

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Elektrische Fische



Eine Reihe von Fischen haben einen hochempfindlichen Elektrosinn entwickelt und haben sich damit Lebensräume erschlossen, in denen ihnen andere Sinnesorgane nicht viel nützen. So besiedeln zB elektrische Fische der Arten *Gnathonemus petersii* (**oben**), *Kryptopterus bicirrhus* (**oben rechts**) und *Eigenmannia virescens* (**rechts**) trübe Flußgewässer, wo sie sich bei Nullsicht mit elektrischen Signalen verständigen und orientieren können. Diese Tiere besitzen die Fähigkeit zur **aktiven Elektroortung**. Sie generieren selbst ein genau definiertes elektrisches Signal und messen den Einfluß ihrer Umgebung auf das elektrische Feld. Andere Tiere haben einen Elektrosinn, ohne selbst elektrische Signale aussenden zu können. Solche **passive Elektroortung** hilft Haien und Rochen bei der Nahrungssuche und wurde auch bei Schnabeltieren und Ameisenigeln entdeckt.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektrostimulation](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Passive Elektroortung

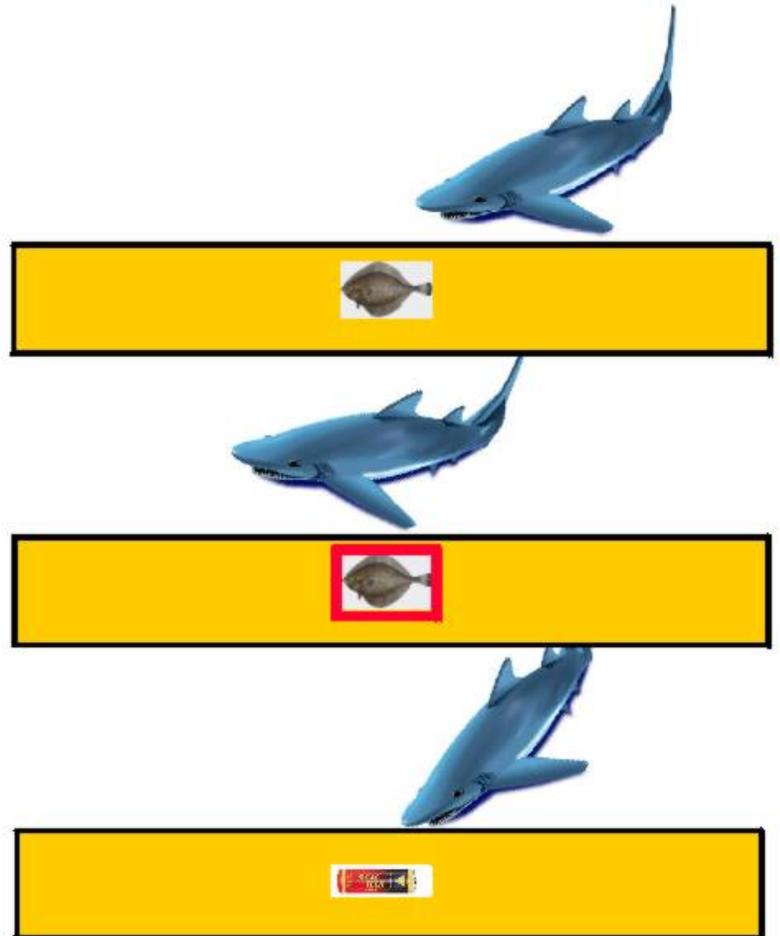


Quelle: www.aquahouse.tc/

Haie und Rochen sind in der Lage, verborgene Futterfische anhand ihrer elektrischen Felder auszumachen. So findet ein Hai eine eingegrabene Scholle auch ohne jedes Geruchs- oder Geschmackssignal. Allerdings verfehlt er die Scholle, wenn sie in einem elektrisch isolierenden Gehäuse liegt.

Eine vergrabene Spannungsquelle wird von Haien mit der gleichen Begeisterung aufgestöbert wie ein Nahrungstier.

Eindrucksvolle Beispiele für das Suchverhalten von Haien an Spannungsquellen hat das Hawai'i Institute of Marine Biology ins Netz gestellt: [Beispiel 1](#), [Beispiel 2](#).



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

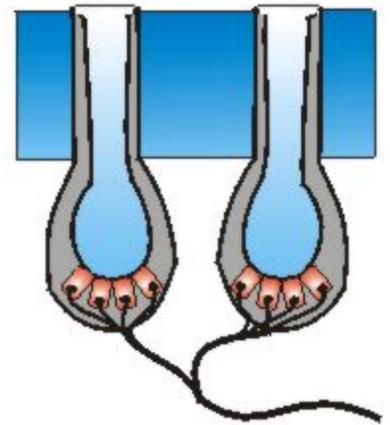
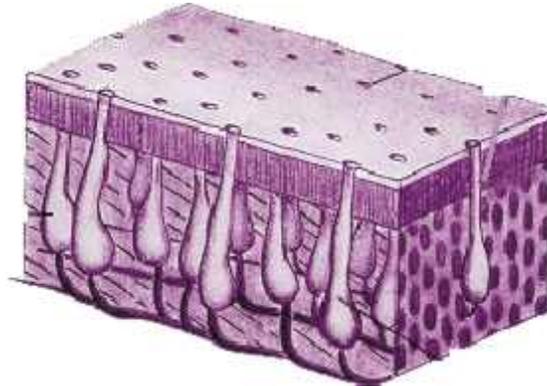
START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Lorenzinische Ampullen



Das bei Haien und Rochen sehr gut ausgeprägte elektrorezeptive System besteht aus vielen Hundert Poren, die vor allem im Kopfbereich zu finden sind. Die Poren sind die Mündungen der Ausführkanäle von Lorenzinischen Ampullen. Am Boden der mit Gallerte gefüllten Ampullen liegen elektrosensitive Zellen (Elektrorezeptoren), die aus Haarzellen hervorgegangen sind und den Spannungsabfall über der Haut registrieren können. Aus dem Vergleich der neuronalen Signale aus vielen Ampullen in einem Hautareal ergibt sich ein sensorisches Signal, das die Gegenwart einer Spannungsquelle anzeigt.

