

1	Einleitung .....	2
2	Methoden .....	3
2.1	Spulen.....	3
2.2	Magnetfeldberechnung .....	3
2.3	Stromversorgung .....	5
2.4	Messung Magnetfeld .....	5
2.5	Magnetfeldstärke .....	5
2.6	Langzeitversuche.....	6
2.7	Kurzzeitversuche .....	7
2.8	Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs von <i>Crangon crangon</i> und <i>Palaemon squilla</i> .....	9
2.8.1	Messsystem.....	9
2.8.2	Berechnung des Sauerstoffverbrauchs.....	10
2.9	Bestimmung von Gonaden-Index (GI) und Fitness (CI) von <i>Mytilus edulis</i> .....	10
2.10	Videobeobachtungen.....	11
2.11	Sammlung der Versuchstiere.....	12
2.12	Statistische Analyse.....	13
3	Ergebnisse .....	13
3.1	Langzeitversuche.....	13
3.1.1	Gleichstrom.....	13
3.1.2	Wechselstrom .....	17
3.2	Gonaden-Index (GI) und Fitness (CI) von <i>Mytilus edulis</i> .....	17
3.3	Kurzzeitversuche .....	19
3.3.1	Gleichstrom.....	19
3.3.1.1	Fische .....	19
3.3.1.2	<i>Polychaeta</i> .....	21
3.3.1.3	<i>Echinodermata</i> .....	21
3.3.1.4	<i>Crustacea</i> .....	22
3.3.2	Wechselstrom .....	27
3.4	Sauerstoffverbrauch von <i>C. crangon</i> und <i>P. squilla</i> .....	27
3.5	Videobeobachtungen .....	29
4	Diskussion .....	32
5	Zusammenfassung .....	37
6	Literatur.....	39

## **Endbericht**

### **Ökologische Begleitforschung zur Windenergienutzung im Offshore-Bereich auf Forschungsplattformen in der Nord- und Ostsee- Arbeitspunkt 3: Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf marine Organismen**

(Förderkennzeichen: 327526)

Dr. Ralf Bochert, Institut f. Ostseeforschung Warnemünde, Biologische Meereskunde, Seestr. 15, 18119 Rostock

## **1 Einleitung**

In den Gewässergebieten von Nord- und Ostsee liegen zahlreiche Stromkabel, die bei Betrieb künstliche Felder in der Umgebung erzeugen können. Neben den durch geeignete Isolation abschirmbaren elektrischen Feldern, sind es hauptsächlich magnetische Felder, die auf in der Umgebung befindliche Organismen einwirken können. Magnetische Felder mit Flussdichten größer den natürlichen Werten des Erdmagnetfeldes von ca. 50  $\mu\text{T}$  treten je nach Betriebs-, Bauart und Stromstärke der Kabel mit unterschiedlicher Reichweite auf. Bereits existierende einfache Gleichstrom-Leiter bilden z.B. bei einem Stromfluss von 1.600 A in unmittelbarer Kabelnähe Magnetfelder mit Flussdichten von 3.200  $\mu\text{T}$  aus. In einem Abstand von 1 m beträgt die Flussdichte 320  $\mu\text{T}$  und erst nach 6 m werden 50  $\mu\text{T}$  erreicht. Neuere Kabelbauweisen, bei denen ein Hin- und ein Rückleiter nebeneinander geführt werden, reduzieren das magnetische Feld am Kabelmantel bei gleichem Stromfluss auf 2.800  $\mu\text{T}$  und bereits nach 0,5 m werden natürliche Werte erreicht.

## 2 Methoden

### 2.1 Spulen

Zur Erzeugung von Magnetfeldern mittels Gleichstrom und von elektromagnetischen Feldern mittels Wechselstrom wurden Flachspulen verwendet. Jede Spule bestand aus 124 Windungen aus Kupferlackdraht ( $d= 1,5$  mm) und einem Ohmschen Widerstand von 1,2 Ohm. Der äußere Spulendurchmesser betrug  $d= 30,7$  cm und der innere  $d= 28,3$  cm (mittlerer Spulenradius  $r= 14,75$  cm). Mehrere Einzelspulen konnten parallel zueinander angeordnet werden und wahlweise hintereinander geschaltet werden (Abb. 2). Bei Verwendung von zwei parallel zueinander angeordneten Flachspulen in einem mittleren Abstand von  $a= 15$  cm (Spulenradius), wird mit der so dargestellten Helmholtz-Spulenordnung ein weitgehendes homogenes Magnetfeld erzeugt.

### 2.2 Magnetfeldberechnung

Das bei einem Feldstrom  $I$  auf der Mittelachse einer Einzelspule erzeugte Magnetfeld lässt sich nach der Gleichung

$$B = \frac{\mu_0}{2} NI \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1,5}}$$

berechnen.

Darin bedeuten:

- B= magnetische Flussdichte (Tesla)
- I= Spulenstrom (Ampere)
- N= 124 = Windungszahl einer Spule
- r= 0,1475 m = mittlerer Spulenradius
- x= Abstand vom Spulenzentrum auf der Spulenachse (m)
- $\mu_0= 4\pi \cdot 10^{-7}$  (V s)/(A m) = Vakuumpermeabilität

Das bei einem Feldstrom  $I$  im Zentrumspunkt des Flachspulensatzes auftretende Feld lässt sich bei Hintereinanderschaltung in Helmholtz-Anordnung nach der Gleichung

$$B = \mu_0 NI \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1,5}}$$

berechnen.

Darin bedeutet:  $x = \frac{a}{2} = 0,075 \text{ m} = \text{Mittelpunkt zwischen beiden}$

Spulen ( $a = \text{Spulenabstand von } 0,15 \text{ m}$ )

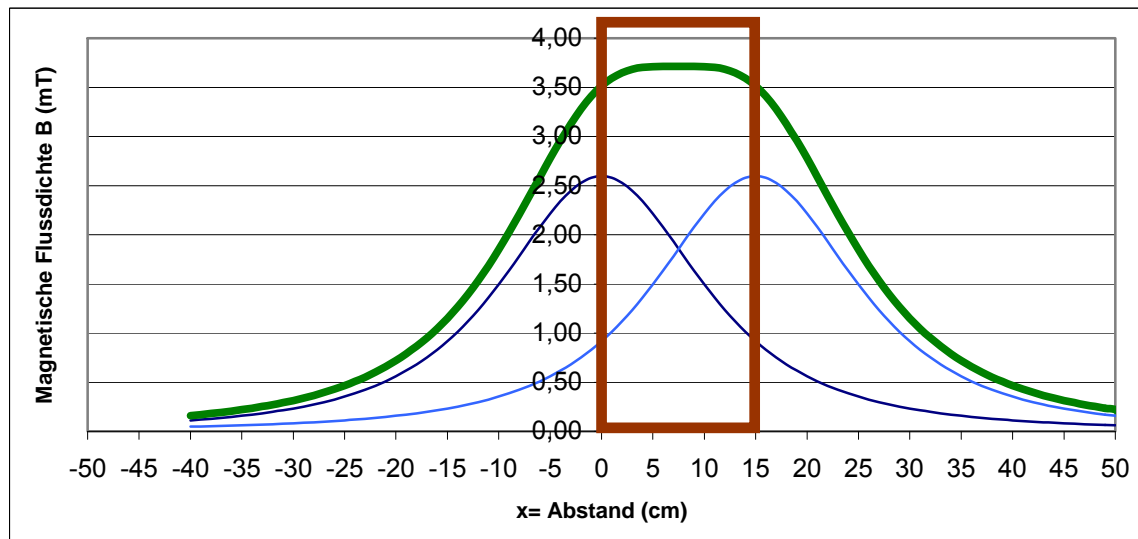


Abb. 1: Magnetfeld eines Spulenpaares in Helmholtz-Anordnung auf der Mittelachse (grün) sowie Magnetfelder der beiden Einzelspulen (blau). Braun: Bereich zwischen beiden Spulen mit homogenem Magnetfeld

Bei Hintereinanderschaltung mehrerer parallel zueinander angeordneter Spulen (2-4) ergibt sich das Gesamtmagnetfeld auf der Mittelachse durch Addition der Einzelfelder jeder Spule an diesem Punkt bestimmten Punkt  $x$  ( $x = \text{Abstand vom}$

Spulenzentrum jeder einzelnen Spule) (Abb. 1). Zwischen den Einzelspulen ergibt sich ein relativ homogenes Magnetfeld.

### 2.3 Stromversorgung

Zur Stromversorgung wurden zwei verschiedene Geräte verwendet. Mit einem hochpräzises, gleichspannungsgeregelten Labornetzgerät DF 3010 10A konnte die Stromstärke stufenlos zwischen 0 – 10 A eingestellt werden und am Ausgang Gleichstrom erzeugt werden.

Mit einem Regel-Trenntransformator RTTG 80 (Firma Schmidbauer, Hebertsfelden) wurde bei einer Betriebsfrequenz von  $f = 50$  Hz über eine stufenlose Spannungsregelung ein Ausgangsstrom von maximal 3,2 A erzeugt.

### 2.4 Messung Magnetfeld

Die Messung der magnetischen Flussdichte ( $B$ ) erfolgte mit einem Magnetometer Koshava 4 (Wuntronic GmbH, Germany).

### 2.5 Magnetfeldstärke

Mit den Spulen und den Stromversorgungsgeräten wurden bedingt durch die Spulenwiderstände, die technische Leistungsfähigkeit und den rechtlichen Bestimmungen (BGFE, 2001) folgende maximale magnetische Flussdichten erzeugt (Tab. 1):

Tab. 1: Maximale magnetische Flussdichten in Laborversuchen bei unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

Strom	Spulensystem	maximale magnetische Flussdichte $B$ (mT)
Gleichstrom	Helmholtz-Spulenpaar	3,7
Gleichstrom	Spulenpaar in paralleler	2,8

	Anordnung im Abstand von 22 cm zueinander	
Wechselstrom	Helmholtz-Spulenpaar	1,0
Wechselstrom	Spulenpaar in paralleler Anordnung im Abstand von 22 cm zueinander	1,0

## 2.6 Langzeitversuche

Alle Versuche wurden in einem klimatisierten Raum bei einer mittleren Temperatur von 10 °C und einem Lichtrhythmus von 14 h Hell : 10 h Dunkel durchgeführt. Für Langzeitexpositionsversuche kamen Plastik-Aquarien mit den Grundflächenmaßen 10,5 x 17,5 cm und einem Nettoinhalt von 2,3 l zum Einsatz. Die Versuchstiere wurden in den Aquarien in das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen positioniert. Die Expositionszeit betrug zwischen 4 und 12 Wochen. Kontrollgruppen befanden sich in den gleichen Aquarien aber ohne jegliche Spulenordnungen. Die magnetische Flussdichte betrug 3,7 mT bei Gleichstrom und 1,0 mT bei Wechselstrom.

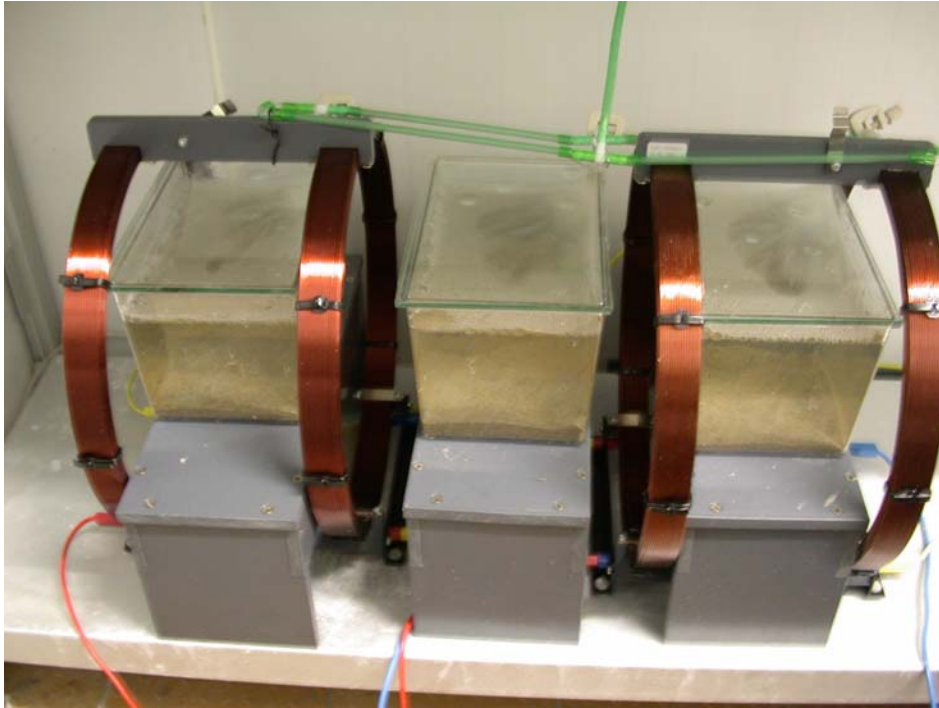


Abb. 2. Versuchsaufbau für den Langzeitversuch

## 2.7 Kurzzeitversuche

Die unmittelbare Reaktion auf eine Exposition im magnetischen Gleich- und Wechselfeld wurde im Kurzzeitversuch ermittelt. Dazu wurden Aquarien von 20 x 100 x 26 bzw. 18,8 x 66,6 x 26,0 cm Größe benutzt, die längs durch Trennschieber in 3 bzw. 2 gleiche Abschnitte geteilt werden konnten. Das Magnetfeld beeinflusste im Wesentlichen nur eine Sektion des Versuchsbeckens (Abb. 3).

