

# Aktive Elektroortung und Elektrokommunikation bei schwach elektrischen Fischen.

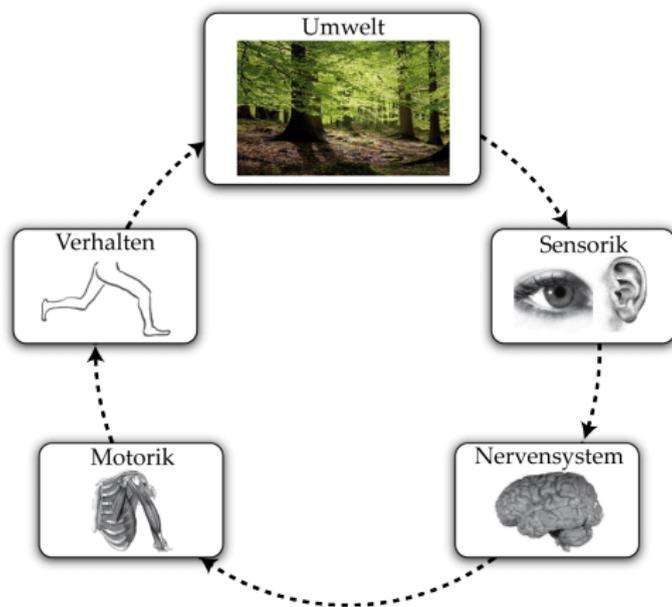
Jan Grewe

Neuroethology  
Institut für Neurobiologie  
Eberhard Karls Universität, Tübingen

EBERHARD KARLS  
UNIVERSITÄT  
TÜBINGEN



# Action perception cycle



- ▶ Unser Verhalten in einer Umwelt beeinflusst, wie wir die Umwelt wahrnehmen und wie die Information strukturiert ist.

# Elektrische Fische

Starke elektrische Entladungen.

- ▶ Kommt sowohl bei Süßwasserfischen als auch bei marinen Fischen vor.
- ▶ Entladungen können einige 100 Volt stark sein.
- ▶ Starke Entladungen zum Beutefang oder Verteidigung.



©opencage, CC BY-SA 3.0, Wikipedia



©Roberto Pillon, CC BY-SA 3.0, Wikipedia

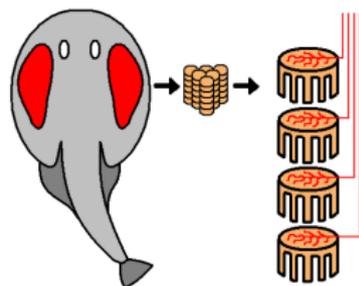
# Elektrische Fische

Starke elektrische Entladungen.

- ▶ Kommt sowohl bei Süßwasserfischen als auch bei marinen Fischen vor.
- ▶ Entladungen können einige 100 Volt stark sein.
- ▶ Starke Entladungen zum Beutefang oder Verteidigung.



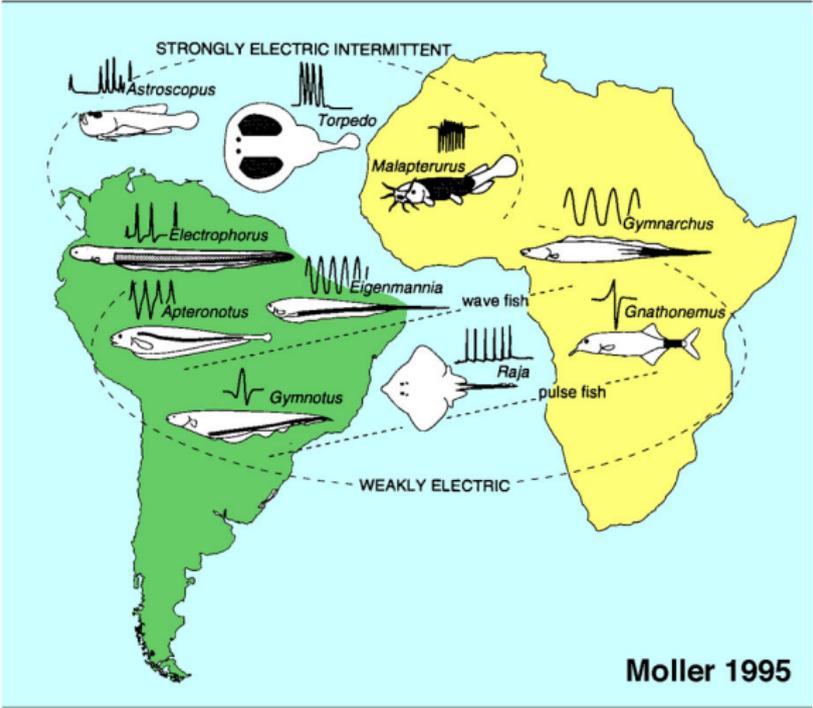
©CC BY-SA 3.0, Wikipedia



©Alexander Graetz, CC BY 2.5, Wikipedia

# Elektrische Fische

Die Fähigkeit elektrische Entladungen zu erzeugen ist weit verbreitet.



# Elektrische Fische

Bei Süßwasserfischen hat sich die Fähigkeit elektrische Felder wahrzunehmen unabhängig entwickelt.



©CC BY-SA 3.0, wikipedia.org



©, CC BY-SA 3.0, wikipedia.org

# Elektrische Fische

Bei Süßwasserfischen hat sich die Fähigkeit elektrische Felder wahrzunehmen unabhängig etwickelt.

