellung der Wirkung von schwachen Elektrofeldern und Magnetfeldern auf Evertebrata, Fische und Säuger.
3) Laboruntersuchungen

- Verhaltensstudien in lenkbaren Magnetfeldern (Helmholtzspulen) an kleinen Evertebraten und Kleinfischen.
- Lang- und Kurzzeitstudien zu subletalen Effekten von schwachen elektrischen Felder auf Wirbellose, Fischembryonen und Larven.
- Untersuchung der Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes auf das Orientierungsverhalten des Aales.

4) Freilanduntersuchungen

- markierungsfreies Verhalten bei Kabel- und Elektroden-Annäherung oder -Querung mittels UW-Beobachtung (UW-Videographie, Forschungstaucherei) und Versuchsfischerei.
- Laichplatz- und Nahrungsmigrationen mittels Markierung (Farbe, Plättchen, Transponder, Sender), Fang-Wiederfangaktionen (Stellnetz in offener Ostsee, auf Laichplätzen).
- Lang- und Kurzzeitstudien zu subletalen Effekten von schwachen elektrischen Feldern auf Wirbellose, Fischembryonen und Larven (Feldbeprobungen)
- UW-Datenmessung als Begleitung zur Grundforschung.

Literatur

ABALMAZOVA, M. G., 1985: Reakcija donnych i pelagiceskich ryb na elektriceskie i magnitnye polja b morskoj vode (rus.). Povedenie promyslovych ryb, cb. tr. VNIRO, Moskva: 112-122.

ANONYMOUS, 1996: Seelands Stromverbindung zum Kontinent. Broschüre der SEAS Informationsabteilung.

BASOV, B. M., 1974: Elektriceskie polja ryb v ich ekologii [Elektrische Felder in der Fischökologie]. Osnovnye osobennosti povedenija i orientatsii ryb [Grundlegnede Besonderheiten des Verhaltens und der Orientierung von Fischen], AN SSSR, Inst. evoljutsionnoj morfologii i ekologii zhivotnych im. A. N. Severtsova, 104-122.

BASOV, B. M., 1985: Elektriceskie polja presnovodnych neelektriceskich ryb [Elektrische Felder nichtelektrischer Süßwasserfische]. Moskva, Nauka, 72pp.

BRANOVER G. G., WASILEV, A. S., GLEJZER, S., CINOBER, A. B. 1971: Issledovanija povedenija ugrja v estestvennych i iskusstvennych magnitnych poljach a analiz mechanizma ego reakcij (rus.). *Vopr. ichtiologii,* t. II, vyp. 4, 720-727.

BOBZIN, W. und D. FINNERN 1978: Fangtechnik. Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 759 pp. (zit. in Protasov et al., 1982).

CHOLODOV, JU., A., 1958: Ob obrazovanie uslovnych refleksov na magnitnoe pole u ryb. Tr. sovesc. po fiziologii ryb. M. izd-vo AN SSSR, S. 82 (.zit in PROTASOV et al., 1982)

DIJKGRAAF, S. und A. J. KALMIJN, 1966: Versuche zur biologischen Bedeutung der Lorenzinischen Ampullen bei den Elasmobranchiern. *Zeitschr. vergl. Physiol.*, **53**, S. 187-194.

DUNCKER, G., 1960: Die Fische der Nordmark. Hamburg: Kommissionsverlag Cram, de Gruyter, 432 S.

FISCHEREIAMT ROSTOCK, 1955-1993: Statistik des Fischereiamtes Rostock, 1955-1993 (unveröff.).

FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT FÜR HOCHSPANNUNGS- UND HOCHSTROMTECHNIK E.V. (FGH), 1994: Stellungnahme zur gegenseitigen Beeinflussung der Gleichspannungsübertragung "Baltic Cable" und "KONTEK", 1-10.

GLEISER, S. T. AND V. A. KHORDORKOVSKIJ, 1971: Experimental determination of geomagnetic reception in Anguilla anguilla (russ.), Dokl. AN SSSR 201, 964-967, (zit. in Tesch,1979).

GROOT, S. J. DE, AND M. J. HEESEN, 1992: An overview of the status of the Atlantic salmon in Europe. Unpubl. ICES-paper.

HANSON, M., L. KARLSSON AND H. WESTERBERG, 1984: Magnetic material in European eel (*Anguilla anguilla L.*). *Comp. Biochem. Physiol.*, **77A**, No. 2, 221-224.

HÖGLUND, H., 1949: Elströmsförsöken vid Västervik. schwed. (Die Versuche mit elektrischem Strom bei Västervik) Skrivelse till fiskeristyrelsen den 13.08.1949 (Schreiben vom 13.08.1949 an das Zentralamt für Fischerei). In: *Meddelande fra°n Havsfiskelaboratoriet*

(Mitteilungen des Hochseefischereilaboratoriums) Nr. **105**, 3/1971.

KALMIJN, A. J., 1977: The electric and magnetic sense of sharks, skates, and rays. *Oceanus,* pp. 45-52.

KALMIJN, A. J., 1982: Electric an magnetic field detection in elasmobranch fishes. *Science*, **218**, pp. 916-918.

KARLSSON, L., 1984: Migration of European silver eels, Anguilla anguilla. Acta Universitas Upsalensis (Diss.) 745 Repro-C. HSC 1984.