Die Elektrorezeptoren in Lorenzinischen Ampullen sind **Gleichstromdetektoren**. Bei ihnen hat die der Körperaussenseite zugewandte (apikale) Seite einen relativ geringen elektrischen Widerstand. Der Widerstand des parazellulären Weges (zwischen den Elektrorezeptoren) ist dagegen groß. Elektrische Ströme können so über die apikale Membran in die Zelle gelangen, die basolaterale Membran depolarisieren und die Freisetzung von Transmittern aktivieren.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

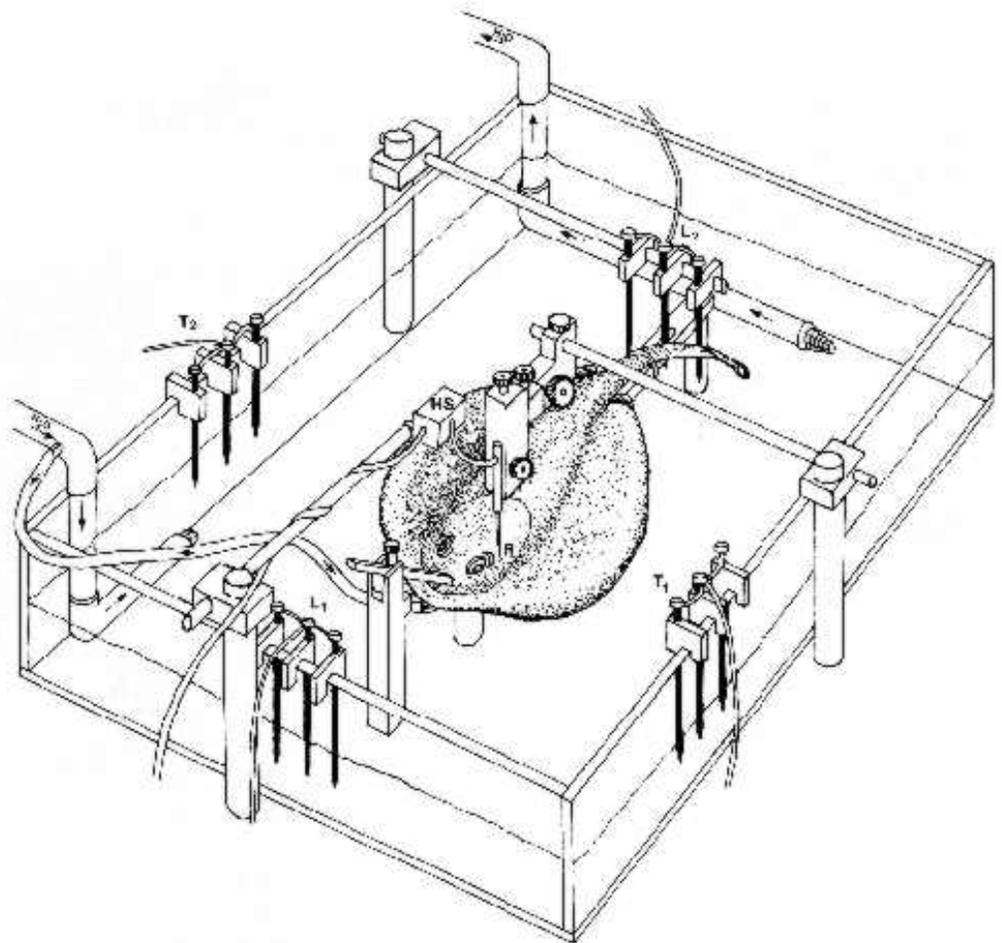
Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Neuronale Reaktion auf Elektroreizung

Experimenteller Aufbau zur Ableitung der neuronalen Aktivität des elektrosensorischen Systems des Stachelrochens *Urolophus halleri*. Das Tier ist in einer flachen Seewasserschüssel fixiert und kann über die Elektroden T1, T2, L1 und L2 mit elektrischen Feldern stimuliert werden. Mit Hilfe einer Mikroelektrode können Ableitungen von afferenten Nerven einzelner Elektrorezeptoren durchgeführt werden.

Das Ergebnis ein solchen Experiments ist unten gezeigt.