Gymnotiformes -  
Neuwelt Messerfische



*Eigenmannia virescens*

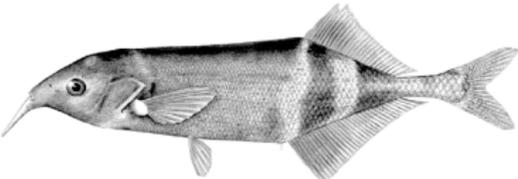


*Apteronotus albifrons*

Mormyridae -  
Nilhechte



*Gymnarchus niloticus*



*Gnathonemus petersii*

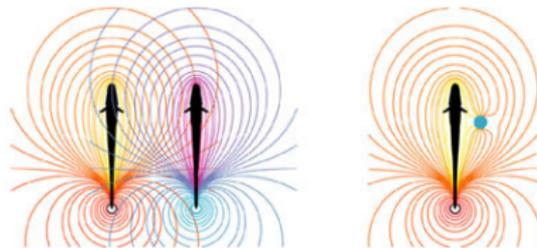
# Das elektrische Feld schwach-elektrischer Fische

Nützlich für Navigation, Beutedetektion und Kommunikation

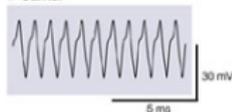


**b**  
Global signal: communication

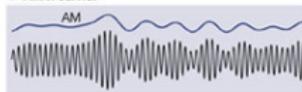
Local signal: prey



**c** Carrier



**d** AM x carrier

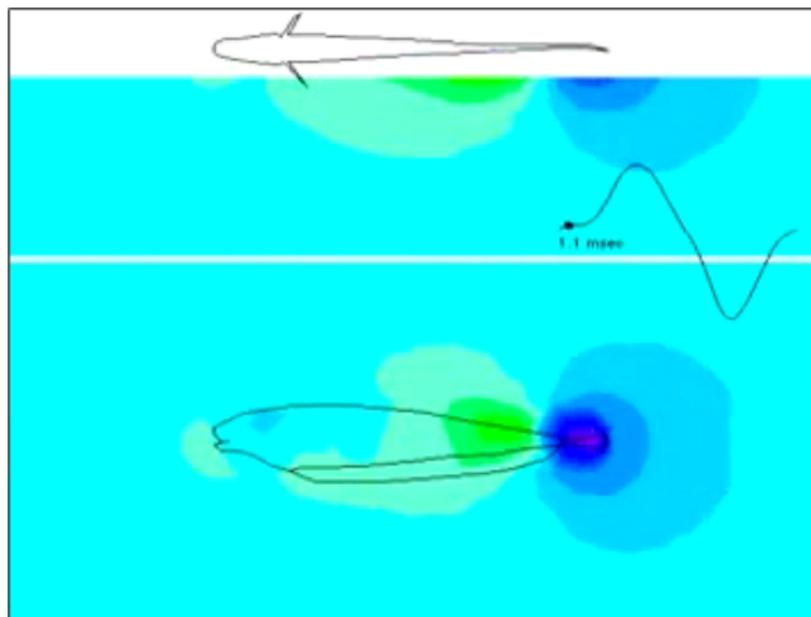


Nature Reviews | Neuroscience

Krahe & Gabbiani, 2008

# Das elektrische Feld schwach-elektrischer Fische

## Dynamische Wechselfelder



Assad et al., J. Exp. Biol., 1999

# Aktive Orientierung bei elektrischen Fischen

## Übersicht

1. Artspezifische Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung.
2. Integration visueller und elektrosensorischer Information bei der Objektunterscheidung.
3. Elektrokommunikation im natürlichen Habitat.
4. Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information.

# Aktive Orientierung bei elektrischen Fischen

## Übersicht

1. Artspezifische Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung.
2. Integration visueller und elektrosensorischer Information bei der Objektunterscheidung.
3. Elektrokommunikation im natürlichen Habitat.
4. Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information.

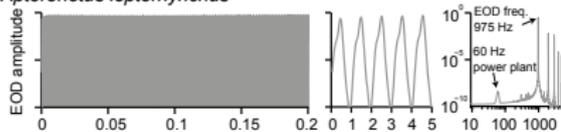
Oder, warum elektrische Fische cool sind.

# 1. Artspezifische Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

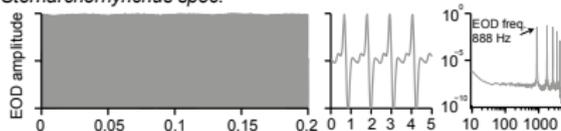
# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

Die Wellenform der elektrischen Entladung ein Fingerabdruck der Art

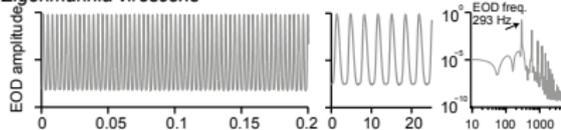
*Apteronotus leptorhynchus*



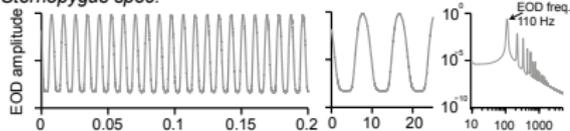
*Sternarchorhynchus spec.*



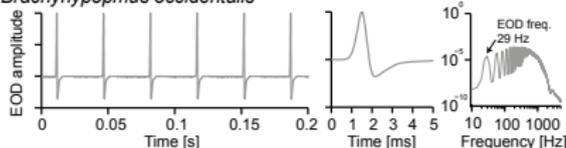
*Eigenmannia virescens*



*Sternopygus spec.*



*Brachyhyppomus occidentalis*



# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

Der Feind hört mit...

- ▶ Wenn man mit einer Taschenlampe im Dunkeln leuchtet, kann man etwas sehen,...

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

Der Feind hört mit...

- ▶ Wenn man mit einer Taschenlampe im Dunkeln leuchtet, kann man etwas sehen,...
- ▶ ... man wird aber auch von anderen gesehen.