Zur Anwendung kamen Spulenpaare in paralleler Anordnung im Abstand von 22 cm zueinander. Die magnetische Flussdichte betrug maximal 2,8 mT bei Gleichstrom und 1,0 mT bei Wechselstrom.

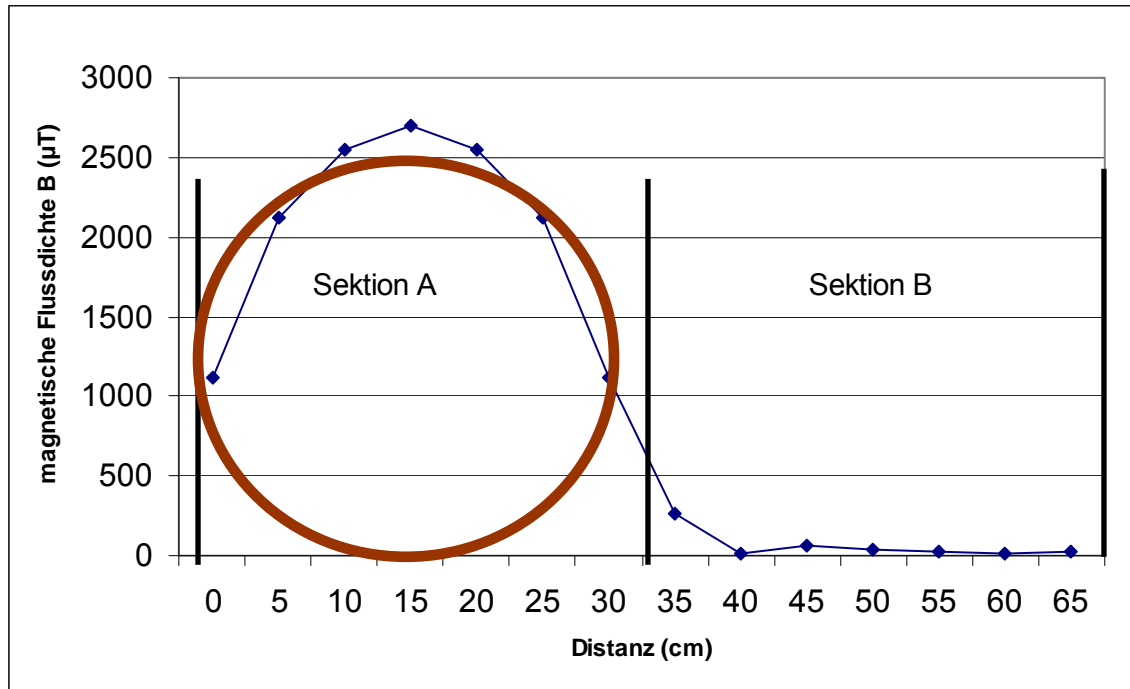


Abb. 3: Horizontales Magnetfeld entlang der mittleren Spulenhöhe (blau) eines Spulenpaares (braun) in paralleler Anordnung im Abstand von 22 cm zueinander bei einer Stromstärke von  $I = 5 \text{ A}$  in unterschiedlichen Bereichen der Versuchsaquarien.

Zu Versuchsbeginn wurden die Tiere gleichmäßig im Aquarium verteilt, die Trennschieber nach einer kurzen Eingewöhnungsphase entfernt und das Magnetfeld aktiviert. Bei Versuchsende nach 22 h wurden die Bereiche erneut abgetrennt, die Anzahl von Versuchstieren in den einzelnen Sektoren ermittelt und mit einem Kontrollansatz ohne jeglichen Spulenaufbau verglichen.

Kurzzeituntersuchungen im frequenten Magnetfeld wurden mit *C. crangon* durchgeführt. Die Versuchsanordnung unterschied sich in sofern von den Versuchen mit statischer Magnetfeldexposition, dass jeweils nur Einzeltiere untersucht wurden und Kontroll- sowie Versuchsansatz jeweils in denselben Becken nacheinander durchgeführt wurden. Die beiden verwendeten Aquarien waren in geografischer Nord-Süd Richtung positioniert, wobei sich die Spulen einmal in der nordwärts und einmal in der südwärts gerichteten Sektion



befanden. Jede Sektion wurde annähernd gleichhäufig als Startpunkt gewählt. Bei den insgesamt 15 Kontrollversuchen erfolgten je 4 – 6 Starts pro Sektion und in den Versuchsansätzen waren es 6 – 8 Starts aus jeder Sektion.

## **2.8 Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs von *Crangon crangon* und *Palaemon squilla***

Die Respirationsraten wurden pro Tier in mehreren Einzelversuchen über jeweils drei Stunden an einem Individuum bestimmt. Die Respirationsrate bei einer konstanten Wassertemperatur von 20°C ohne Feld-Einfluss (Kontrolle), unter Einfluss eines statischen magnetischen Feldes (DC) und eines Wechselstromfeldes (AC) in filtriertem Seewasser (Salinität: 10 PSU; Porengröße des Filters: 0,45 µm) bestimmt. Vor Versuchsbeginn wurde das zu untersuchende Individuum jeweils mindestens 20 Stunden in sauerstoffgesättigtem Meerwasser (10 PSU) bei Raumtemperatur (18-24°C) akklimatisiert. Vor jedem Versuchsdurchlauf wurde die Abnahme der Sauerstoffkonzentration im Versuchsgefäß (Basislinie) bestimmt.

### **2.8.1 Messsystem**

Die Messungen wurden in einem Durchflusssystem, bestehend aus einem 50 ml Erlenmeyerkolben und einer Messkammer mit dreipoliger Membranelektrode (Sauerstoffsensoren TriOxmatic<sup>®</sup> 201, WTW) durchgeführt. Die Messsonde wurde in wasserstoffgesättigter Luft kalibriert. Von einem Mehrkanalmessgerät (InterlogOXI, 8-Kanal-Messdatenerfassungssystem, WTW) wurden die Messdaten an einen PC ausgegeben und mit einer am Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) entwickelten Software (Oximess 2, Rüss) in Intervallen von einer Minute erfasst. Um eine gleichmäßige Anströmung des Sensors zu gewährleisten, wurde das Wasser mit Hilfe einer Peristaltikpumpe (<sup>®</sup>ECOS ISMATEC) mit einer Geschwindigkeit von 50 ml/min kontinuierlich durch

das System (Gesamtvolumen 105 ml) gepumpt. Zur Regulierung der Temperatur diente ein gekühltes Wasserbad.

### 2.8.2 Berechnung des Sauerstoffverbrauchs

Die Sauerstoffabnahmerate lässt sich aus der in der Messkammer gemessenen Sauerstoffkonzentration nach folgender Gleichung berechnen:

$$O = ( C(t_0) - C(t_1) ) * V_r * n^{-1} * (t_1 - t_0)^{-1} * 60 * 1/1000$$

wobei

- O [ $\mu\text{mol/h}$ ] ... Sauerstoffabnahmerate
- C(t<sub>0</sub>) [mg/l] ... Sauerstoffanfangskonzentration zu Beginn
- C(t<sub>1</sub>) [mg/l] ... Sauerstoffkonzentration nach Zeit t
- t [min] ... verstrichene Zeit seit Versuchsbeginn
- V<sub>r</sub> ... Wasservolumen im System
- M ... molare Masse des Gases (M<sub>Sauerstoff</sub> = 16 g/mol)

Die Respirationsrate R der Garnele kann ermittelt werden, indem die Basislinie – also der Sauerstoffverbrauch O<sub>Basis</sub> im System - von der gemessenen Sauerstoffabnahme subtrahiert wird:

$$R [\mu\text{mol/h}] = O - O_{\text{Basis}}$$

### 2.9 Bestimmung von Gonaden-Index (GI) und Fitness (CI) von *Mytilus edulis*

Zur Bestimmung eines Gonaden-Index und eines Fitness-Index wurden Miesmuscheln über einen Zeitraum von 3 Monaten gehältert und einem statischen Magnetfeld von 3,7 mT ausgesetzt. Anteil. Bei dieser Methode nach Bayne & Thompson (1970) wird für die Fitness das Gewicht des Weichkörpers dem Totalgewicht prozentual ins Verhältnis gesetzt. Dazu wurden jeweils sechs Tiere aus den Versuchsbecken und den Kontrollansätzen entnommen und

geöffnet. Bei einer Temperatur von 50 °C wurden die Tiere für 10 min getrocknet. Anschließend erfolgte die Wägung des Gesamtgewichtes und nach Entfernung der Schale die erneute Gewichtsbestimmung für den Weichkörper.

Für den Gonaden-Index wurden jeweils zehn Tiere aus den Versuchsbecken und den Kontrollansätzen entnommen. Nach Öffnung der Muschel wurde ein Stück Mantelgewebe abpräpariert, auf einen mit einem Wassertropfen versehenen Objektträger überführt und die Gameten mit einem Mikroskop betrachtet. Die Einteilung der Gametenstadien erfolgte von 0- unreif bis 3- laichreif. Zur Berechnung des GI wurden jeweils 20 Tiere präpariert. Der GI errechnet sich aus der Gesamtsumme der Produkte von Anzahl der Tiere und Indexwertes (0-3) geteilt durch Gesamtanzahl der untersuchten Tiere (20). Der GI liegt zwischen 0 (abgelaicht, keine Gameten) und 3 (laichreif).

## **2.10 Videobeobachtungen**

Für Videobeobachtungen wurde ein separates Versuchssystem geschaffen. Als Versuchsbecken diente ein Glasaquarium mit den Maßen L x B x H von 186 x 20 x 110 mm. Die Rückwand wurde durch Markierungen in 12 identische Bereiche von 31 x 30 mm Fläche eingeteilt und Seewasser bis zu einer Höhe von 6 cm eingefüllt. Ein Magnetfeld wurde mittels einer Luftspule (Firma Conrad; Innenwiderstand 0,6  $\Omega$ ,  $\varnothing$  x H= 55 x 30 mm, Drahtstärke 1 mm, L=1,0 mH) erzeugt. Die Spule konnte wahlweise unter das Aquarium platziert werden und das bei einer Stromstärke von 2,5 A (DC) erzeugte Magnetfeld erreichte am Glasboden B= 1,8 mT, in 3 cm Höhe über dem Glasboden B= 0,4 mT und an der Wasseroberfläche in 6 cm Höhe B=0,2 mT.

Die Bildaufnahmen wurden mit einem JVC Digital-Camcorder GR-DV3000 angefertigt. Zusätzlich wurde am IOW ein Timer und ein Spezialgehäuse entwickelt. Die Aufnahmeeinstellungen ermöglichten eine Bildsequenz von 10 s alle 13 min. Während der Dunkelheit leuchteten 2 Strahler für die Aufnahmezeit das Blickfeld aus. Die Versuche dauerten 5 – 6 Tage. In das Versuchsbecken wurde jeweils nur ein Tier der Käferschnecke (*Lepidochitona cineria*), der

Nordseegarnele (*Crangon crangon*) oder dem Schlangensterne (*Ophiura albida*) eingesetzt. Die Kamera wurde ca. 30 cm vor dem Aquarium positioniert, so dass alle Sektoren im Videobild erkennbar waren. Durch Betrachtung der Videoaufnahmen wurde festgestellt, in welchen Sektoren sich die Versuchstiere zu den Aufnahmezeiten aufhielten, bzw. im Fall der Käferschnecke waren zusätzlich Bewegungsmuster erkennbar.

## 2.11 Sammlung der Versuchstiere

Die Laborversuche wurden mit nachfolgenden Tierarten durchgeführt (Tab. 2):

Tab. 2: Versuchsorganismen und Sammlungsort

Tierart	Sammlungsort
junge Flundern (1-3 cm lang, <i>Plathichthys flesus</i> )	Flachwasser des Salzhaffs bei Boiensdorf und am Schnatermann mit Schiebehämen
Sand- und Strandgrundel ( <i>Pomatoschistus microps</i> , <i>P. minutus</i> )	Flachwasser des Salzhaffs bei Boiensdorf und am Schnatermann mit Schiebehämen
Miesmuschel ( <i>Mytilus edulis</i> )	Hafenanlagen Warnemünde Alter Strom mit Pfahlkratzer
Nordseegarnele ( <i>Crangon crangon</i> )	Flachwasser des Salzhaffs bei Boiensdorf und am Schnatermann mit Schiebehämen
Ostseegarnele ( <i>Palaemon squilla</i> )	Flachwasser des Salzhaffs bei Boiensdorf mit Schiebehämen
Reliktassel ( <i>Saduria entomon</i> )	RV „A. v. Humboldt“ Adlergrund mit Dredge und Bodengreifer
Rundkrabbe ( <i>Rhithropanopeus harrisi</i> )	Hafenanlagen Gager, Handsammlung
Seestern ( <i>Asterias rubens</i> )	Küstengebiet vor Kühlungsborn am künstlichen Riff, Handsammlung aus Stellnetzen
Schlangensterne ( <i>Ophiura albida</i> )	RV „Prof. A. Penck“ Fehmarnbelt mit Dredge
Käferschnecke ( <i>Lepidochitona cineria</i> )	Materialversand Helgoland
Seeringelwurm ( <i>Nereis diversicolor</i> )	Flachwasser des Salzhaffs bei Boiensdorf mit Grabgabel
Kugelassel ( <i>Sphaeroma hookeri</i> )	Flachwasser am Schnatermann mit Schiebehämen

Die Tiersammlungen erfolgten zu unterschiedlichen Terminen in den Jahren 2002 und 2003. Die Hälterung erfolgte bis zum Beginn der Versuche bei 10°C. Die Tiere wurden mit Miesmuscheln, Fischstückchen, Algenkulturen oder Algenaufwuchs gefüttert.