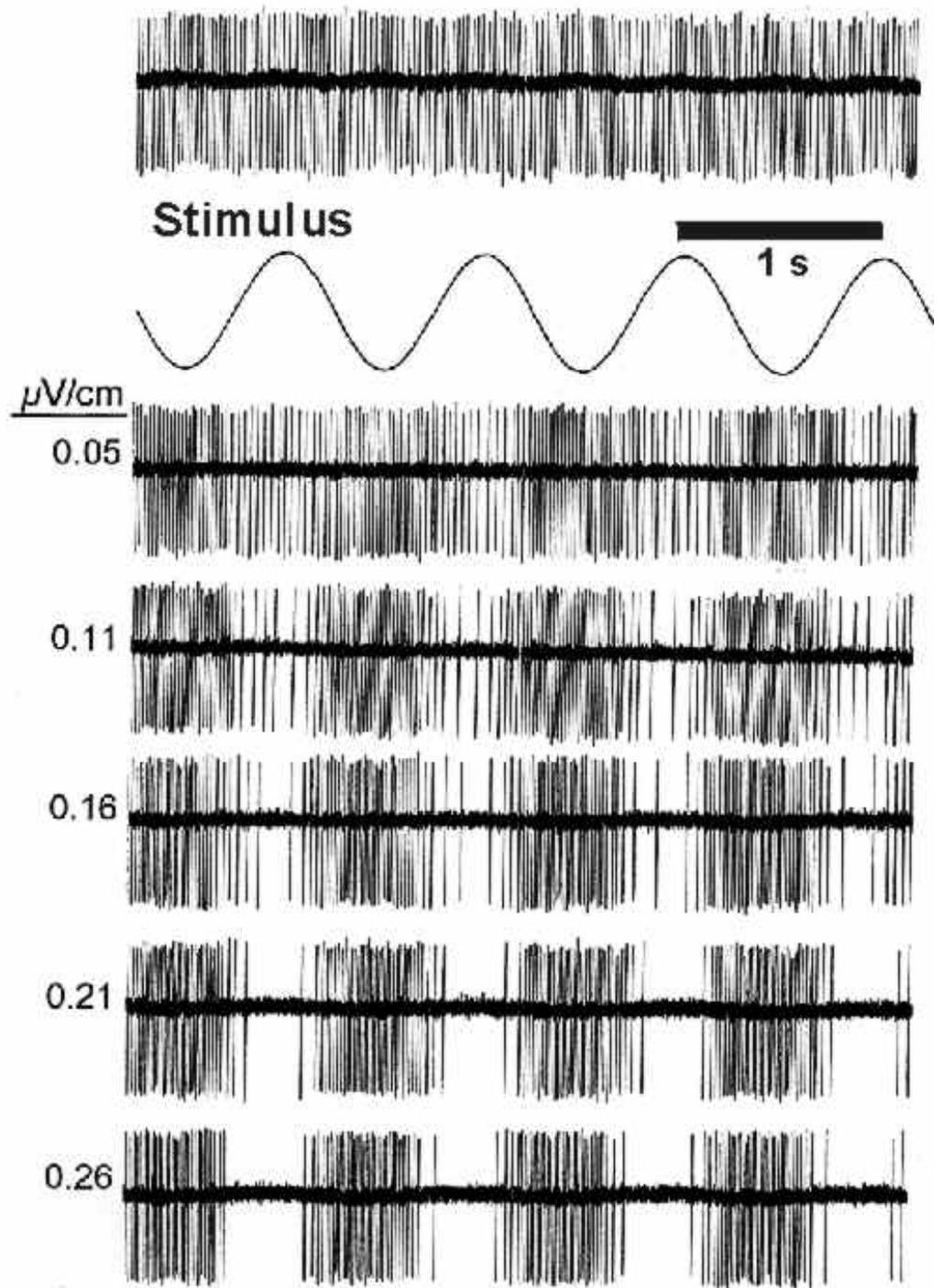


Oberste Spur: Ohne elektrischen Stimulus zeigt der afferente Nerv eines Elektrozepptors eine gleichmäßige Aktivität

Zweite Spur: Der Stimulus. Ein Wechselfeld mit einer Periode von 1 s (1 Hz), das über den Körper des Tieres angelegt wird.

Dritte bis siebte Spur: Je stärker die Intensität des Stimulus (die Feldstärke) gewählt wird, desto stärker ist die Reaktion des Elektrozepptors. Die Entladungsfrequenz wird vom Wechselfeld bestimmt: Während der Spannungsspitzen wird die Entladung unterdrückt, während der Spannungsminima wird die Entladung beschleunigt. Die angelegte Feldstärken (0.05 - 0.26 $\mu\text{V}/\text{cm}$) sind sehr schwach und ohne spezialisierte Elektrozepptoren nicht wahrnehmbar.

Aus: Tricas, T.C. + New, J.G. (1998) Sensitivity and response dynamics of elasmobranch electrosensory primary afferent neurons to near threshold fields. *Journal of Comparative Physiology A* 182: 89-101



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

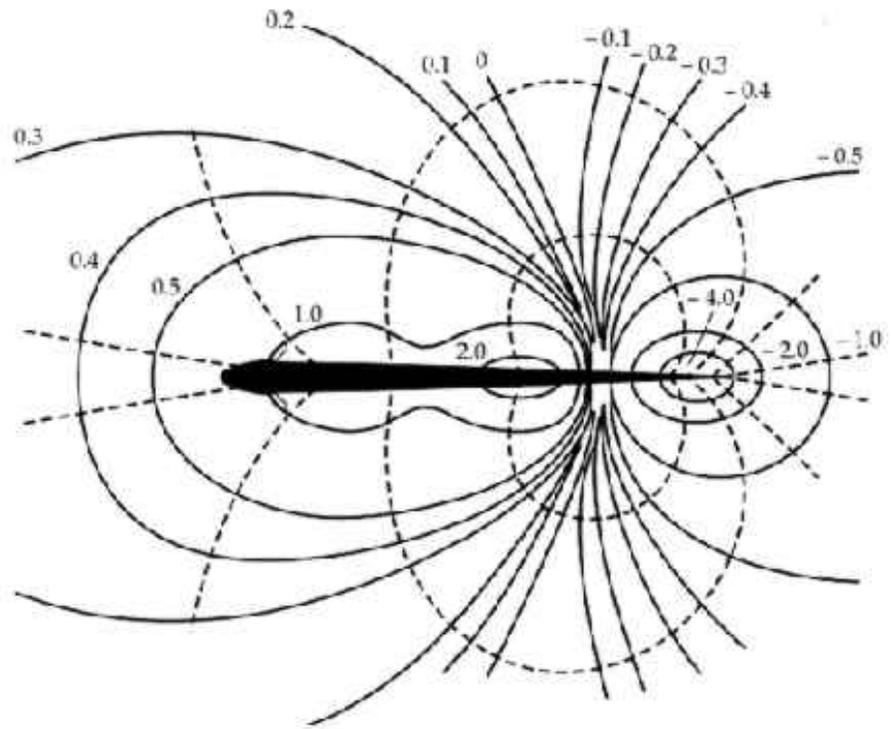
- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Aktive Elektroortung

Im Gegensatz zu den passiv elektrosensitiven Fischen, produzieren die **aktiv elektrosensitiven** ein kontinuierliches Wechselfeld. Mit diesem Feld "tasten" sie ihre Umgebung ab und erlangen Information über Größe, Beweglichkeit und Beschaffenheit von Objekten in ihrer Nähe.