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

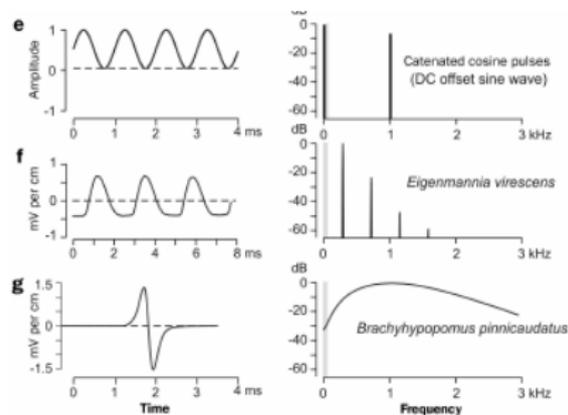
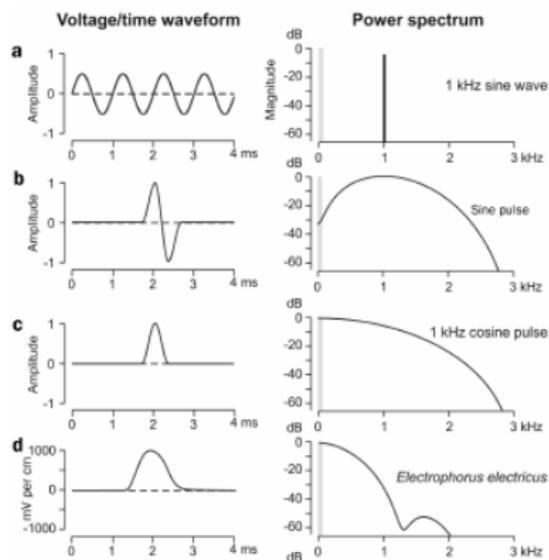
Der Feind hört mit...

- ▶ Wenn man mit einer Taschenlampe im Dunkeln leuchtet, kann man etwas sehen,...
- ▶ ... man wird aber auch von anderen gesehen.

Einige Räuber besitzen Elektrozeporen, mit denen sie niederfrequente elektrische Felder wahrnehmen können!

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

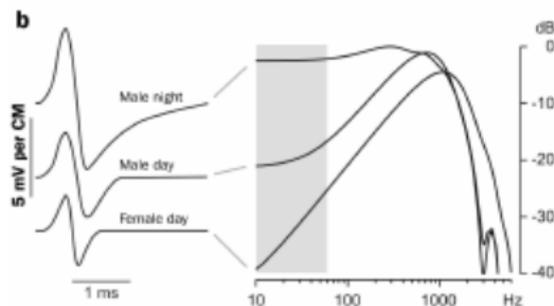
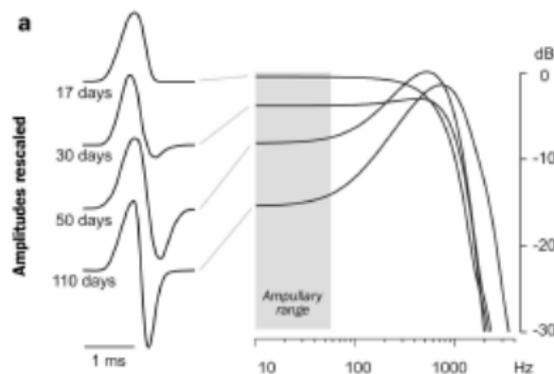
Der Feind hört mit...



Stoddard & Markham, Bioscience Mag., 2008

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

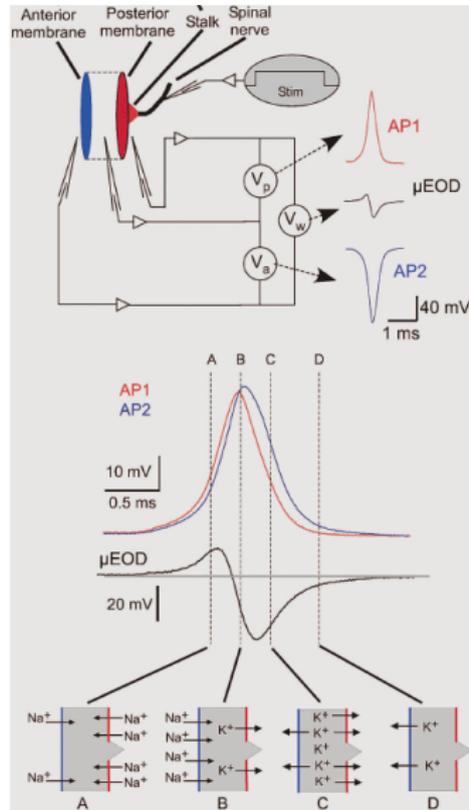
Der Feind hört mit...



Stoddard & Markham, Bioscience Mag., 2008

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

Der Feind hört mit...



Stoddard & Markham, Bioscience Mag., 2008

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

## Zusammenfassung

- ▶ Wellenformen des Feldes sind artspezifisch.
- ▶ Entladungsfrequenz Indiz für Geschlecht und/oder sozialen Rang.

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

## Zusammenfassung

- ▶ Wellenformen des Feldes sind artspezifisch.
- ▶ Entladungsfrequenz Indiz für Geschlecht und/oder sozialen Rang.
- ▶ Die Wellenform minimiert Leistungsdichte im Niederfrequenzbereich.
- ▶ Die feine Abstimmung der Ionenströme entwickelt sich in den ersten Lebensmonaten.