## **2.12 Statistische Analyse**

Die statistische Auswertung der Daten der Kurzzeitversuche (3.3) erfolgte mit dem U-Test von Mann und Withney. Hierbei wurden die erhaltenen Einzelwerte (N) einer Sektion für alle Versuche (n) mit den Einzelwerten des Kontrollansatzes der versuchsgleichen Sektion verglichen. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $P < 0,05$  wurde als Signifikanzgrenze festgelegt.

Für Langzeitversuche (3.1), die Versuche zum Sauerstoffverbrauch (3.4) und die Ermittlung der Fitness der Miesmuschel (3.2) reichten die Versuchsanzahlen nicht für eine statistische Analyse aus. Es wurde in den Abbildungen die Standardabweichung ausgehend von der Grundgesamtheit (n) berechnet. Die Standardabweichung ist ein Maß dafür, wie weit die jeweiligen Werte um den Mittelwert (Durchschnitt) streuen.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Langzeitversuche**

#### **3.1.1 Gleichstrom**

Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den Versuchsorganismen und den Versuchsbedingungen bei den Langzeitversuchen. Die Ergebnisse erbrachten keine Unterschiede der Überlebensfähigkeit bei Magnetfeldexposition im Vergleich mit den Kontrolltieren (Abb. 4, 5). *S. entomon* und *Rhithropanopeus harrisi* zeigten in beiden Ansätzen eine hohe Überlebensfähigkeit und keine Unterschiede. *P. flesus* überlebten alle die einmonatige Versuchszeit. Für *S.*

*hookeri* und *C. crangon* wurde im Versuchsverlauf eine lineare Abnahme der Überlebenden nachgewiesen, allerdings zeigten sich auch in diesen Fällen keine Unterschiede zwischen den Versuchs- und Kontrolltieren. Ähnliche Ergebnisse erbrachten die Versuche mit *M. edulis*. Nach einer einmonatigen Versuchsdauer ohne hohe Sterblichkeit, stieg diese in der Folgezeit deutlich an, ohne dass jedoch ein Rückschluss auf die Magnetfeldexposition zu verzeichnen war.

Tab. 3: Versuchsorganismen und Testbedingungen für Langzeitstudien

Tierart	Anzahl Versuchsbecken	Anzahl Kontrollbecken	Versuchsdauer (d)
junge Flundern (1-3 cm lang, <i>Plathichthys flesus</i> )	3	1	28
Miesmuschel ( <i>Mytilus edulis</i> )	3	2	52
Nordseegarnele ( <i>Crangon crangon</i> )	3	2	49
Reliktassel ( <i>Saduria entomon</i> )	3	1	93
Rundkrabbe ( <i>Rhithropanopeus harrisi</i> )	3	1	57
Kugelassel ( <i>Sphaeroma hookeri</i> )	1	1	34

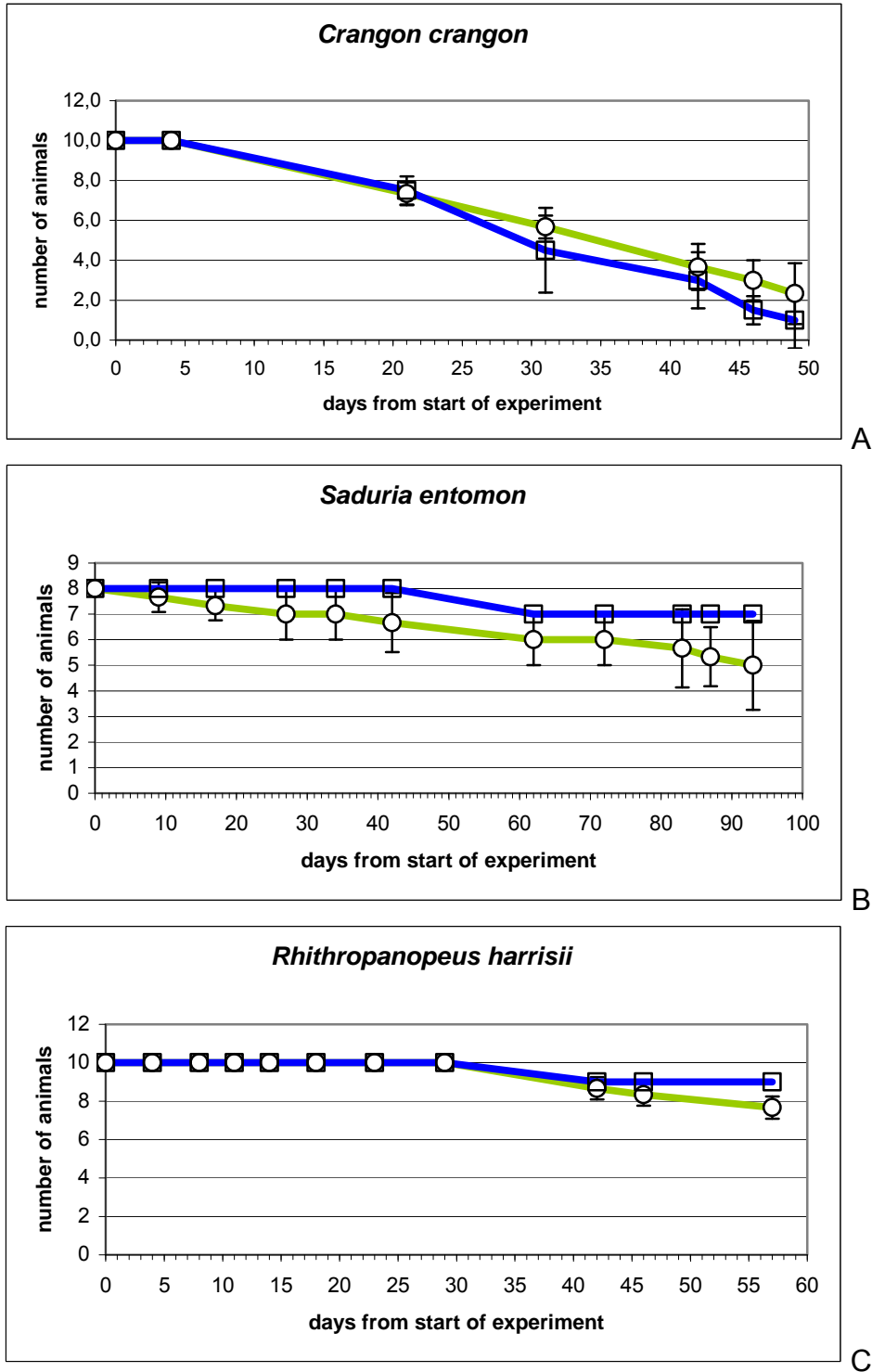
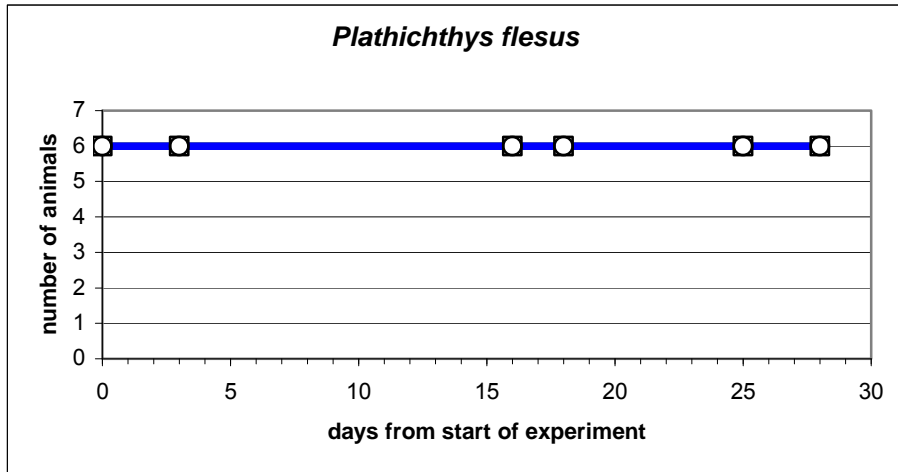
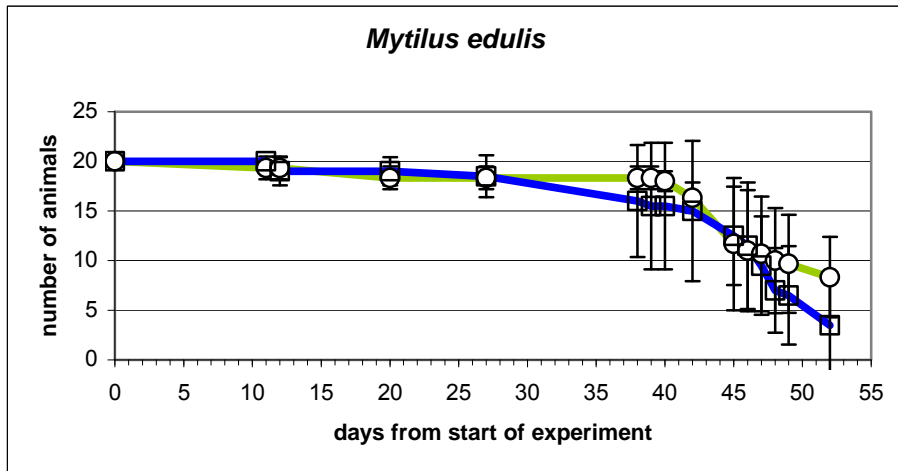


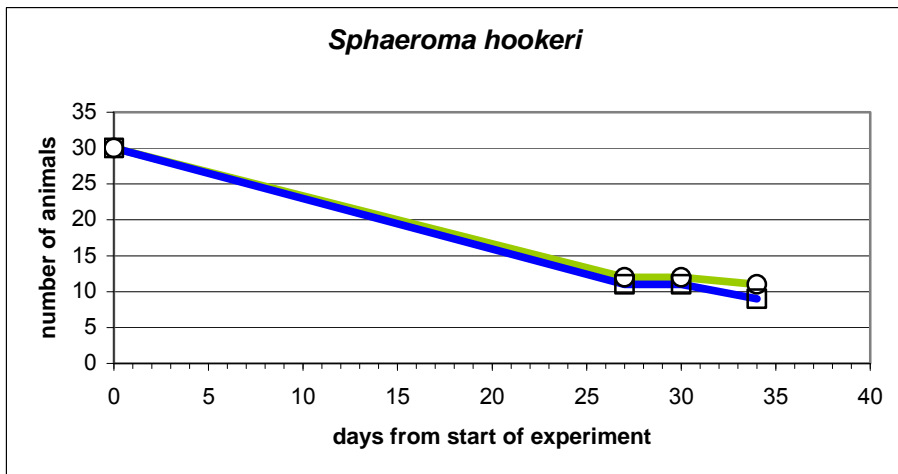
Abb. 4: Langzeitexposition verschiedener mariner Benthosorganismen (A-C) im statischen Magnetfeld von  $B = 3,7$  mT (grün) sowie Kontrollgruppe (blau)  $\pm$  Standardabweichung.



A



B



C

Abb. 5: Langzeitexposition verschiedener mariner Benthosorganismen (A-C) im statischen Magnetfeld von  $B = 3,7 \text{ mT}$  (grün) sowie Kontrollgruppe (blau)  $\pm$  Standardabweichung.



### 3.1.2 Wechselstrom

Langzeituntersuchungen im frequenten Magnetfeld wurden an *C. crangon* für die Dauer von drei Monaten durchgeführt. Die Überlebensrate zeigt ein ähnliches Muster wie unter statischen Magnetfeldbedingungen. Über die Versuchsdauer war eine zunehmende Abnahme der Überlebenden festzustellen. Zwischen dem 35. und dem 75. Versuchstag war eine erhöhte Sterblichkeit in der Kontrollgruppe zu erkennen. Allerdings glich sich die Entwicklung zum Versuchsende wieder an (Abb. 6).