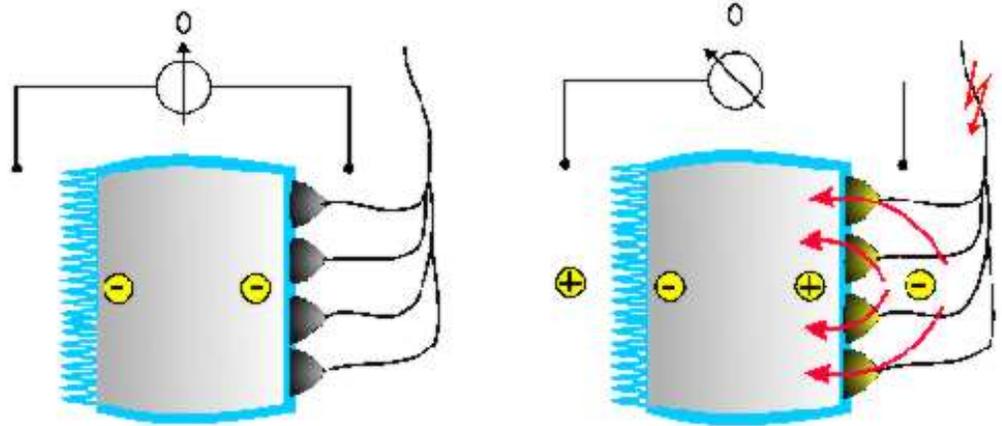


Die Tiere erzeugen die Wechselfelder mit Hilfe eines elektrischen Organs - einem spezialisierten, aus umgebildeten Muskelzellen aufgebauten Gewebe im Schwanzansatz. Bei neuronaler Stimulation produziert dieses Organ kurze Spannungspulse mit einer Frequenz von einigen Hundert Herz. Dadurch entsteht ein Wechselfeld, dessen Form durch Isopotentiallinien (rechts: durchgezogene Linien mit Angaben in Volt) und Feldlinien (rechts: gestrichelte Linien) dargestellt wird.



Das elektrische Organ besteht aus seriell angeordneten Elektrozyten, veränderten Muskelzellen, die eine stark unsymmetrische Form haben (auch Elektroplatten). Die eine Seite ist glatt und trägt eine hohe Dichte von cholinergen Synapsen. Die gegenüberliegende Seite trägt keine Synapsen, ist aber durch extensive Membranfaltungen stark vergrößert.

Im Ruhezustand haben diese Zellen ein negatives Ruhepotential von ca. -80 mV. Bei Aktivierungen der zuführenden Nerven wird die eine Zellseite durch massiven Na-Einstrom depolarisiert, während sich das Membranpotential auf der gegenüberliegenden, großflächigen Seite nur wenig verändert. Durch diese unterschiedliche Polarisierungen der beiden Zellseiten entsteht ein Potential über der ganzen Zelle, das bis etwa 150 mV ausmachen kann.



Hintereinanderreihung (serielle Verschaltung) von nur 100 Elektrozyten kann daher ein Potential von über 10 V erbringen. Bei stark-elektrischen Fischen werden durch Aneinanderreihung von bis zu 6000 Elektrozyten Spannungsschläge bis 1000 V erzeugt!

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

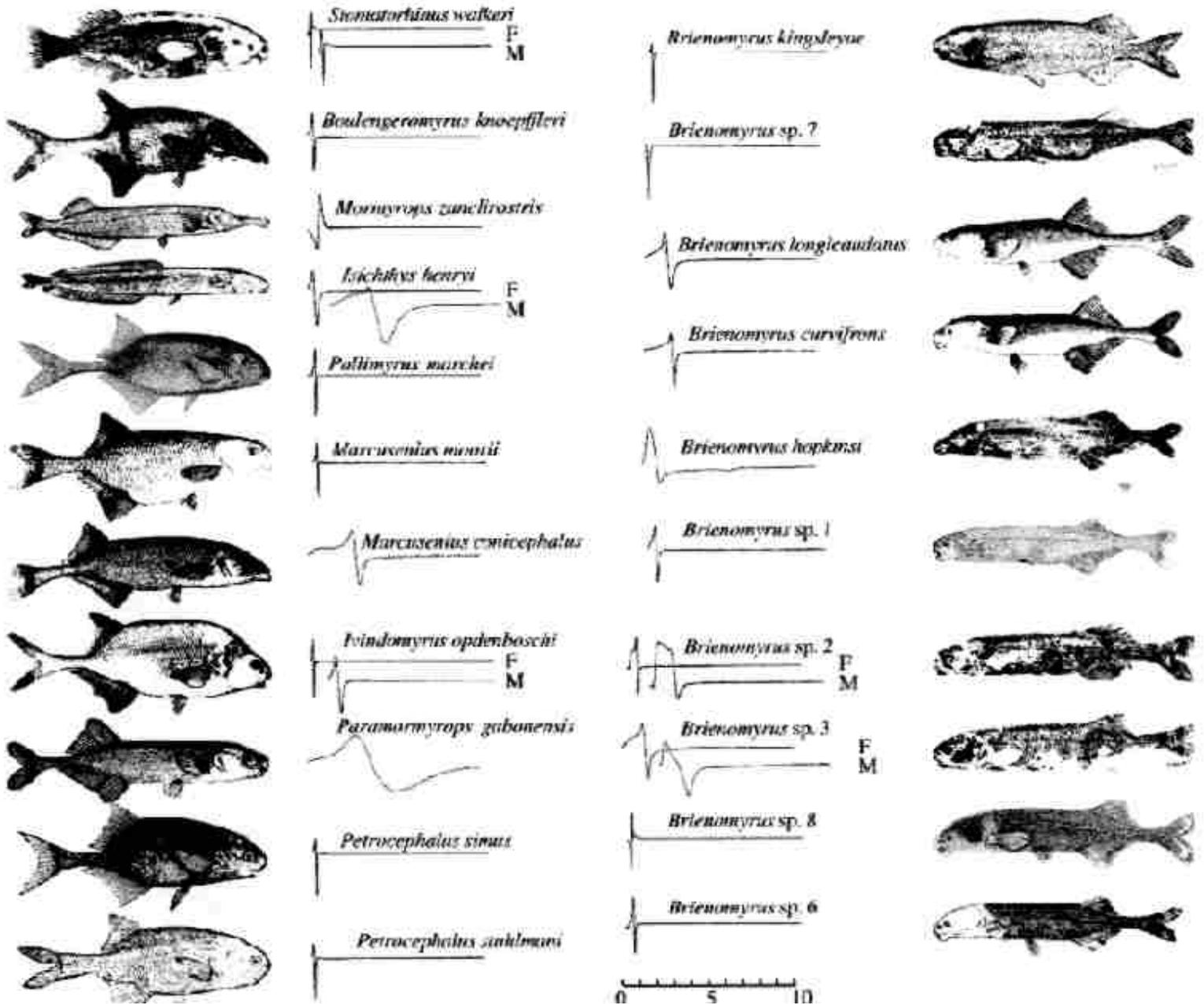
START

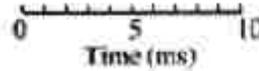
Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Elektrische Dialekte