# Wellenformen und das Risiko aktiver Orientierung

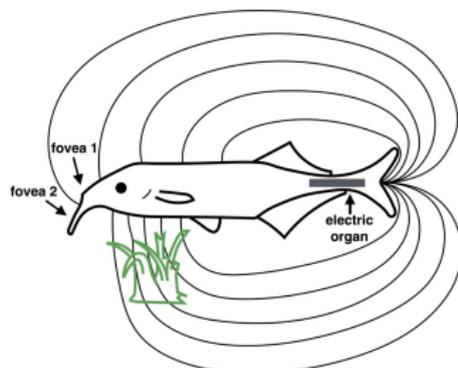
## Zusammenfassung

- ▶ Wellenformen des Feldes sind artspezifisch.
- ▶ Entladungsfrequenz Indiz für Geschlecht und/oder sozialen Rang.
- ▶ Die Wellenform minimiert Leistungsdichte im Niederfrequenzbereich.
- ▶ Die feine Abstimmung der Ionenströme entwickelt sich in den ersten Lebensmonaten.
- ▶ Das Elektrische Organ besitzt spezialisierte Ionenkanäle (*McAnnely & Zakon, J. Neurosci., 2000*).
- ▶ Evolution dieser erst durch Genduplikation möglich geworden (*Zakon et al., PNAS, 2006*).

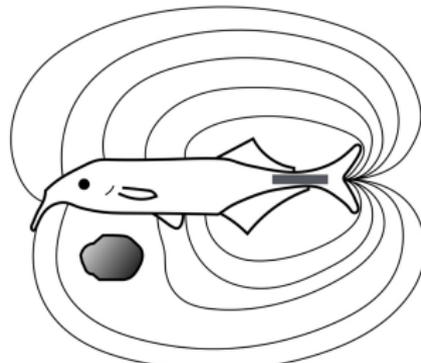
## 2. Integration visueller und elektrosensorischer Information bei der Objektdetektion

# Integration visueller und elektrosensorischer Information

## Verzerrungen durch belebte und nicht-belebte Objekte



Conductor

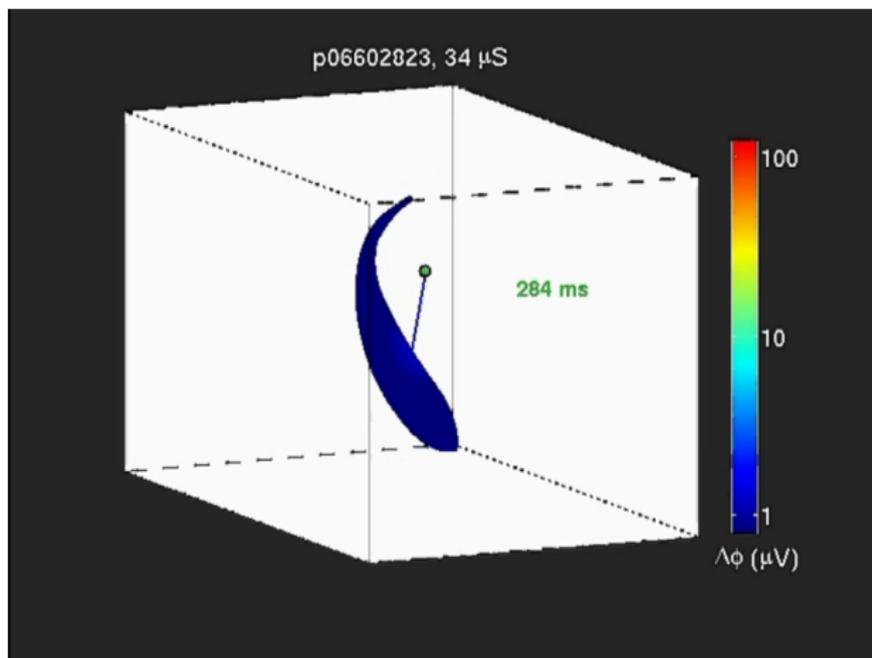


Non-conductor

Lewicki et al., Front. Psychology, 2014

# Integration visueller und elektrosensorischer Information

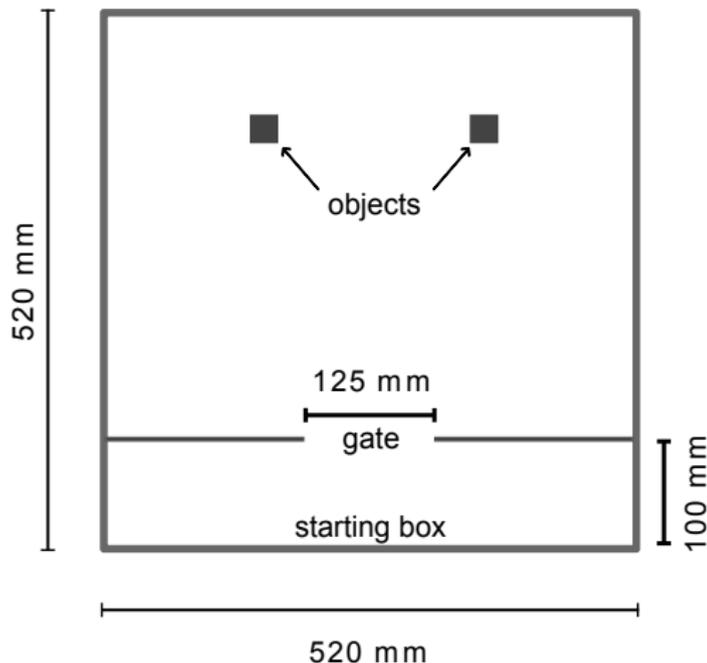
Verzerrungen durch belebte und nicht-belebte Objekte



# Integration visueller und elektrosensorischer Information

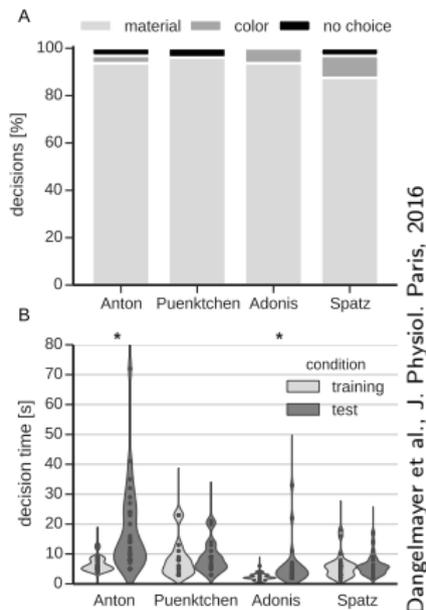
## Schwach-elektrische Fische bevorzugen elektrosensorische Information

- ▶ In Konditionierungsexperimenten, wurde auf die Gewichtung von elektrosensorischer und visueller Information getestet.