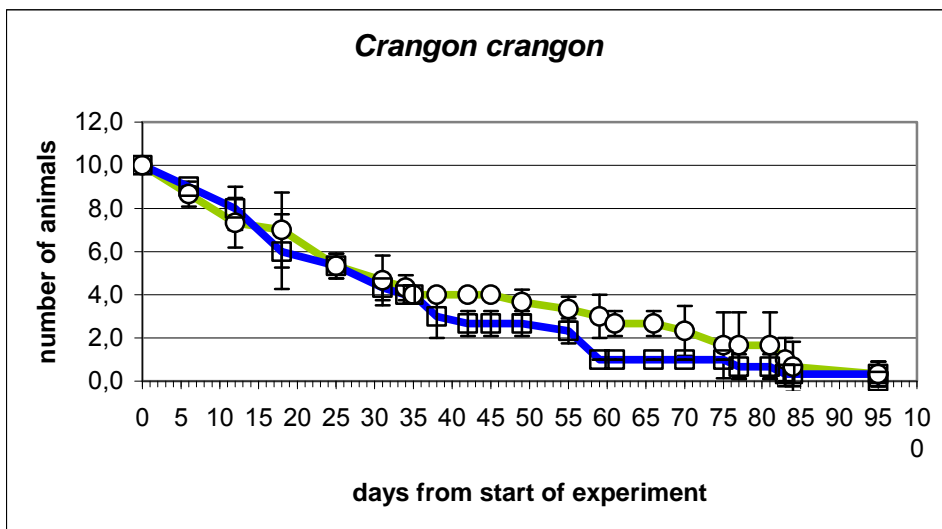


Abb. 6: Langzeitexposition der Nordseegarnele *Crangon crangon* im frequenten Magnetfeld von  $B= 1,0$  mT (grün) sowie Kontrollgruppe (blau)  $\pm$  Standardabweichung.

### 3.2 Gonaden-Index (GI) und Fitness (CI) von *Mytilus edulis*

Die Berechnung des Gonaden-Index für *Mytilus edulis* ergab keine Unterschiede zwischen dem Versuchsansatz mit einer Exposition im Magnetfeld von  $B= 3,7$  mT und den Kontrolltieren (Abb. 7). Zu Beginn der Untersuchungen ergab sich ein GI von 2,25. Nach einer Expositionszeit von 1 Monat konnte der GI auf einen Wert von 2,60 (Kontrolle 2,65) ansteigen und erreichte nach einem weiteren Monat den Höchstwert von  $GI= 2,71$  (Kontrolle  $GI= 2,85$ ). Zum Versuchsende Mitte Mai 2003 sank der GI in beiden Ansätzen auf einen Wert von 2,70.

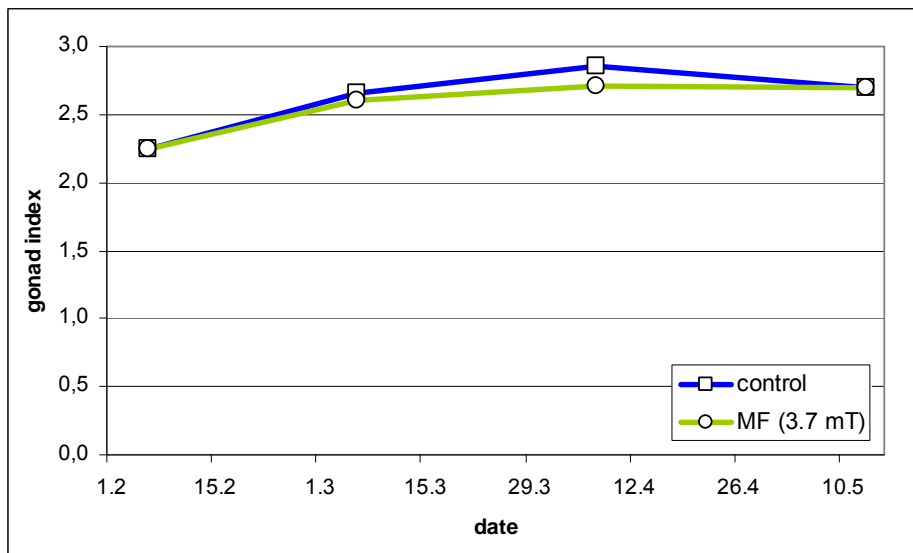


Abb. 7: Gonaden-Index (GI) von *Mytilus edulis* im Langzeitversuch im Jahre 2003 bei Exposition im statischen Magnetfeld von  $B= 3,7$  mT im Vergleich zu Kontrolltieren.

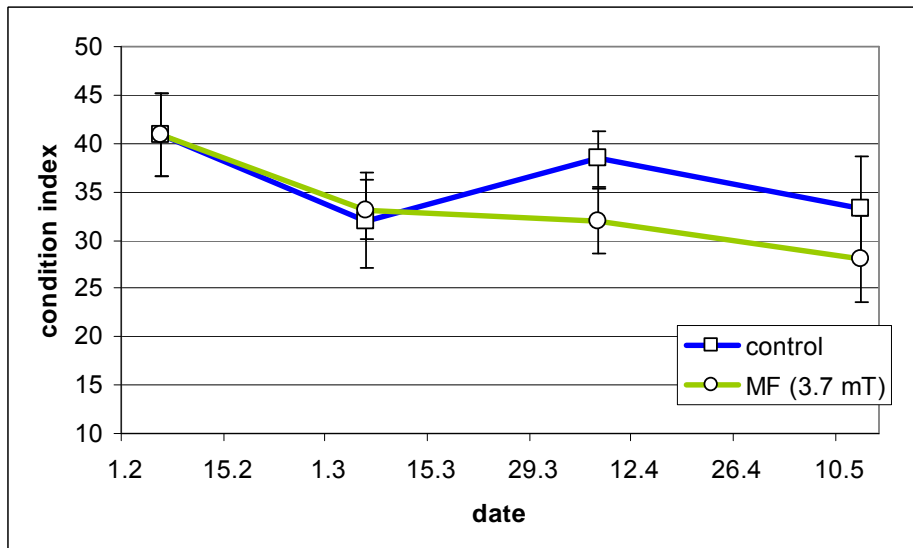


Abb. 8: Fitness (CI)  $\pm$  Standardabweichung von *Mytilus edulis* im Langzeitversuch im Jahre 2003 bei Exposition im statischen Magnetfeld von  $B= 3,7$  mT im Vergleich zu Kontrolltieren.

Für *Mytilus edulis* wurden in den gleichen Versuchsansätzen die Fitness (condition index: CI) bei Exposition im statischen Magnetfeld von 3,7 mT berechnet. Zu Beginn der Untersuchungen wurde ein Startwert von  $CI= 40,9$

berechnet. In beiden Ansätzen sank der CI nach einem Monat auf CI= 33,1 (Kontrolle CI= 32,0). In den folgenden Wochen Stieg der CI der Kontrolle wieder an auf CI= 38,4, wohingegen die Fitness der Versuchstiere bei einem CI= 31,9 annähernd unverändert blieb (Abb. 8). Zum Versuchsende verringerten sich beide Werte wieder und betragen für die Kontrolltiere CI= 28,0 und für den Versuchsansatz CI= 33,3.

### 3.3 Kurzzeitversuche

#### 3.3.1 Gleichstrom

##### 3.3.1.1 Fische

Kurzzeitversuche zum Einfluss eines Magnetfeldes auf Fische wurden an Strand- und Sandgrundeln (*Pomatoschistus spec.*) sowie an jungen Flundern von 1-3 cm Länge (*Plathichthys flesus*) durchgeführt. Grundeln zeigten bei einer Individuendichte von 123 Tieren/m<sup>2</sup> kein verändertes Verhalten im Magnetfeld von B=2,8 mT gegenüber den Kontrolltieren (Abb. 9).

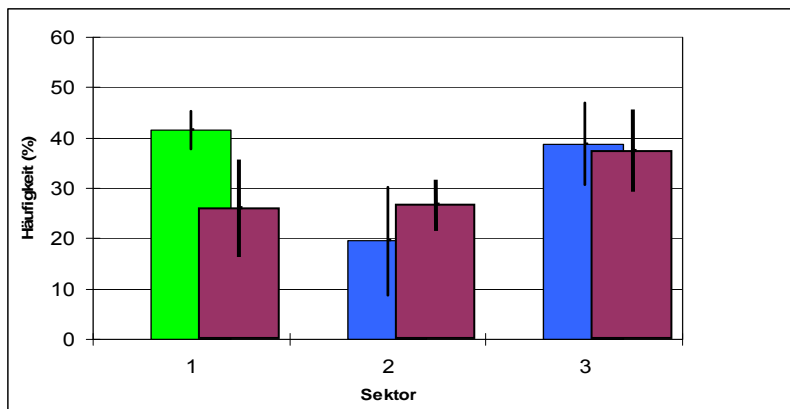


Abb. 9: Mittlere Häufigkeit von *Pomatoschistus spec.* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila) ± Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich. Individuendichte 123 Tiere/ m<sup>2</sup> (n=6).

Junge Flundern zeigten bei Individuendichten von 32, 53 und 110 Tieren/m<sup>2</sup> keine signifikante Reaktion bei Magnetfeldexposition gegenüber Tieren aus der Kontrollgruppe (Abb. 10).

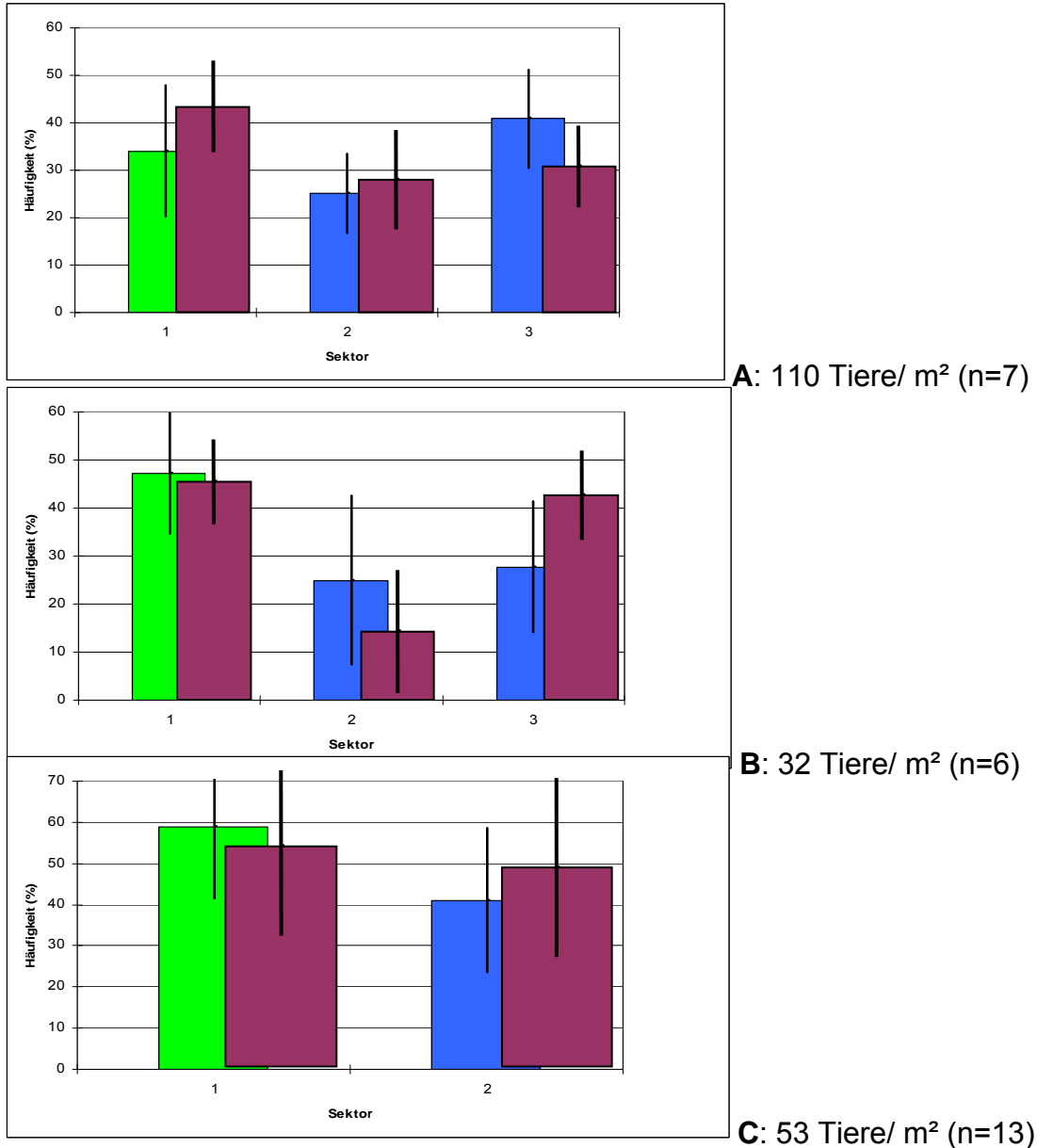


Abb. 10: Mittlere Häufigkeit von jungen Flundern von 1-3 cm Länge (*Plathichthys flesus*) im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila) ± Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich.

### 3.3.1.2 Polychaeta

Kurzzeitversuche zur Magnetfeldexposition mit dem Seeringelwurm *Nereis diversicolor* zeigten bei Individuendichten von 105 Tieren/m<sup>2</sup> keine signifikant unterschiedliche Verteilung im Vergleich zur Kontrollgruppe (Abb. 11).