KOSZY, F., 1949: Hydrografiska undersökninger vid elströmsförsöken vid Västervik. (Hydrographische Untersuchungen bei den Versuchen mit elektrischem Strom bei Västervik - Übers. dtsch.) Skrivelse till fiskeristyrelsen den 23.08.1949 (Schreiben vom 23.08.1949 an das Zentralamt für Fischerei). In: *Meddelande fr. Havsfiskelaboratoriet* (Mitteilungen des Hochseefischereilaboratoriums) **105**, 3, 1971.

LAMARQUE, P., 1967: Electrophysiology of fish subject to the action of an electric field. *Fishing with electricity.* 65-92.

MÄÄR, A., 1947: Über die Aalwanderung im Baltischen Meer und auf Grund der Wanderaalemarkierungsversuche im Finnischen in Livischen Meerbusen in den Jahren 1937-1939. Medd. Statens Unders. Försökanstalt. Sötvattenfisk, Drottningholm 27, 1-56 (zit. in Westin, 1990).

MARTINKÖWITZ, H., 1960: Erste Ergebnisse von Blankaalmarkierungen an der ostrügenschen Küste im Herbst 1959. *Fischereiforschung* **3**, 9-13 (zit. in Karlsson, 1984).

MARTINKÖWITZ, H., 1961: Ergebnisse von Blankaalmarkierungen an der ostrügenschen Küste und Möglichkeiten ihrer Nutzung für die Fangsteigerung durch neuartige Reusenkonstruktionen. *Z.. Fisch.* **10**, 653-663 (zit. in Karlsson, 1984).

MC CLEAVE , J. D., ROMMEL, S. A., GATHEART, C. L., 1971: Weak magnetic and electric fields in fish orientation. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **188**, 270-282.

MEYER-WAARDEN, P. F. AND E. HALSBAND, 1975: Einführung in die Elektrofischerei. 2. Auflage. Neubearbeitet von E. Halsband und I. Halsband. Berlin: Heenemann, 265 S.

MIRONOV, A. T., 1948: Elektriceskie toki v more i dejstvie toka na rybu. Tr. Mosk. gidrofizices. In-ta AN SSSR, t. 1., (zit. in Protasov et al. 1[972]).

PAVLOV, D. S., 1989: Structures assisting the migration of non-salmonid fish: USSR. FAO Fishries Technical Paper 308, 97pp.

PROTASOV, V. R., A. I. BONDARCUK, V. M. OL'SHANSKIJ, 1982: Vvedenie v elektroekologiju, Nauka, Moskva, 336 S.

ROMMEL, S. A., MCCLEAVE, J. D. 1972: Oceanic electric fields: perception by American eels?. *Science*, **176**.

SCHÖNFELDER, A., 1925: Fischfang mit Elektrizität. *Der Sportangler* 1, 236-237.Zit. in W. DENZER, 1956: Die Elektrofischerei. In: Handbuch der Binnenfischerei Mitteleuropas Ergänzungsband zu Band V, S. 143.

STENGEL, H., A. L. FRIEDMANN, 1977: Fischfanggeräte. Theorie und Entwerfen von Fanggeräten der Hochseefischerei, Berlin: VEB Verlag Technik, 332 S.

STERNIN, V. G., I. V. NIKONOROV, J. K. BURMEJSTER, 1972: Elektrolov ryby, Piscevaja promyshlennost, Moskva, 360 S.

TESCH, F.-W., 1974a: 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., 1974b: Influence of geomagnetism and salinity on directional choice of eels. *Helgoländer Wiss. Meeresuntersuchungen*, **26**, 382-395.

TESCH, F.-W., 1979: Migratory performance and environmental evidence of orientation. *Environmental physiology of fish, 355, 589-612.*.

TESCH, F.-W. and A. LELEK, 1973: Directional behavior of transplanted stationary an migratory forms of eel, *Anguilla anguilla*, in a circular tank. *Netherlands Journal of Sea Research,* **7,** 46-52 (zit. in Tesch et al., 1992).

TESCH, F.-W., T. WENDT, 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. AND G. SCHNEIDER, 1908. Die Markierungsversuche mit Aalen und die Wanderung gekennzeichneter Aale in der Ostsee. *Rapp. P.-v. Réun. Cons perm. int. Explor. Mer,* **174**, 134-143 (zit. in Westin, 1990).

UHLIG, H.-R. UND R. SCHULZ, 1993: Ablenkung des Magnetkompasses durch zur Energieübertragung bestimmte HGÜ-Kabel (Hochspannungs- Gleichstromübertragung). *Dt. hydrogr. Z.*, **45**, 5, 337-358.

VASILYEV, A. S., GLEISER, S. I., SOKOVISHIN, V. A., SOKOVISHINA, L. M. KHODORKOVSKY, V. A., 1973: Magnetoreceptor reactions of hyaloid eel. *Biofizika,* **18**, 132-137 (zit. in Tesch et al. 1992).

WENDT, T., 1990: Untersuchungen zur Magnetfeldorientierung des europäischen Aales. Diplomarbeit Universität Hamburg, Fachbereich Biologie. 59 S. (zit. in Tesch et al., 1992).

WINKLER, H., 1991: Changes of structure and stock in exploited fishcommunities in estuaries of the Southern Baltic coast (Mecklenburg- Vorpommern, Germany). *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, **76**, 3, 413-422.

Anschrift des Verfassers:

Lutz Debus
Universität Rostock
Fachbereich Biologie
Allgemeine und spezielle Zoologie
Universitätsplatz 5

D-18055 Rostock