Die elektrischen Signale elektrischer Fische (**EODs = electric organ discharge**) zeigen subtile Änderungen zwischen Gattungen und Arten (hier: die mormyriden Fische aus Nordost-Gabun). Die Tiere erkennen sich an ihren EODs und erforschen mit EODs ihre Umgebung. Ähnlich wie bei der visuellen und der akustischen Kommunikation erlaubt auch die Kommunikation mit elektrischen Wechselfeldern das Auseinanderhalten von Arten - und sogar von Männchen (**M**) und Weibchen (**F**). Dargestellt ist hier immer nur *ein* Spannungspuls. Die Tiere produzieren elektrische "Klänge" mit mehreren hundert solcher Pulse pro Sekunde.

Quelle: Hopkins, C.D. (1999) Design features for electric communication. *The Journal of Experimental Biology*. 202: 1217-1228.

Stephan Frings, Uni Heidelberg,

[Abt. Molekulare Physiologie](#)

Juli 2003

s.fring@zoo.uni-heidelberg.de

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

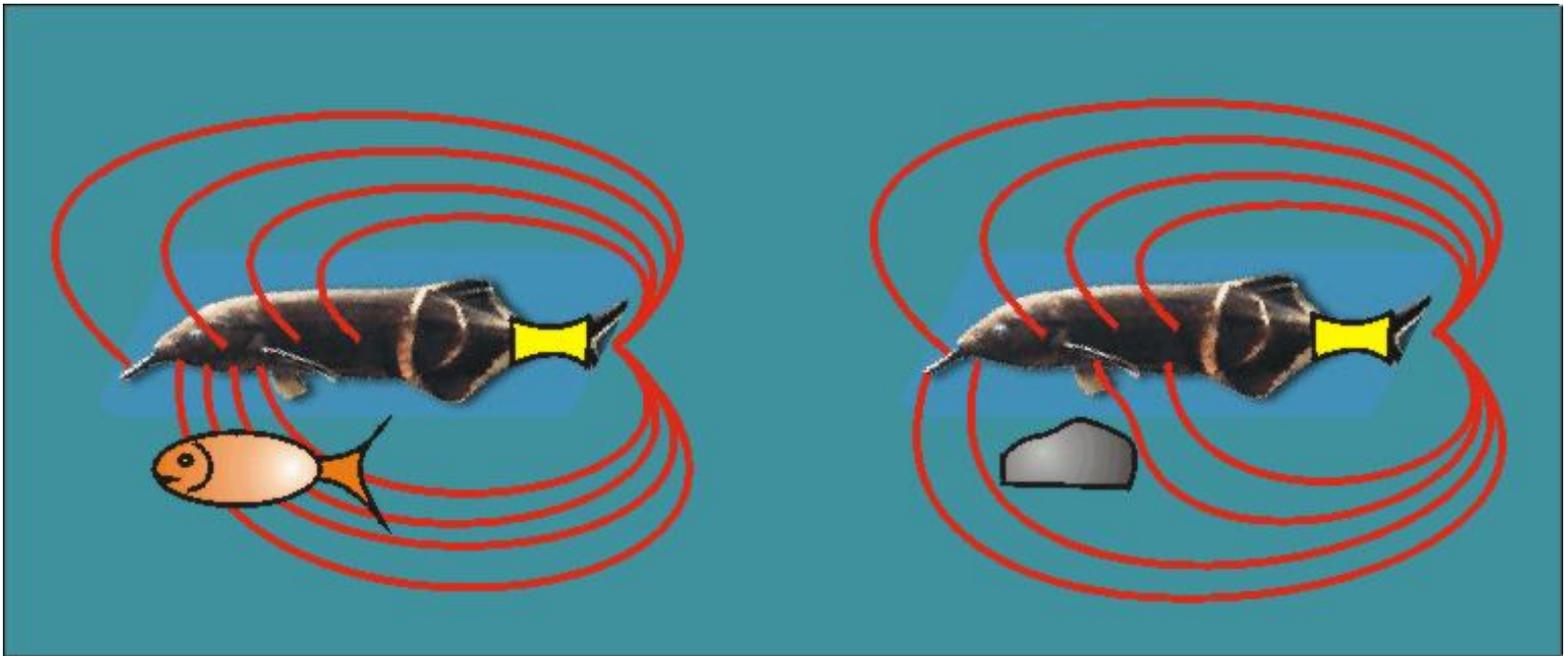
START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Die Entstehung elektrischer Bilder



Das elektrische Organ (**gelb**) des Nilhechtes befindet sich im Schwanzmuskel und erzeugt elektrische Impulse, die jedesmal ein elektrisches Feld zwischen Kopf und Schwanz aufstellen. Besonders im Kopfbereich, wo die Dichte der Elektrorezeptoren hoch ist, kann das Muster der Feldlinie analysiert werden. Das Süßwasser, in dem dieser Fisch lebt, hat eine relativ geringe elektrische Leitfähigkeit. Wenn sich ein Objekt mit höherer Leitfähigkeit (ein Tier oder eine Pflanze) dem Nilhecht nähert, werden die Feldlinien gebündelt, denn sie nehmen den leichtesten Weg - den der höchsten Leitfähigkeit (**linkes Bild**). Dadurch ergibt sich auf der Haut des Nilhechtes ein "elektrisches Bild", ein Sinneseindruck, der sich aus dem dichteren Muster der Feldlinien ergibt.

Wenn der Fisch in die Nähe eines Objekts gerät, das geringerer Leitfähigkeit als Wasser hat (zB ein Stein), dann werden die Feldlinien aufgefächert, weil der direkte Weg für Stromfluß versperrt ist (**rechtes Bild**). Dabei ergibt sich ein entgegengesetztes elektrisches Bild - eine Wahrnehmung geringerer Feldliniendichte.