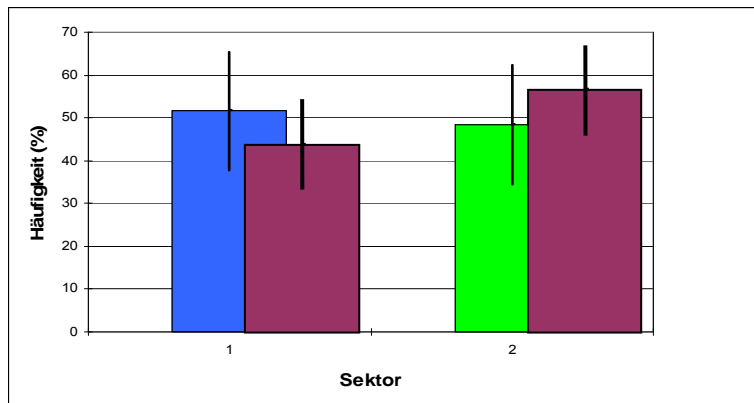


Abb. 11: Mittlere Häufigkeit von *Nereis diversicolor* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila) ± Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich. Individuendichte 105 Tiere/ m<sup>2</sup> (n=16).

### 3.3.1.3 Echinodermata

*Asterias rubens* wurde im Kurzzeitversuch einem Magnetfeld von 2,8 mT ausgesetzt. Es zeigte sich bei Individuendichten von 89 Tieren/m<sup>2</sup> keine signifikant unterschiedliche Verteilung im Vergleich zur Kontrollgruppe (Abb. 12).

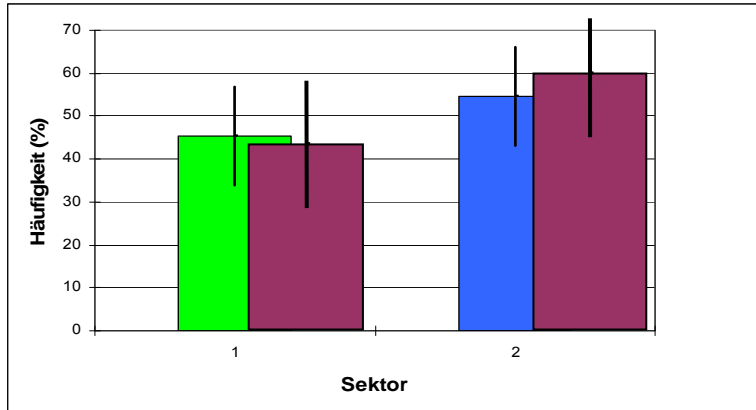


Abb. 12: Mittlere Häufigkeit von *Asterias rubens* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila)  $\pm$  Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich. Individuendichte 89 Tiere/ m<sup>2</sup> (n=24).

### 3.3.1.4 Crustacea

*Saduria entomon* zeigte im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition eine leichte Tendenz zum Verlassen des Expositionsgebietes. Allerdings sind diese Unterschiede nicht signifikant, da Prüfgröße  $U = 130,5$  für  $n_1; n_2 = 20; 20$  wenig über dem kritischen Wert der U-Tabelle liegt (Abb. 13).

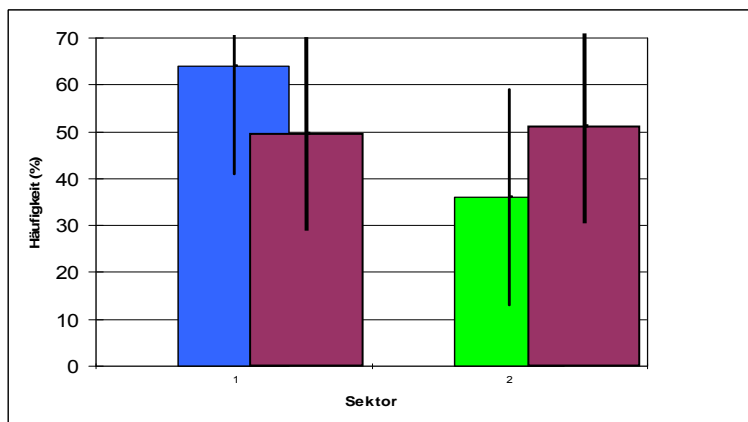


Abb. 13: Mittlere Häufigkeit von *Saduria entomon* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila)  $\pm$  Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich. Individuendichte 53 Tiere/ m<sup>2</sup> (n=20).

Für die Rundkrabbe *R. harrisii* lassen sich bei Magnetfeldexposition keine Unterschiede zur Kontrollgruppe feststellen (Abb. 14).

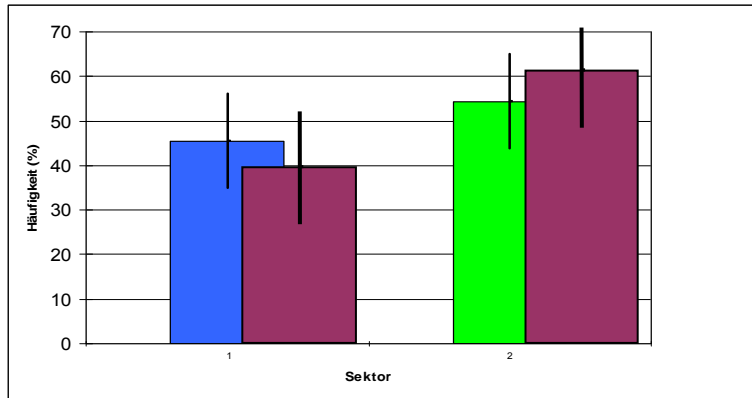


Abb. 14: Mittlere Häufigkeit von *Rhithropanopeus harrisii* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition von 2,8 mT im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila)  $\pm$  Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich. Individuendichte 105 Tiere/ m<sup>2</sup> (n=20).

Die Nordseegarnele *C. crangon* wurde umfangreich auf die Reaktion bei Magnetfeldexposition untersucht. Dabei wurden u.a. unterschiedliche mit Individuendichten, versetzte Spulenanordnungen und veränderte magnetische Flussdichten gearbeitet (Tab. 4). Die erzielten Ergebnisse zeigten keine eindeutigen Reaktionen hinsichtlich einer Magnetfeldexposition. So konnte bei Untersuchungen mit 42 – 155 Tieren/m<sup>2</sup> bei einer Flussdichte von B=2,8 mT eine deutliche, teilweise signifikante Attraktans zum magnetfeldbeeinflussten Sektor festgestellt werden (Abb. 15 B-E). Im Gegensatz dazu konnten diese Ergebnisse bei vergleichbaren Individuendichten und bis zu einer Flussdichte von B= 1,5 mT verringertem Magnetfeld sowie bei Individuendichten von 300 Tieren/m<sup>2</sup> nicht bestätigt werden (Abb. 15 A, F-H). Diese beschriebenen Experimente wurden alle im Untersuchungsjahr 2002 durchgeführt. Zu einer möglichen Verifizierung der Befunde wurden im Jahre 2003 weitere ähnliche und gleichartige Experimente mit deutlich höheren Wiederholungen durchgeführt. Bei diesen Versuchen konnten ebenfalls keine weiteren Bestätigungen für eine Attraktans zum magnetfeldbeeinflussten Sektor nachgewiesen werden (Abb. 16 A, B, D, E)

bzw. signifikante Unterschiede entstanden durch eine Ungleichverteilung der Kontrollgruppe (Abb. 16 C).

Tab. 4: Versuchsbedingungen der Kurzzeitversuche von *C. crangon* aus den Abbildungen 15 und 16 Signifikanzen nach dem U-Test von Mann und Withney. n.s.- nicht signifikant. \* Signifikanz mit Irrtumswahrscheinlichkeit von  $P < 0,05$ , \*\* hohe Signifikanz mit Irrtumswahrscheinlichkeit von  $P < 0,01$

Abb.	Buchst.	Ind./m <sup>2</sup>	Anzahl Wiederholungen	B (mT)	Signifikanz
15	A	304	6	2,8	n.s.
15	B	155	6	2,8	*
15	C	149	7	2,8	**
15	D	77	6	2,8	n.s.
15	E	42	7	2,8	n.s.
15	F	78	10	2,0	n.s.
15	G	74	6	1,5	n.s.
15	H	87	8	2,8	n.s.
16	A	106	20	2,8	n.s.
16	B	106	20	2,8	n.s.
16	C	106	11	2,8	*
16	D	105	19	2,8	n.s.
16	E	90	16	2,8	n.s.



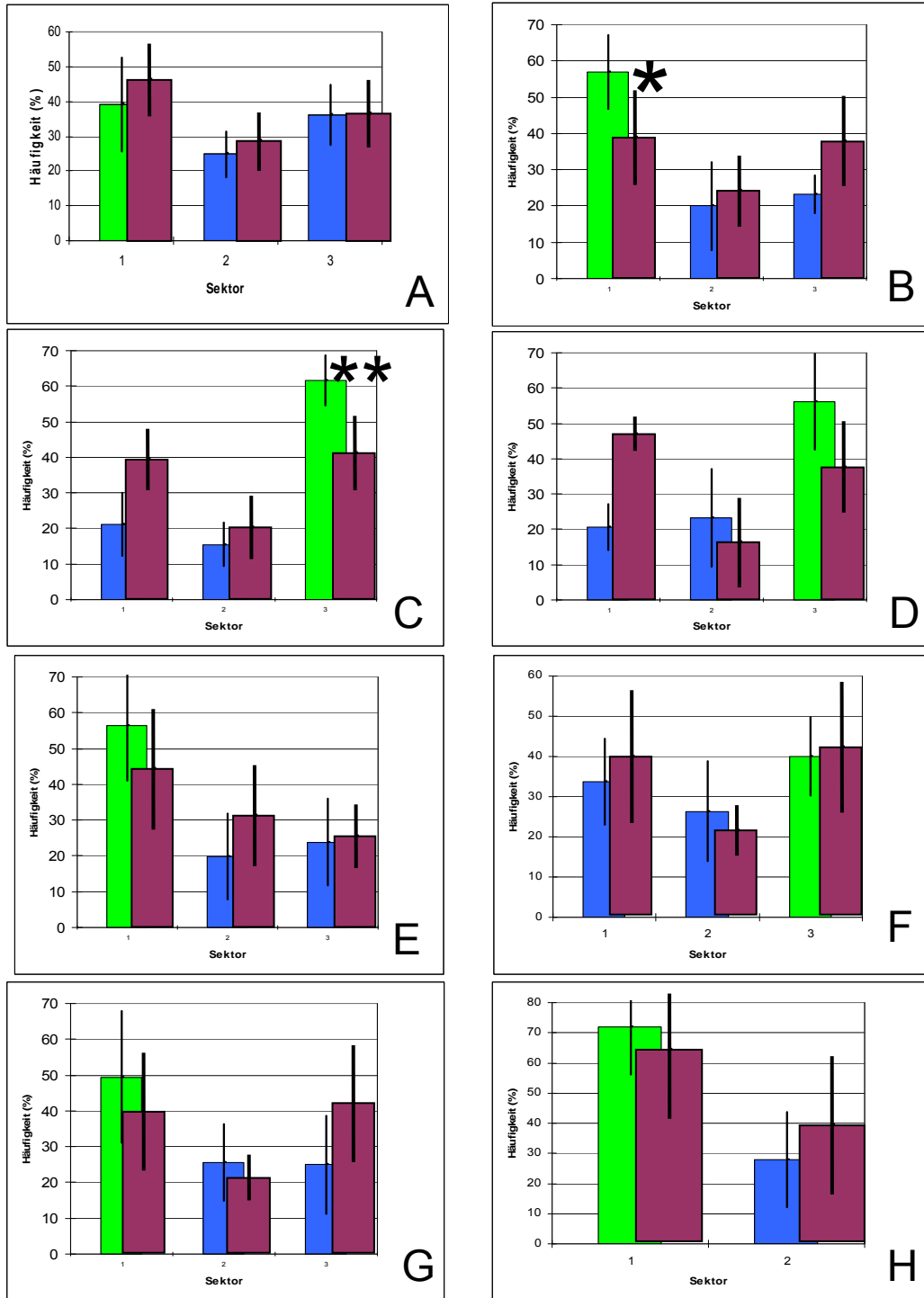


Abb. 15: Mittlere Häufigkeit von *Crangon crangon* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila)  $\pm$  Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich.