# Integration visueller und elektrosensorischer Information

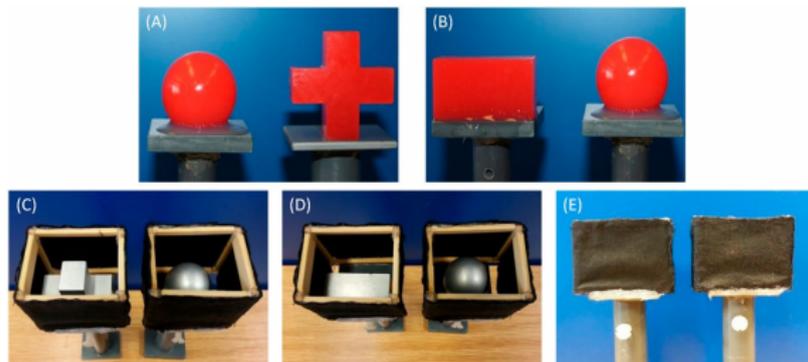
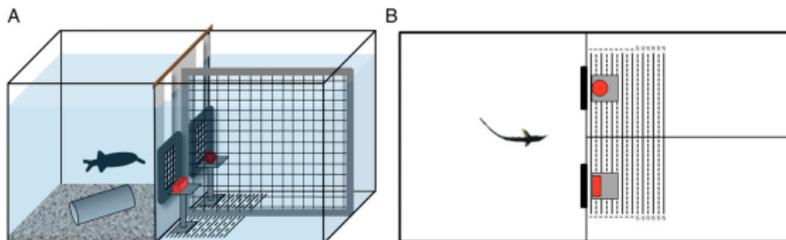
Konditionierung auf Kombinationen von elektrischem und visuellem Eindruck



- ▶ Die Tiere lernen die Kombination aus visuellem und elektrosensorischem Reiz.
- ▶ Im Konfliktfall entscheiden sie sich für die elektrosensorische Information.

# Integration visueller und elektrosensorischer Information

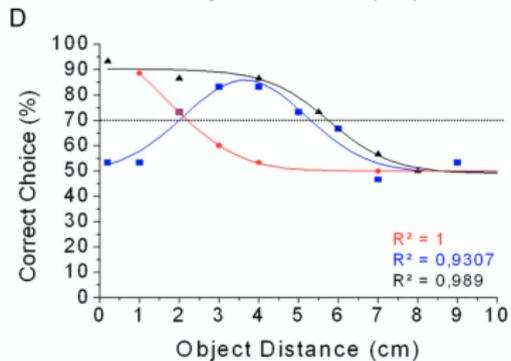
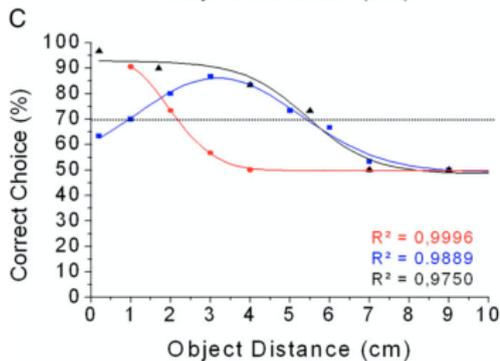
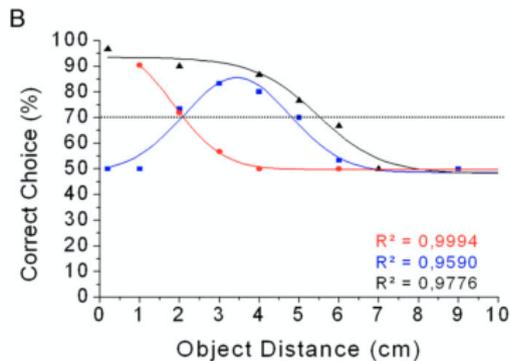
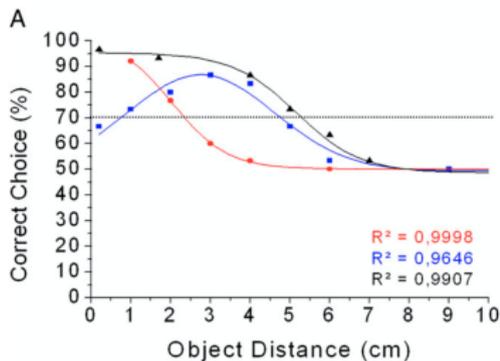
## Dynamische Gewichtung von visueller und elektrosensorischer Information



Schumacher et al., PNAS, 2016

# Integration visueller und elektrosensorischer Information

## Dynamische Gewichtung von visueller und elektrosensorischer Information



Schumacher et al., PNAS, 2016

# Integration visueller und elektrosensorischer Information

- ▶ Elektrische Fische können auf Objekte trainiert werden, die Kombinationen von Merkmalen aufweisen.
- ▶ Im Zweifel wird der elektrische Sinn bevorzugt, die unterlegene Modalität wird ebenfalls gelernt.
- ▶ Es findet ein Informationstransfer über die Modalitäten statt.
- ▶ Die Gewichtung von visueller und elektrosensorischer Information erfolgt dynamisch.