Der Fisch bekommt also bei der aktiven Elektroortung Information über die Lage eines Objektes (Kopfnähe oder Schwanznähe, rechts oder links), die Beschaffenheit des Objektes (elektrische Leitfähigkeit) sowie über die Entfernung.

Quelle: von der Emde, G. (1999) Active electrolocation of objects in weakly electric fish

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

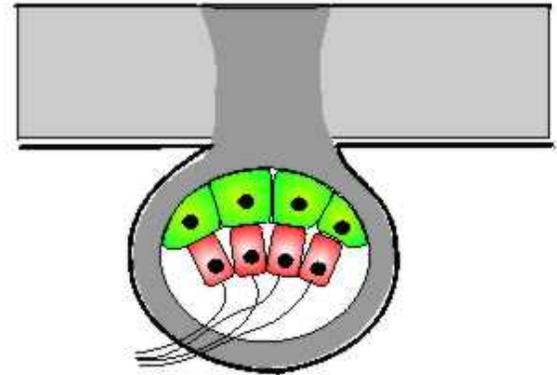
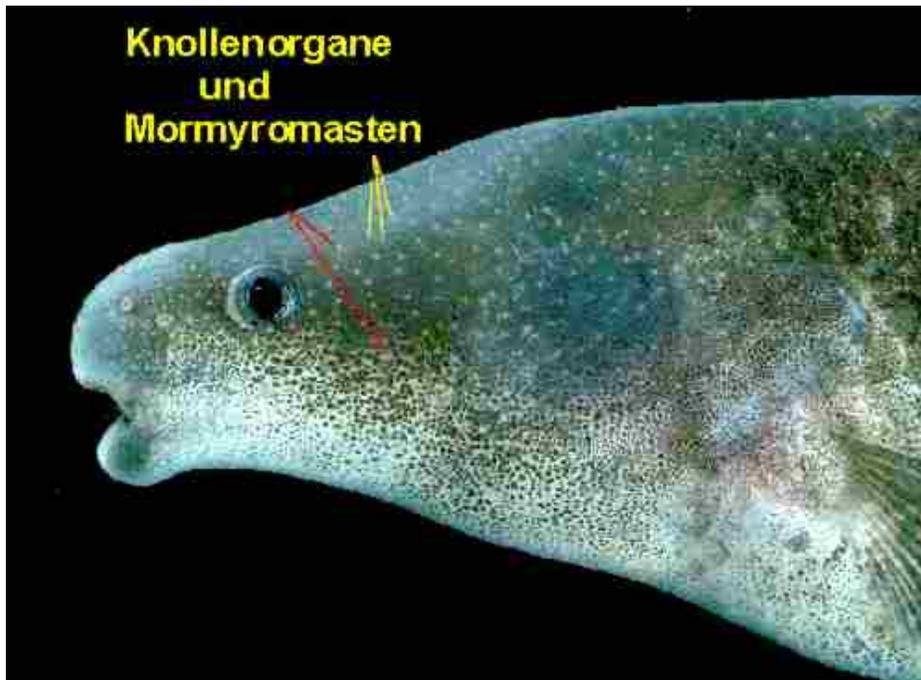
START

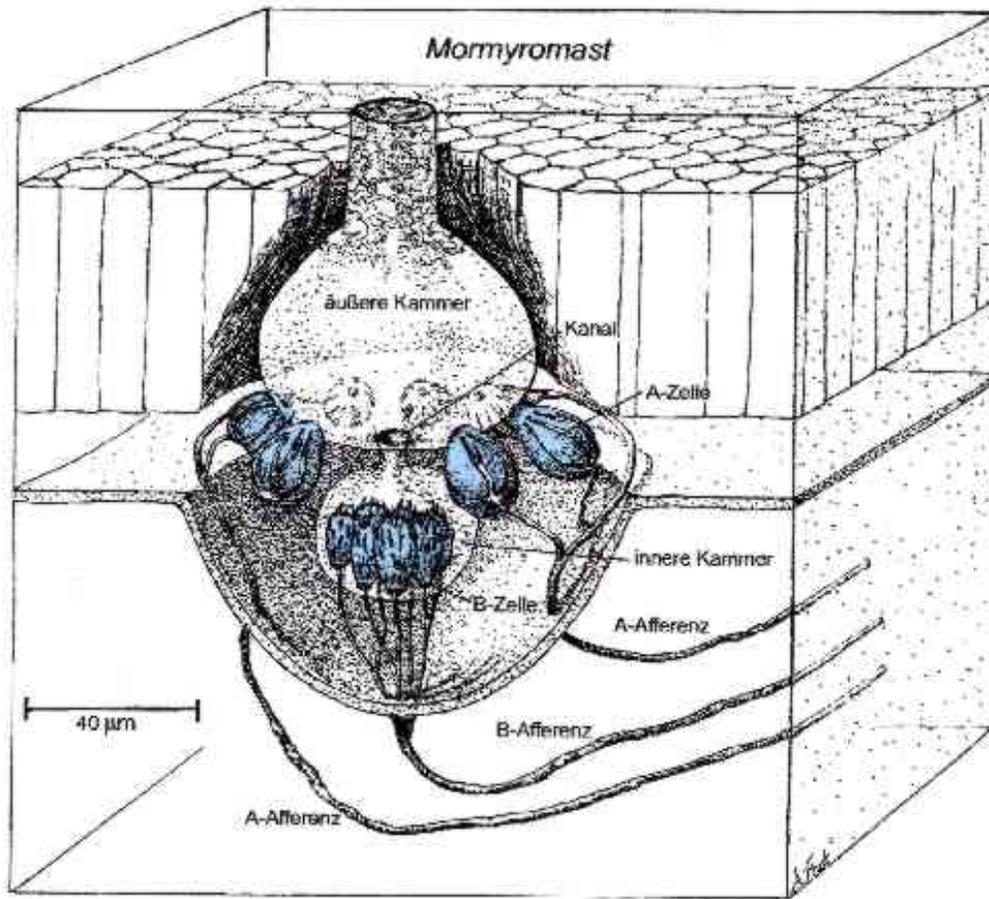
Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Tubulusorgane und Mormyromasten





Die aktiv elektrischen Fische nutzen zur Analyse der selbsterzeugten Wechselfelder Tubulusorgane (im Fall der südamerikanischen Gymnotiformen) oder Knollenorgane und Mormyromasten (bei den afrikanischen Mormyriformen).