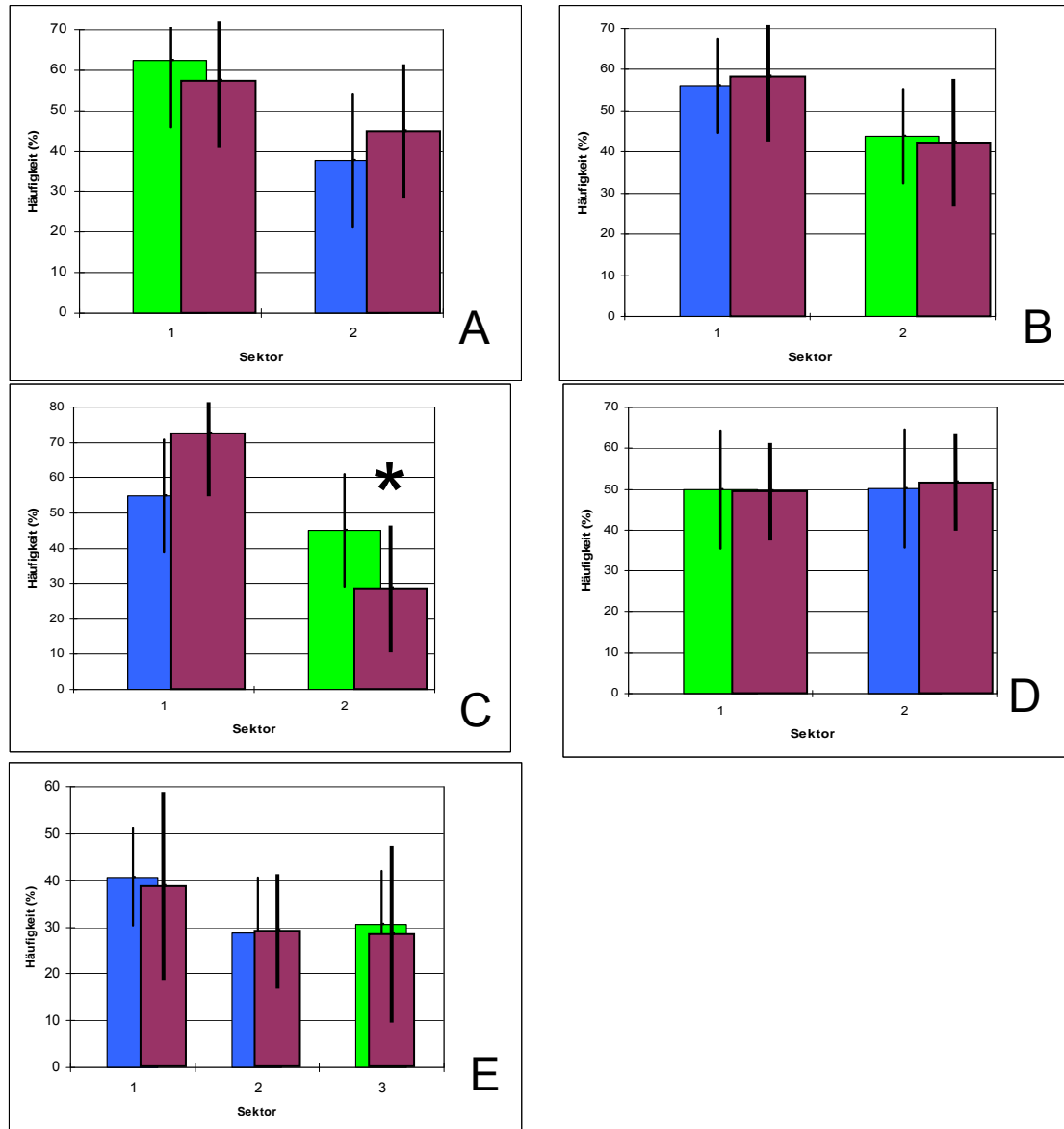


Abb. 16: Mittlere Häufigkeit von *Crangon crangon* im Kurzzeitversuch bei Magnetfeldexposition im Vergleich zur Kontrollgruppe (lila)  $\pm$  Standardabweichung. grün- Magnetfeldbereich, blau- magnetfeldfreier Bereich.

### 3.3.2 Wechselstrom

Kurzzeituntersuchungen im frequenten Magnetfeld wurden mit *C. crangon* durchgeführt. Nach Beendigung der Kontrollversuche (n=15) wurde eine verstärkte Anhäufung (47 – 57 %) von Garnelen in der nordwärts gelegenen Sektion des Aquariums festgestellt. Dieses Ergebnis war unabhängig von der Anordnung der Spulen (Abb. 17 B). Im Ergebnis der Expositionsversuche zeigten sich in beiden Ansätzen jeweils niedrige Häufigkeiten in den mittleren Sektionen und jeweils hohe Aufenthaltsnachweise (35- 43 %) in den Randsektoren des Aquariums. Ein Bezug zum Expositionsbereich konnte nicht festgestellt werden.

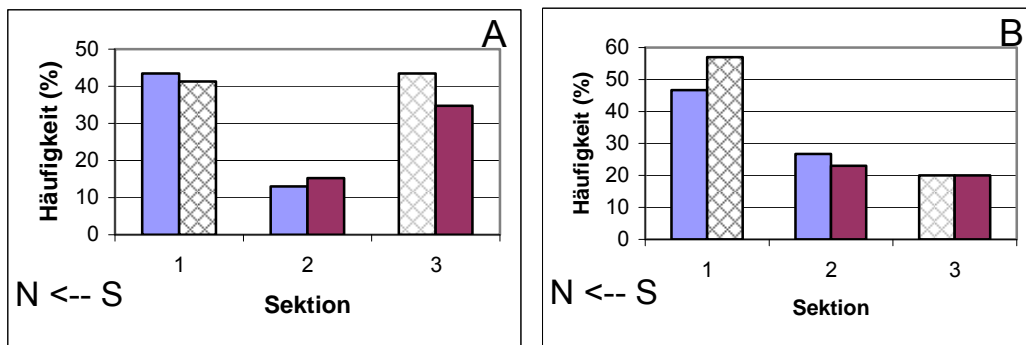


Abb. 17: Mittlere Häufigkeit pro Sektion von *Crangon crangon* in zwei parallelen Kurzzeitversuchen (blau u. lila) bei Magnetfeldexposition im Wechselfeld von  $B=1,0$  mT (A) im Vergleich zu den beiden Kontrollgruppen (B) Schraffur-Magnetfeldbereich (A) bzw. Lage der Spulen (B)

### 3.4 Sauerstoffverbrauch von *C. crangon* und *P. squilla*

Der Sauerstoffverbrauch von *P. squilla* lag für alle drei Versuchsanordnungen in der gleichen Größenordnung (Abb. 18). Im Vergleich der kumulativen Stundenwerte zeigte sich für den Kontrollansatz und die Exposition im frequenten Magnetfeld (AC) ein identisches Bild. Der Sauerstoffverbrauch unter statischen Magnetfeldbedingungen war in der ersten Stunde etwas höher. Diese Differenz setzte sich im kumulativen Vergleich weiter fort.

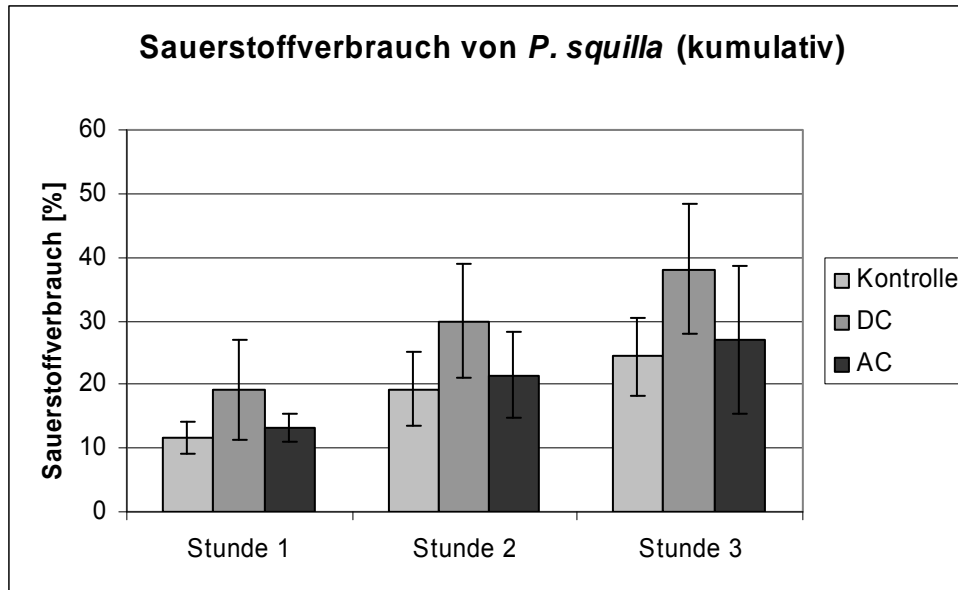
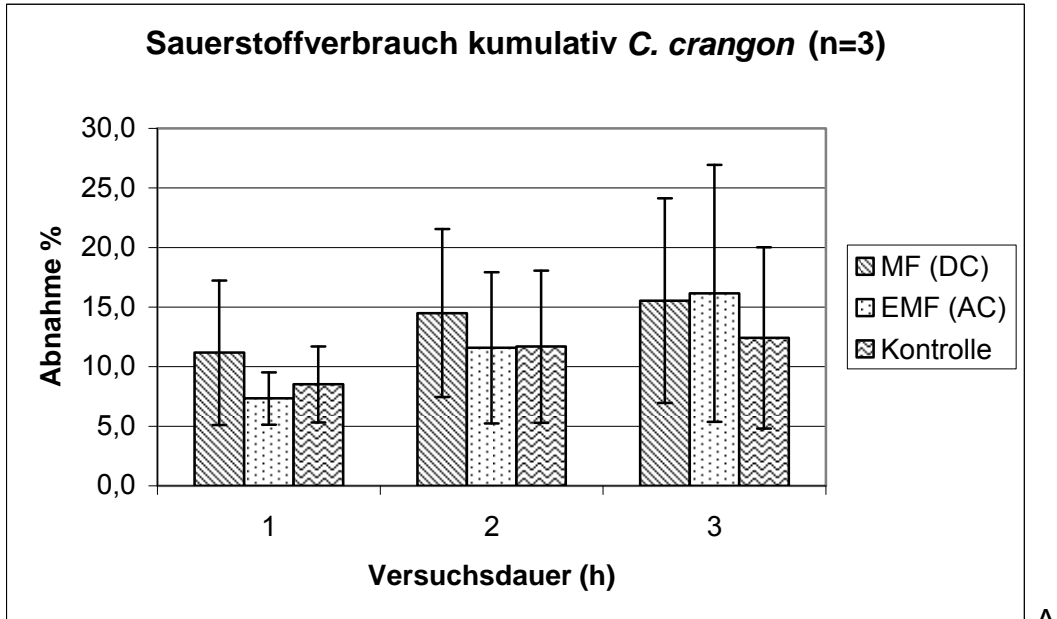
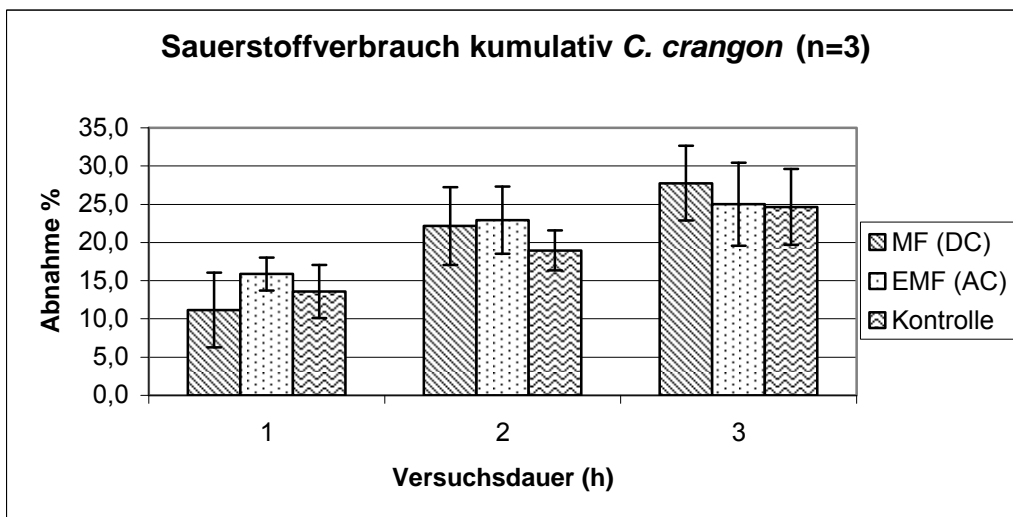


Abb. 18: Mittlerer kumulativer prozentualer Sauerstoffverbrauch von *Palaemon squilla* ohne Feldeinfluss (Kontrolle), unter Einfluss eines statischen Magnetfeldes (DC) und eines elektromagnetischen Wechselfeldes (AC).

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs für *C. crangon* ergaben für zwei Tiere unter den Bedingungen eines statischen Magnetfeldes, eines frequenten Magnetfeldes und der Kontrolle ein ähnliches Bild. Die kumulative Darstellung lieferte für alle Bedingungen vergleichbare Werte und somit lassen sich für diese Tierart keine Unterschiede im Sauerstoffverbrauch erkennen (Abb. 19).



A



B

Abb. 19: Mittlerer kumulativer prozentualer Sauerstoffverbrauch aus jeweils drei Versuchen von zwei Tieren der Garnele *Crangon crangon* (A und B) ohne Feldeinfluss (Kontrolle), unter Einfluss eines statischen Magnetfeldes (DC) und eines elektromagnetischen Wechselfeldes (AC).

### 3.5 Videobeobachtungen

Mit der Nordseegarnele *C. crangon* und dem Schlangensterne *O. albidus* wurden lediglich Einzelversuche durchgeführt. Die Tiere erwiesen sich für den

Versuchsaufbau als zu groß. Es wurden kaum nennenswerte Bewegungsaktivitäten registriert und somit konnten keine Schlussfolgerungen hinsichtlich einer Magnetfeldbeeinflussung festgestellt werden. Es ist lediglich möglich nachzuweisen, dass der Aufenthalt im magnetfeldbeeinflussten Sektor nicht explizit vermieden wurde (Abb. 20).