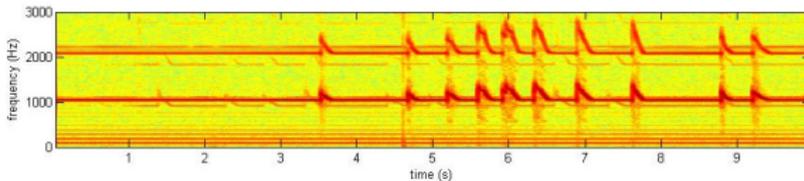
### 3. Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

## Interaktionen zwischen Fischen



© Rüdiger Krahe, Humboldt Universität zu Berlin



# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

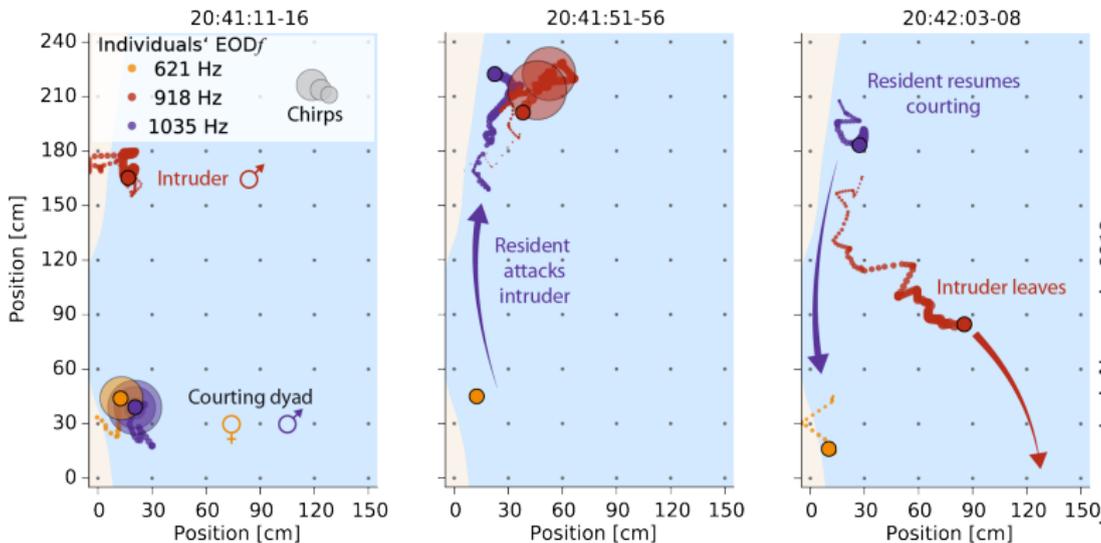
## Interaktionen zwischen Fischen



Henninger et al., J Neurosci., 2018, Henninger et al., J. Exp. Biol, 2020

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

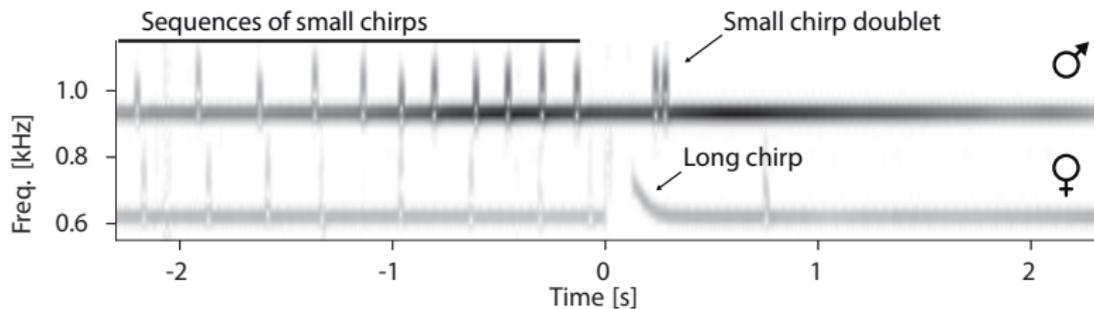
## Interaktionen zwischen Feldern und Fischen



Henninger et al., J. Neurosci., 2018

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

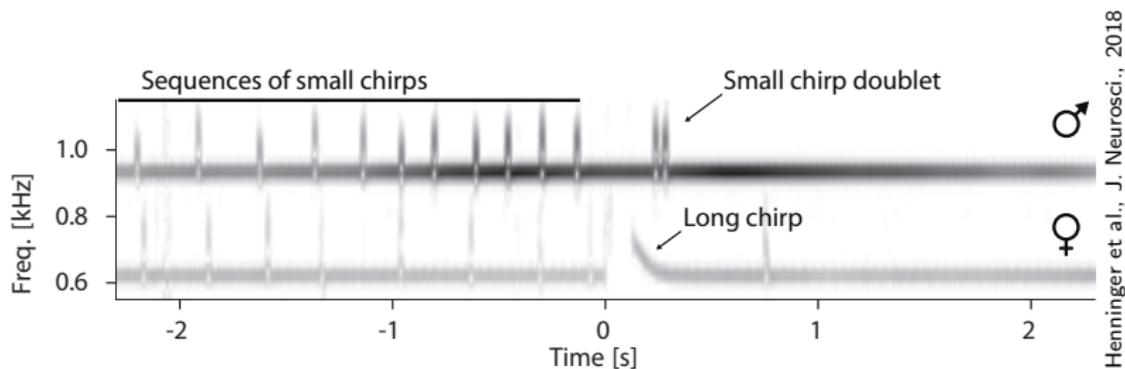
## Stereotype zwischengeschlechtliche Interaktionen