Tubulusorgane und Knollenorgane sind Wechselstromdetektoren: vor den Elektrozeporen befindet sich eine Zellschicht (grün im Bild oben), die dem Fluß von Gleichstrom Widerstand entgegensetzt. Wechselstromsignale wie die 0,1 - 10 kHz-Wechselfelder der EODs erzeugen jedoch kapazitive Ströme in der vorgelagerten Zellschicht und gelangen somit zu den Elektrozeporen.

Bei den **Mormyromasten** (links) werden Gleichstromanteile der EOGs vor allem von den A-Zellen, Wechselstromanteile aber vor allem von den B-Zellen erfasst.

Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"



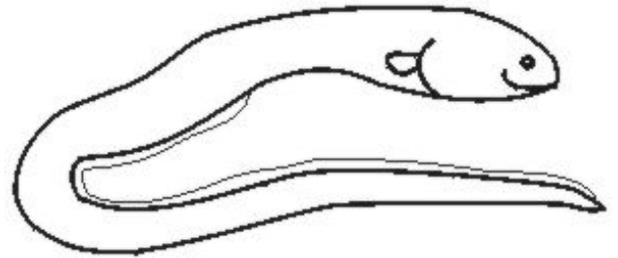
Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektrozierung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Elektrizität als Waffe

Der Zitteraal **Electrophorus electricus** ist eigentlich nicht mit den Aalen verwandt sondern wird nur wegen seines schlangenförmigen Körpers so genannt. Es ist ein Fisch, der seinen Schwanzmuskel zu einem einzigen riesigen Elektroorgan umfunktioniert hat. Alle Organe des Zitteraals liegen in einem etwas verdickten Körpersegment gleich hinter dem Kopf. Selbst der Anus befindet sich unweit der Kiemen in diesem Segment. Der gesamte Rest des Körpers (ca 70%) ist eine einzige steuerbare Batterie - der Electroplox, das elektrische Organ des Zitteraals.

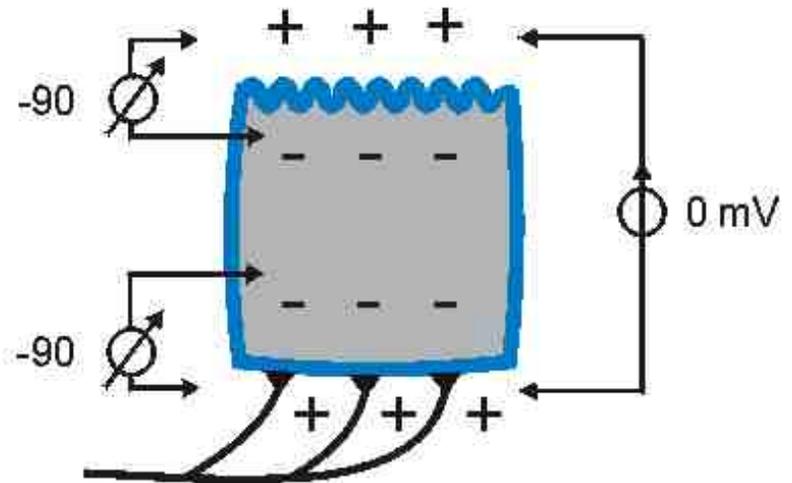


Wie funktioniert ein elektrisches Organ?

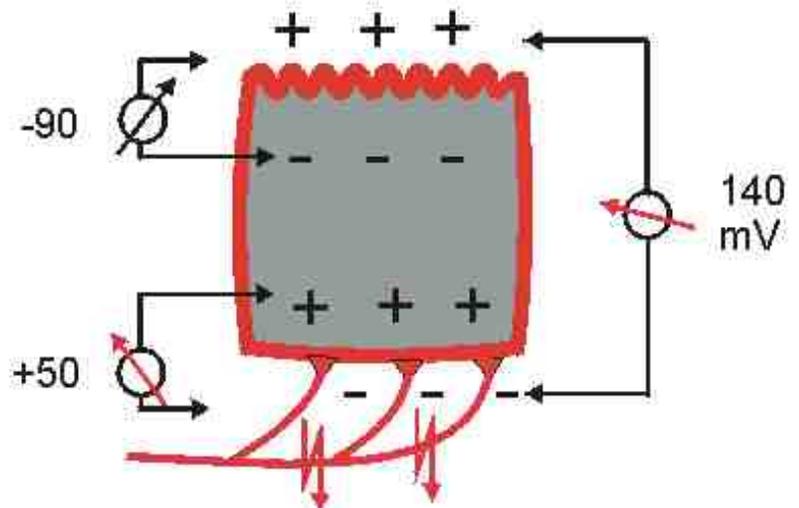
Die elektrischen Organe von Zitteraalen (*Electrophorus*), Zitterrochen (*Torpedo*) und Zitterwelsen (*Malapterurus*) bestehen aus umgewandelten Muskelfasern, sogenannten elektrischen Platten, die nicht mehr kontrahieren können. Die elektrischen Platten sind auf der einen Seite papillös auf der anderen Seite glatt. Auf der glatten Seite befinden sich Synapsen, die wie die [neuro-motorischen](#)

Endplatten aufgebaut sind. Sowohl die Dichte der Synapsen als auch die Dichte von nikotinischen Acetylcholinrezeptoren in der postsynaptischen Membran ist äußerst groß. Bei Aktivierung der Nervenfasern kommt es deshalb zu einem starken Kationeneinstrom in die glatte Zellseite.

Die Auswirkung dieses Einstroms auf die elektrischen Verhältnisse an der Platte sind rechts schematisch gezeigt. Im Ruhezustand (**blau**) ist das Membranpotential der Platte gleichmäßig negativ, und zwischen glatter und papillöser Seite der besteht keine Potentialdifferenz.