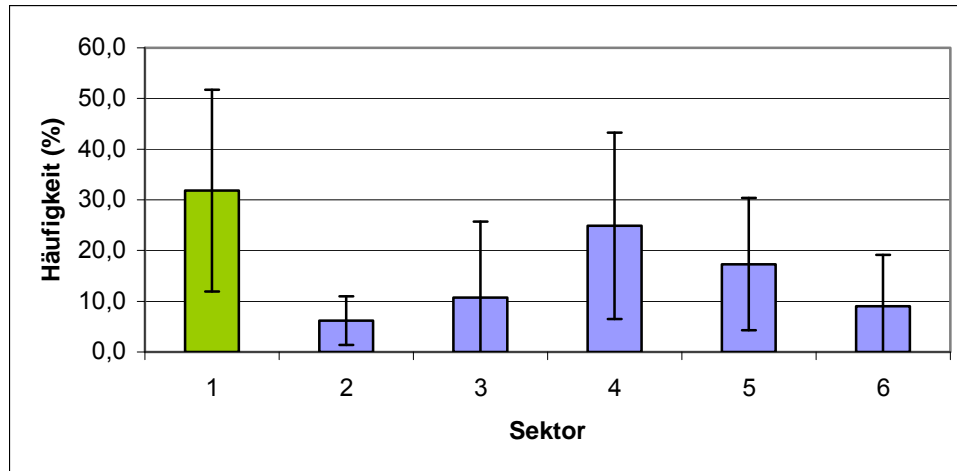


Abb. 20: Videobeobachtungen einer Nordseegarnele *Crangon crangon* im Zeitraum vom 24.07.-29.07.03 für eine Dauer von 10 s im Intervall von 13 min. Mittlere prozentuale Aufenthaltszeit pro Sektor. Die Standardabweichung resultiert aus dem Mittelwert der Abweichungen jedes Tages. Grün: Magnetfeld-Sektor

Weitere Videobeobachtungen wurden an sechs Exemplaren der Käferschnecke *Lepidochitona cineria* durchgeführt. Diese Tiere zeigten erhöhte Mobilität, obwohl auch stundenlange Ruhephasen nachgewiesen wurden. Auch die Käferschnecken zeigten keinerlei definierte Vermeidungsstrategie gegenüber einem Magnetfeld. Die Auswertung der Versuche erbrachte sowohl längere als auch kürzere mittleren Verweilzeiten im Magnetfeld sowie den Nachweis des Durchwanderns des Expositionsbereiches (Abb. 21).

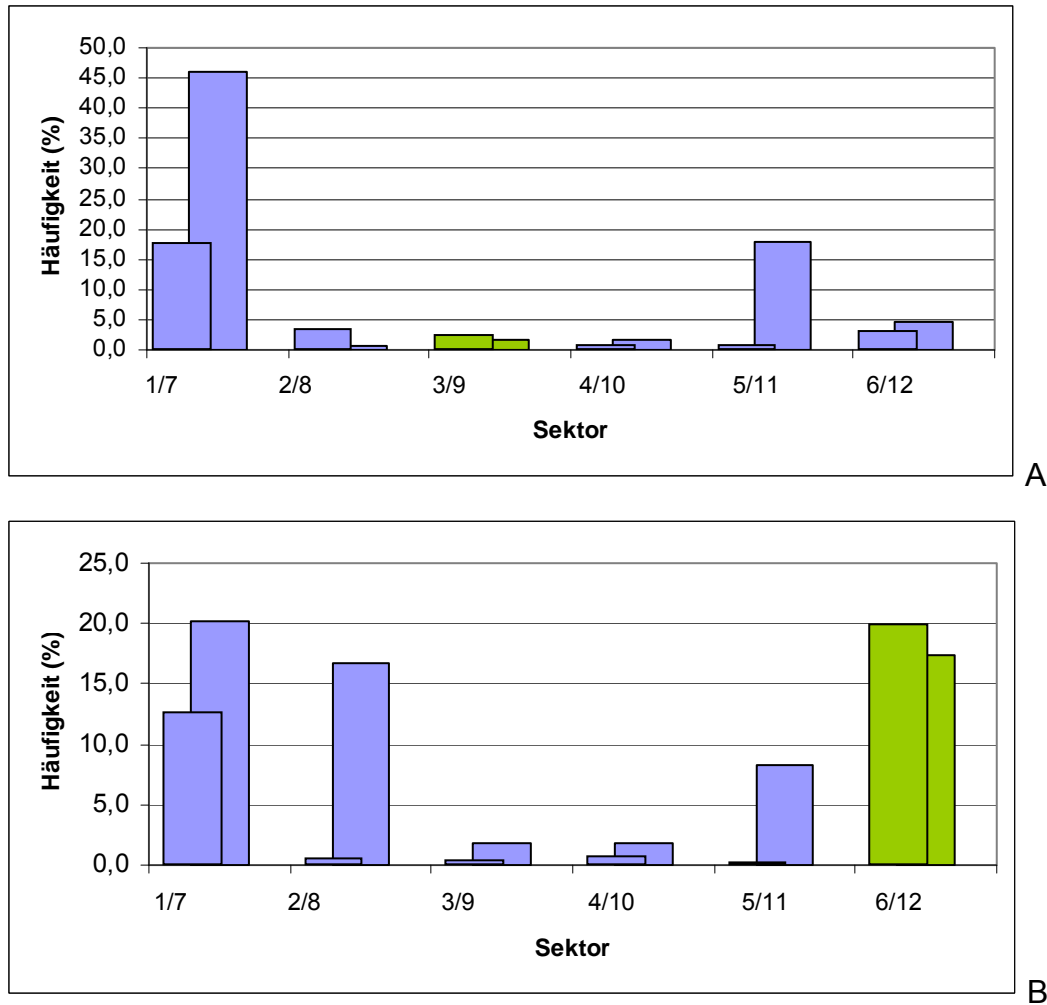


Abb. 21: Videobeobachtungen von zwei Käferschnecken *Lepidochitona cineria* im Zeitraum vom 24.09.-29.09.03 (A) und 02.10.-08.10.03 (B) für eine Dauer von 10 s im Intervall von 13 min. Mittlere prozentuale Aufenthaltszeiten pro Sektor. Grün: Magnetfeld-Sektor

## 4 Diskussion

Die durch eine Windenergieanlage (WEA) am Generator erzeugte Energie muss bei Offshore-Anlagen über eine teilweise weite Entfernung durch das Meer zum Festland transportiert werden. Die technische Realisierung verlangt eine Trennung des Energietransportes nach einer internen Verkabelung der WEA bis zu einer Offshore-Umspannstation und eine Netzanbindung von dort zum Festland (Oswald, 2003). Bei der internen Verkabelung werden 8-10 Anlagen (40-50 MW) in so genannten Clustern über eine Ring- oder Stichleitung miteinander verbunden. Dazu werden Drehstrommittelspannungskabel (maximal 36 kV Nennspannung) benutzt. Für die Verbindung zum Festland kommen sowohl Hochspannungs-Drehstromkabel-Übertragungen als auch Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen in Betracht (Oswald, 2003).

Werden elektrische Ladungen (elektrische Ströme) durch die Kabel transportiert, dann bilden sich um diese Leiter magnetische Felder aus. Das bereits um eine ruhende Ladung vorhandene elektrische Feld baut sich dagegen nur innerhalb des Isoliermaterials der Seekabel aus und tritt nicht nach außen. Beim Transport von Gleichstrom baut sich ein Magnetfeld auf, welches in einem statischen Zustand mit gleicher Richtung verharrt (**statisches Magnetfeld**). Beim Transport von Drehstrom wechselt die Richtung des Magnetfeldes mit der Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz (**frequentes Magnetfeld**). Allerdings können im Bereich der Magnetfelder **sekundäre elektrische Felder** durch Induktion entstehen. Dies geschieht, sobald sich Ladungen in Form von Ionen im Meerwasser als Wasserströmung oder Lebewesen mit den Ladungen im Körper im Magnetfeld bewegen.

Das Magnetfeld eines Seekabels entspricht dem Magnetfeld eines langgestreckten stromdurchflossenen Leiters. Es ist an der Oberfläche des Leiters am größten und fällt bei Gleichstrom nach der Funktion  $1/x$  und bei Drehstrom nach der Funktion  $1/x^3$  ab. Das Magnetfeld ist dem Kabelstrom linear proportional. Bei Überschneidung von Magnetfeldern, z.B. bei zwei parallel verlegten Kabeln sind die jeweiligen Einzelfelder unter Beachtung ihrer Richtung



zu addieren. Der Wert der magnetischen Flussdichte lässt sich bei einem Leiter für den Abstand vom Leiter  $r$  errechnen nach:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r}$$

- Darin bedeuten:
- B= magnetische Flussdichte (Tesla)
  - I= Stromstärke (Ampere)
  - r= Abstand vom Leiter (m)
  - $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (V s)/(A m) = Vakuumpermeabilität

Für ein Seekabel sind demnach bei einem Strom von ca.  $I = 1.600$  A direkt am Kabel magnetische Flussdichten von über  $B = 3$  mT zu erwarten (Abb. 22). Bei Nutzung der Gleichstromtechnik sind künstliche magnetische Flussdichten noch in einem Abstand von 50 m vom Kabel möglich, allerdings liegen die Werte ab einem Abstand von 6 m bereits im Betrag unter den Werten des natürlichen geomagnetischen Feldes. Im Gegensatz dazu sind Drehstromfelder nur innerhalb eines Radius von 1 m um das Kabel existent, und erreichen bereits nach 50 cm ( $I = 1.600$  A) natürliche Werte, allerdings mit möglicherweise veränderter Ausrichtung als das geomagnetische Feld.

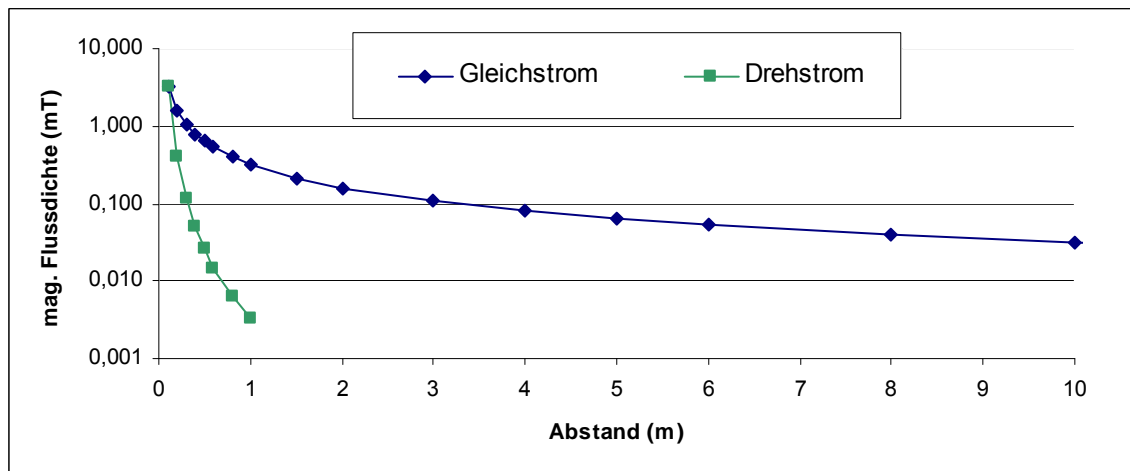


Abb. 22: Magnetische Flussdichte im Umkreis von einem Kabel bei einer Stromstärke von  $I = 1.600$  A bei Gleich- und Drehstromübertragung.

Magnetfelder können auf verschiedenste Weise auf Lebewesen einwirken. Belegt ist zum Beispiel die Orientierung am natürlichen Magnetfeld beim Hummer *Panulirus argus* (Lohmann, 1985). Künstliche Magnetfelder können bei Fischen und Seeigeln die Reproduktion durch veränderte Schlupfraten beeinflussen (Levin & Ernst, 1997; Skauli et al., 2000) und auf die Cilienaktivität durch veränderte Zellmembran-Transportmechanismen für Ionen wirken (Hemmersbach et al., 1997). Speziell für den marinen Bereich der Nord- und Ostsee existieren *in vivo* bis dato keine Erkenntnisse zu möglichen Auswirkungen von Magnetfeldern auf benthische Lebewesen.

In Laborversuchen wurde an verschiedenen bodenlebenden Organismen die Auswirkung einer Langzeitexposition im künstlichen Magnetfeld ermittelt. Über einen Zeitraum von 1 – 3 Monaten wurden Individuen der Flunder (1-3 cm lang, *Plathichthys flesus*), Miesmuscheln (*Mytilus edulis*), Nordseegarnelen (*Crangon crangon*), Reliktasseln (*Saduria entomon*), Rundkrabbe, (*Rhithropanopeus harrisi*) und Kugelasseln (*Sphaeroma hookeri*) statischen Magnetfeldern mit einer Flussdichte von 3,7 mT ausgesetzt. Diese Werte sind vergleichbar mit den Flussdichten an einem Gleichstromkabel (ca. 9 cm vom Leiter), durch das ein Strom von  $I=1.600$  A fließt. *C. crangon* wurde des Weiteren unter frequenten Magnetfeldbedingungen untersucht. In diesem Fall betrug die magnetische Flussdichte aus Sicherheitsgründen lediglich  $B=1,0$  mT ( $f=50$  Hz).