Henninger et al., J. Neurosci., 2018

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

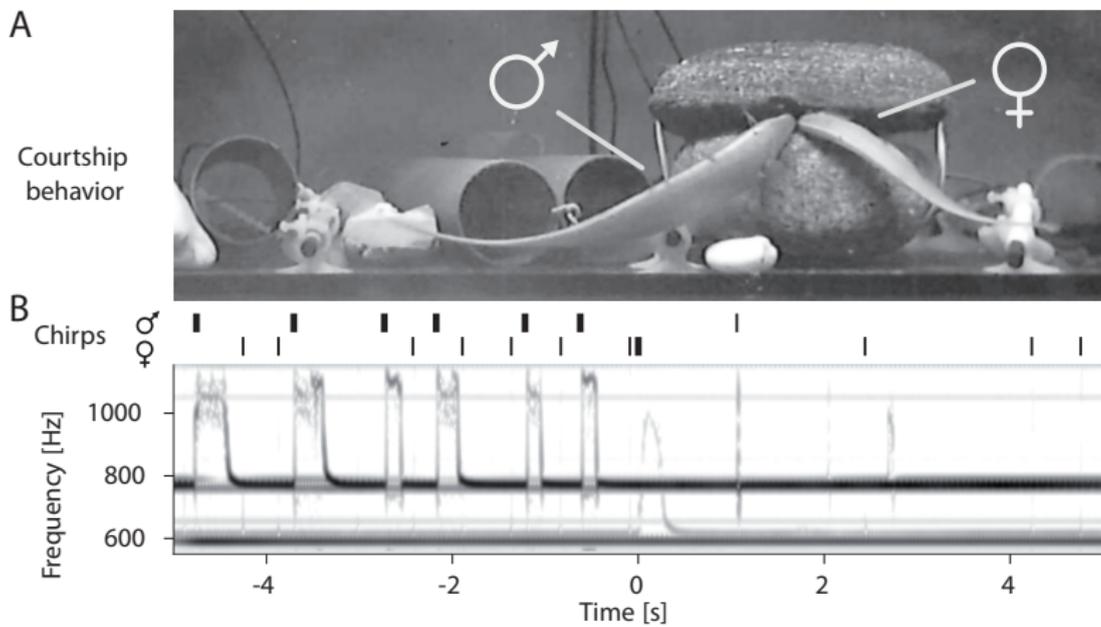
## Stereotype zwischengeschlechtliche Interaktionen



- ▶ Episoden von Kommunikationssignalen (“chirps”) beider Kommunikationspartner.
- ▶ Das Weibchen gibt einen speziellen “long chirp” ab, der die Sequenz beendet.
- ▶ Die Interaktion erfolgt zeitlich hoch präzise.

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

## Stereotype zwischengeschlechtliche Interaktionen



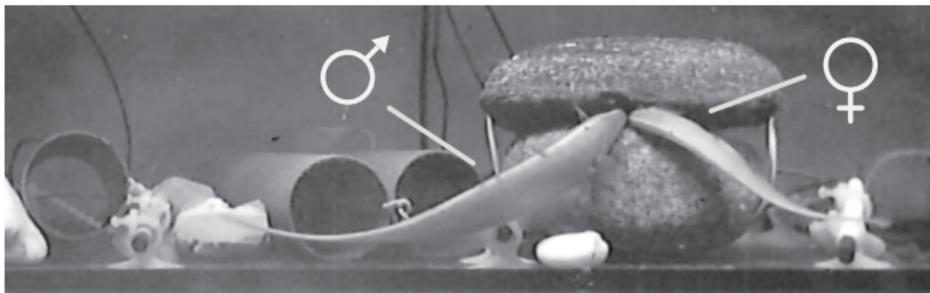
Henninger et al., J. Neurosci., 2018

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

## Stereotype zwischengeschlechtliche Interaktionen

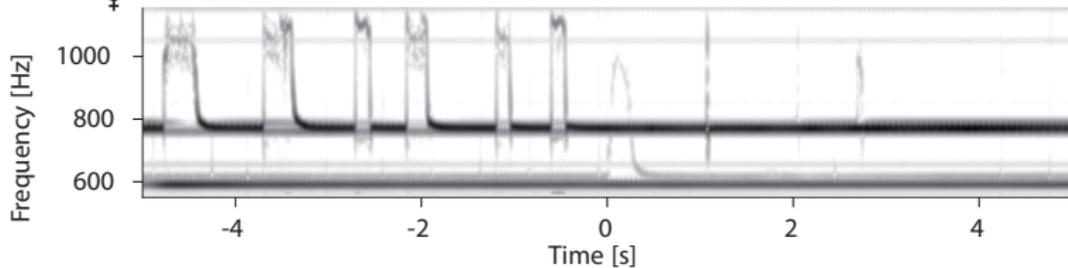
A

Courtship  
behavior



B

Chirps  
♂♂



Henninger et al., J. Neurosci., 2018

- ▶ Der “long chirp” synchronisiert die Eiablage und die externe Befruchtung durch das Männchen.

# Elektrokommunikation im natürlichen Habitat

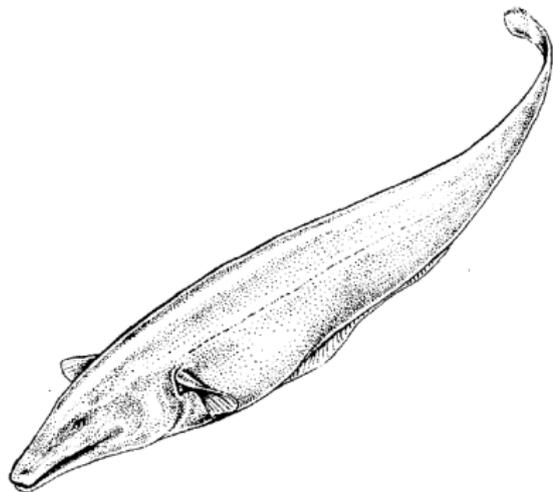
## Interaktionen zwischen Fischen

- ▶ Mit dem Elektrodengitter können wir Interaktionen in natürlicher Umgebung untersuchen.
- ▶ Das Balzverhalten besteht aus stereotypen und sehr präzise getimten Interaktionen.
- ▶ Der “long chirp” synchronisiert Eiablage und externe Befruchtung.