Bei Aktivierung der Nerven (**rot**) bewirkt der Kationeneinstrom durch die Acetylcholinrezeptoren eine starke Depolarisation der postsynaptischen Membran auf der glatten Seite der Platte. Die Polarität des Membranpotentials wird invertiert: Werte um +50 mV werden erreicht. Da das Potential auf der papillösen Seite unverändert negativ bleibt, ergibt sich eine Potentialdifferenz von 140 mV zwischen den beiden Seiten der Platte. Diese Spannung kann mit einer extrazellulären Meßelektrode (**ganz rechts**) registriert werden.

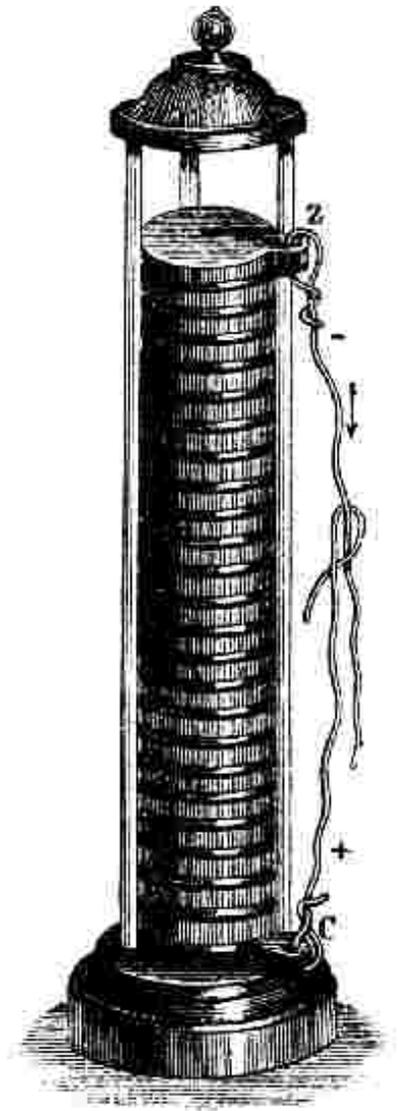
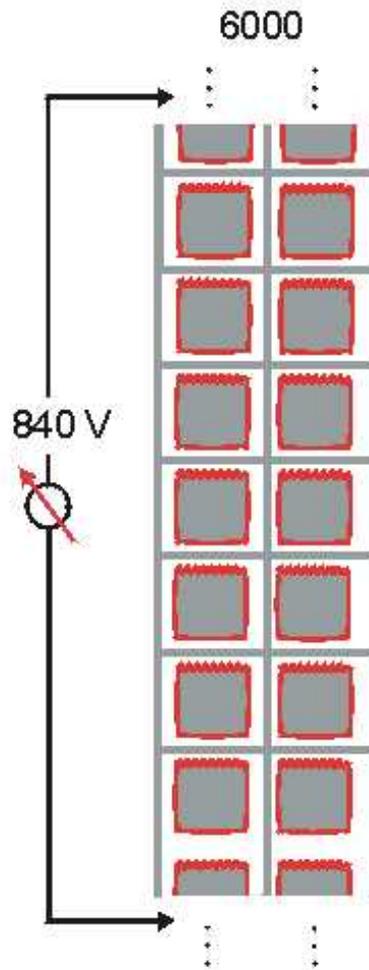


Mehrere Tausend dieser elektrischen Platten sind **seriell** in Säulen geordnet. Durch diese Serienschaltung summieren sich die Spannungsbeiträge der einzelnen Platten (jeweils 140 mV) zu hohen Spannungswerten, die fast 1000 V erreichen können. Die Stromstärke wird durch die Anzahl **parallel** angeordneter Säulen bestimmt und kann bis 50 A ansteigen.

Die rechte Abbildung ist eine Darstellung von Voltas Batterie: Auf einer Grundplatte aus Kupfer (C) ist eine Zinkplatte montiert, von der Kupferplatte durch eine mit Salzlösung getränkte Stoffschicht getrennt. Zwischen den beiden unterschiedlichen Metallplatten entsteht eine Spannung (Redox-Gleichgewicht). Kupfer-, Stoff- und Zinkschichten werden in der gleichen Abfolge aufeinandergeschichtet, so daß oben auf der Säule eine Zinkplatte (Z) liegt. Drei Glasstäbe halten die Säule zusammen. Die Gesamtspannung der seriell angeordneten Elemente der Batterie kann über die beiden Drähte abgegriffen werden.

Quelle: DeFelice, L.J. (1981) Introduction to membrane noise. Plenum Press, New York

Zitterwels (*Malapterurus electricus*):



Zyklusvorlesung "Sinnesphysiologie - vom Ionenkanal zum Verhalten"

START

Elektroortung - Orientierung mit elektrischen Feldern

Themen:

- [Elektrische Fische](#)
- [Passive Elektroortung](#)
- [Lorenzinische Ampullen](#)
- [Neuronale Reaktion auf Elektroreizung](#)
- [Aktive Elektroortung](#)
- [Elektrische Dialekte](#)
- [Die Entstehung elektrischer Bilder](#)
- [Tubulusorgane und Mormyromasten](#)
- [Elektrizität als Waffe](#)
- [Zusammenfassung](#)

Zusammenfassung

- Passive Elektroortung dient zum Aufspüren lebender Beute bei Haien und Rochen.
- Die Elektrorezeptoren sind in Ampullenorganen angeordnet und messen Gleichstromsignale.
- Aktive Elektroortung hilft bei der Orientierung bei kleinen Süßwasserfischen in Afrika (Mormyriformen) und Südamerika (Gymnotiformen)
- Ein elektrisches Organ produziert kontinuierlich elektrische Wechselfelder.
- Wechselstromrezeptoren (Tubulus-, Knollenorgane und Mormyromasten) registrieren die Wechselfelder.
- Objekte in der nahen Umgebung ändern den Feldlinienverlauf der selbsterzeugten Wechselfelder und erzeugen damit ein „elektrisches Bild“.
- „Zitter“-tiere erreichen durch massive Serienverschaltung von Elektrocyten Spannungsschläge bis 1 kV.