Übereinstimmend konnte ermittelt werden, dass sich eine Magnetfeldexposition in keiner Weise auf die Überlebensfähigkeit der Versuchstiere gegenüber den Kontrollgruppen auswirkt. Unter natürlichen Bedingungen weisen nur Miesmuscheln eine sessile Lebensweise auf. Insofern sind die erbrachten Ergebnisse nur für einen begrenzten Lebensabschnitt aussagekräftig. Alle übrigen Arten leben vagil und halten sich unter natürlichen Bedingungen wahrscheinlich nur selten langfristig im künstlichen Magnetfeld auf. Für diese untersuchten Arten wird ein akuter Magnetfeldeinfluss ausgeschlossen.

Allerdings sind mit den durchgeführten Experimenten keine Aussagen zu Spätfolgen nach erfolgter Magnetfeldexposition möglich, da hierzu keine

Versuche durchgeführt wurden. Jüngste Untersuchungen von Bauréus Koch *et al.* (2003) zeigten Wechselwirkungen von Magnetfeldern und Zellmembranen auf. Statische (27 – 37  $\mu\text{T}$ ) und frequente (13 – 114  $\mu\text{T}$ , 7 und 72 Hz) Magnetfelder interagieren demnach direkt mit den  $\text{Ca}^{2+}$  Kanälen in der Zellmembran. Ähnliche Ergebnisse konnten Gobba *et al.* (2003) an Immunocyten der Muschel *Mytilus galloprovincialis* erzielen. Frequente Magnetfelder (> 300  $\mu\text{T}$ , 50 Hz) beschädigten die  $\text{Ca}^{2+}$  Kanäle in der Zellmembran der Immunocyten. Hemmersbach *et al.* (1997) wies ebenfalls einen Einfluss von Magnetfeldern (50 Hz, 0,5 – 2 mT) auf die Transportmechanismen der Zellmembran durch veränderte Cilienaktivität bei Ciliaten nach. Bei einer Magnetfeldexposition an *Mytilus edulis* von 8 mT konnten Aristarkhov *et al.* (1988) eine deutliche Abnahme der Hydratation und eine Zunahme des Aminostickstoffs messen.

Der Einfluss von künstlichen Magnetfeldern auf Zellentwicklungsprozesse wurde an *M. edulis* bearbeitet. Über einen Zeitraum von drei Monaten wurde die Gonadenreifung verfolgt. Auch bei diesen Untersuchungen konnten keine Unterschiede zu den Kontrolltieren festgestellt werden. Levin & Ernst (1997) konnten bei zwei Seeigel-Arten eine veränderte Embryonalentwicklung bei einer statischen magnetischen Flussdichte von 10 mT feststellen. Im Gegensatz dazu fanden Pagnac *et al.* (1998) keinen unterschiedlichen Beginn der ersten mitotischen Teilung bei Seeiegeln während statischer (4 und 8 mT) und frequenter Magnetfeldexposition (6 und 8 mT, 80 Hz).

Die Embryonen des Zebrafisch *Danio rerio* schlüpften während einer anderen Studie bei Magnetfeldexposition (1 mT, 50 Hz) signifikant später (Skauli *et al.*, (2000). Untersuchungen von Karlsen & Aristarkhov (1985) an *Clava multicornis* im statischen Magnetfeld (10, 20, 40 mT) zeigten einen verzögerten Beginn der Vermehrung nach der Exposition mit ansteigender magnetischer Flussdichte. Bei 10 mT wurden zusätzlich sogar mehr Zooide gebildet als in der Kontrollgruppe.

Für einige wenige niedere Meerestiere ist die Orientierung am natürlichen Magnetfeld belegt und der Einfluss von künstlichen Magnetfeldern

nachgewiesen. Die Untersuchungen stammen aus den Gruppen der dekapoden Malakostraken (Lohmann, 1985), der Polyplacophora (Ratner, 1976) und der Gastropoden (Barnwell & Brown, 1964; Lohmann & Willows, 1987). Vorhandene Nachweise zum Einfluss von Magnetfeldern bei Fischen sind etwas zahlreicher und für Aale (*Anguilla rostrata*, *A. anguilla*), Schollen (*Pleuronectes platessa*) und Salmonide (*Oncorhynchus tshawytscha*) erbracht (Karlsson, 1985; McCleave & Power, 1978; Metcalfe et al., 1993; Taylor, 1986; Tesch et al. 1992; Zimmermann & McCleave, 1975).

Die durchgeführten Untersuchungen mit Magnetfeldexposition, bei denen die Versuchstiere die Möglichkeit hatten den Expositionsbereich zu verlassen bzw. sich dort zu sammeln, erbrachten für *Nereis diversicolor*, *Asterias rubens*, *Saduria entomon*, *Rhithropanopeus harrisi*, *Pomatoschistus*, spec. und *Plathichthys flesus* keine Unterschiede zur Kontrollgruppe. Für *Crangon crangon* wurden dagegen keine eindeutigen Ergebnisse erzielt. In mehreren Versuchen zeigten die Versuchstiere eine signifikante Ansammlung im magnetfeldbeeinflussten Sektor. Diese Ergebnisse konnten auch bei räumlicher Veränderung des Expositionsbereiches (vgl. Abb. 15 B-E) wiederholt werden. Im Gegensatz dazu bestätigten andere Versuchreihen diese Ergebnisse wiederum nicht und auch die Messungen zum Sauerstoffverbrauch wiesen bei dieser Art keine Differenzen auf.

## 5 Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt hatte sich zur Aufgabe gestellt, mögliche Auswirkungen von Magnetfeldern zu erkunden, die beim Betrieb von Offshore-Windanlagen entstehen und auf marine Organismen vornehmlich des Benthos einwirken können. In der wissenschaftlichen Literatur existieren in geringer Anzahl Studien, die Einflüsse durch Magnetfelder auf Organismen, Zellentwicklung und Ionentransport an Zellmembranen beschreiben.

Untersuchungen zum möglichen Einfluss von Magnetfeldexposition wurden ausschließlich im Labor durchgeführt. Künstliche homogene Magnetfelder mit Flussdichten von maximal  $B=3,7$  mT, vergleichbar den Werten an Seekablen, wurden mit parallel angeordneten Ringspulen erzeugt.

Als Versuchstiere wurden verschiedene Tierarten aus der Gruppe der Fische, Weichtiere, Vielborster, Stachelhäuter und Krebse gewählt. Dies waren im Einzelnen: junge Flundern (1-3 cm lang, *Plathichthys flesus*), Sand- und Strandgrundel (*Pomatoschistus microps*, *P. minutus*), Miesmuschel (*Mytilus edulis*), Nordseegarnele (*Crangon crangon*), Ostseegarnele (*Palaemon squilla*), Reliktassel (*Saduria entomon*), Rundkrabbe (*Rhithropanopeus harrisi*), Seestern (*Asterias rubens*), Schlangensterne (*Ophiura albida*), Käferschnecke (*Lepidochitona cineria*), Seeringelwurm (*Nereis diversicolor*) und Kugelassel (*Sphaeroma hookeri*).

Langzeitversuche mit Magnetfeldexposition erbrachten keine erhöhten Sterblichkeiten für *P. flesus*, *M. edulis*, *C. crangon*, *S. entomon*, *R. harrisii* und *S. hookeri* im Vergleich zur Kontrollgruppe.

Versuche zur Reifung der Gonaden bei *M. edulis* unter Magnetfeldexposition erbrachten ebenfalls keine Unterschiede zur Kontrollgruppe.

Messungen des Sauerstoffverbrauchs von *C. crangon* und *P. squilla* sowohl im statischen Gleichfeld als auch im Wechselfeld zeigten keine Differenzen zu den Kontrollbedingungen.

*Nereis diversicolor*, *Asterias rubens*, *Saduria entomon*, *Rhithropanopeus harrisii*, *Pomatoschistus*, spec. und *Plathichthys flesus* zeigten sich unbeeinflusst gegenüber statischer Magnetfeldexposition im Kurzzeitversuch. Die Individuen sammelten sich weder im Expositionsbereich an, noch zeigten sie deutliche Anzeichen den Bereich zu meiden. *C. crangon* zeigte dagegen unterschiedliche Reaktionen. In mehreren Versuchen konnte eine Attraktans der Garnelen zum Magnetfeldbereich festgestellt werden, weiterführende Experimente erbrachten dagegen keine Unterschiede.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit den durchgeführten Untersuchungen auf organismischer Ebene, mit Ausnahme der Nordseegarnele, kein statischer Magnetfeldeinfluss feststellbar ist. Allerdings deuten einige neuere Publikationen auf Wechselwirkungen von Magnetfeldern mit dem Ionen-transport an Zellmembranen hin. Insofern müssen mögliche Auswirkungen der Magnetfelder von Seekabeln auf Meerestiere auf zellphysiologischer Ebene zukünftig näher betrachtet werden.

## 6 Literatur

- Aristarkhov, V.M., Arkhipova, G.V. & Pashkova, G.K. (1988). Changes in common mussel biochemical parameters at combined action of hypoxia, temperature and magnetic field. IZV. AN S.S.S.R. (BIOL.)/PROC. U.S.S.R. ACAD. SCI. (BIOL.). Nr. 2: 238-245.
- Barnwell, F.H. & Brown, F.A. (1964). Responses of planarians and snails. In Barnothy, M.F. (ed.): Biological effects of magnetic field, Vol. 1. New York, Plenum Press: 263-278.
- Bauréus Koch, C.L.M., Sommarin, M., Persson, B.R.R., Salford, L.G. & Eberhardt, J.L. (2003). Interaction between weak low frequency magnetic fields and cell membranes. *Bioelectromagnetics* 24 (6): 395-402.
- Bayne, B.L. & Thompson, R.J. (1970). Some physiological consequences of keeping *Mytilus edulis* in the laboratory. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 20: 526-552.
- BGFE (2001). Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. BG- Regeln. Elektromagnetische Felder. BGR B11 (ZH1/257). Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik. Köln: 65 S.
- Gobba, F., Malagoli, D. & Ottaviani, E. (2003). Effects of 50 Hz magnetic fields on fMLP-induced shape changes in invertebrate immunocytes. The role of calcium ion channels. *Bioelectromagnetics* 24 (4): 277-282.
- Hemmersbach, R. Becker, E. & Stockem, W. (1997). Influence of extremely low electromagnetic fields on the swimming behavior of ciliates. *Bioelectromagnetics* 18: 491-498.
- Karlsen, A.G. & Aristarkhov, W.M. (1985). The effect of constant magnetic field on the rate of morphogenesis in a hydroid *Clava multicornis* (Forskal). *Zhurnal Obshchei Biologii* 46 (5): 686-690.
- Karlsson, L. (1985). Behavioural responses of European silver eels (*Anguilla anguilla*) to the geomagnetic field. *Helgoländer Meeresuntersuchungen.* Hamburg 39 (1): 71-81.

- Levin, M. & Ernst, S.G. (1997). Applied DC magnetic fields cause alterations in the time of cell divisions and developmental abnormalities in early sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics* 18: 255-263.
- Lohmann, K.J. (1985). Geomagnetic field detection by the western Atlantic spiny lobster, *Panulirus argus*. *Mar. Behav. Physiol.* 12 (1): 1-17.
- Lohmann, K.J. & Willows, A.O.D. (1987). Lunar-modulated geomagnetic orientation by a marine mollusk. *Science (Washington)* 235 (4786): 331-333.
- McCleave, J.D. & Power, J.H. (1978). Influence of weak electric and magnetic fields on turning behaviour in elvers of the American eel *Anguilla rostrata*. *Mar. Biol.* 46: 29-34.
- Metcalfe, J.D., Holford, B.H. & Arnold, G.P. (1993). Orientation of plaice (*Pleuronectes platessa*) in the open sea: evidence for the use of external directional clues. *Mar. Biol.* 117: 559-566.
- Oswald, B.R. (2003). Netzanbindung von Offshore-Windparks. 61. Kabelseminar- Kabelnetze in der Energieversorgung. 18.-19.02.2003 Hannover. Universität Hannover. Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik. unveröffentlichter Tagungsbeitrag: 9 S.
- Pagnac, C., Genevière A.-M., Moreau, J.-M., Picard A., Jousset-Dubien J. & Veyret, B. (1998). No effects of DC and 60-Hz AC magnetic fields on the first mitosis of two species of sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics* 19 (8): 494-497.
- Ratner, S.C. (1976). Kinetic movements in magnetic fields of chitons with ferromagnetic structures. *Behav. Biol.* 17 (4): 573-578.
- Skauli, K.S., Reitan, J.B. & Walther, B.T. (2000). Hatching in Zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to a 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics* 21: 407-410.
- Taylor, P.B. (1986). Experimental evidence for geomagnetic orientation in juvenile salmon, *Oncorhynchus tshawytscha* Walbaum. *Journal of Fish Biology* 28 (4): 607-623.



Tesch, F.-W., Wendt, T. & Karlsson, L. (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 (1): 52-60.

Zimmermann, M.A. & McCleave, J.D. (1975). Orientation of elvers of American eels (*Anguilla rostrata*) in weak magnetic and electric fields. Helgoländer wiss. Meeresunters. 27 : 175-189.

Zöfel, P. (1992). Statistik in der Praxis. Gustav Fischer Verlag Jena: 422 S.