## 4. Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

## P-Typ Elektrozeporen

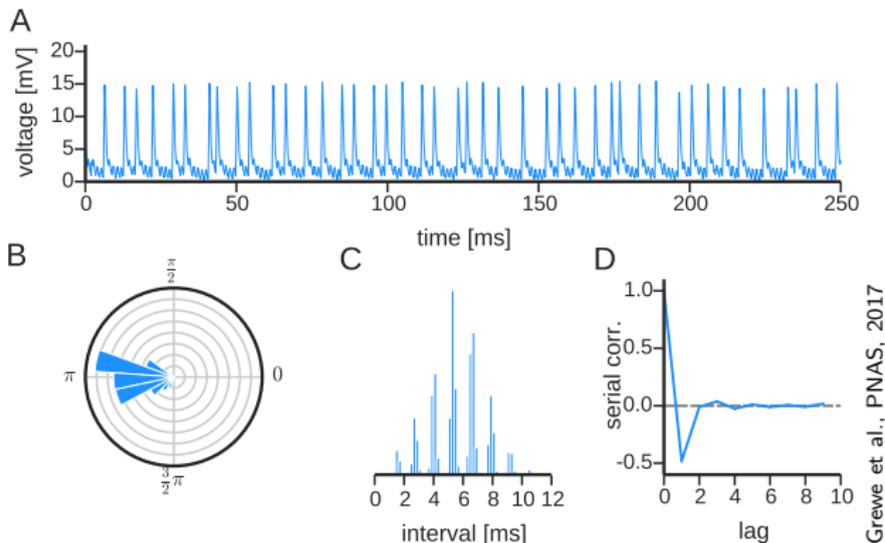


Hagedorn & Heiligenberg, 1985

- ▶ P-Typ Elektrozeporen sind über die gesamte Körperoberfläche verteilt.

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

## P-Typ Elektrozeporen

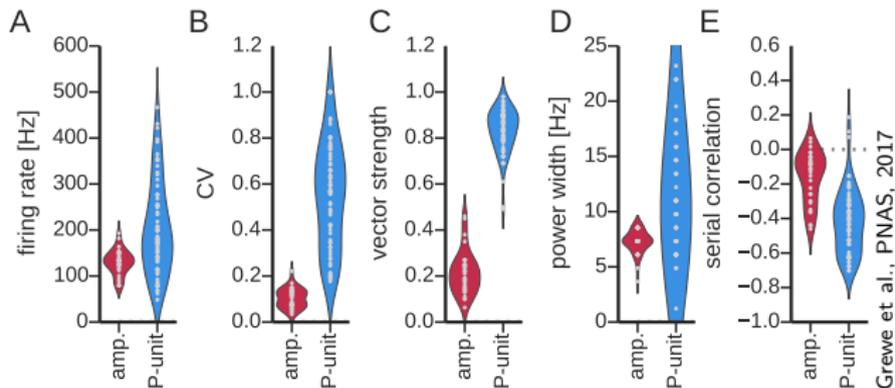


Grewe et al., PNAS, 2017

- ▶ Sie sind spontan aktive und werden durch das eigene Feld stimuliert.

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

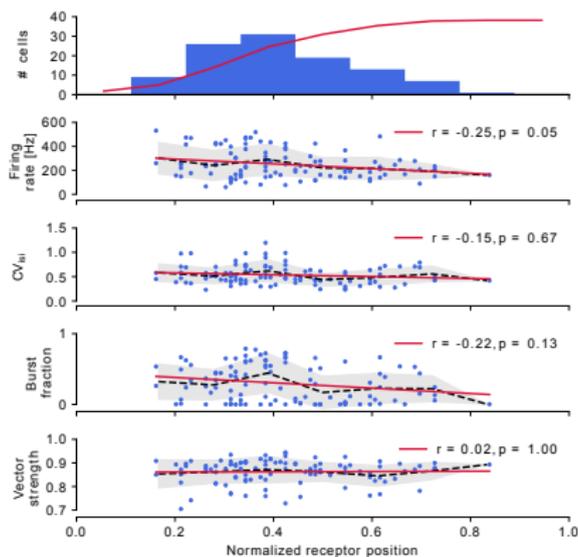
## P-Typ Elektrozeporen



- ▶ Die Eigenschaften der P-units sind sehr heterogen.

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

## P-Typ Elektrozepthoren

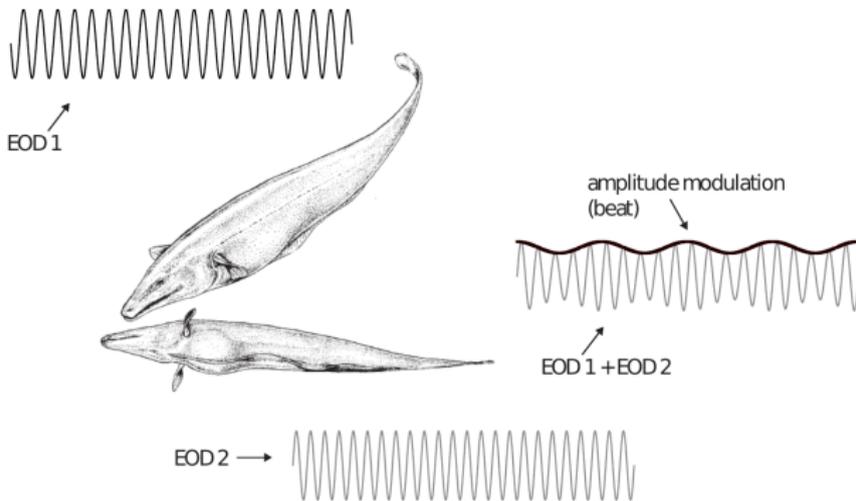


Hladnik et al., in preparation

- Eigenschaften der Neurone korrelieren nicht mit dem Ort auf dem Körper.

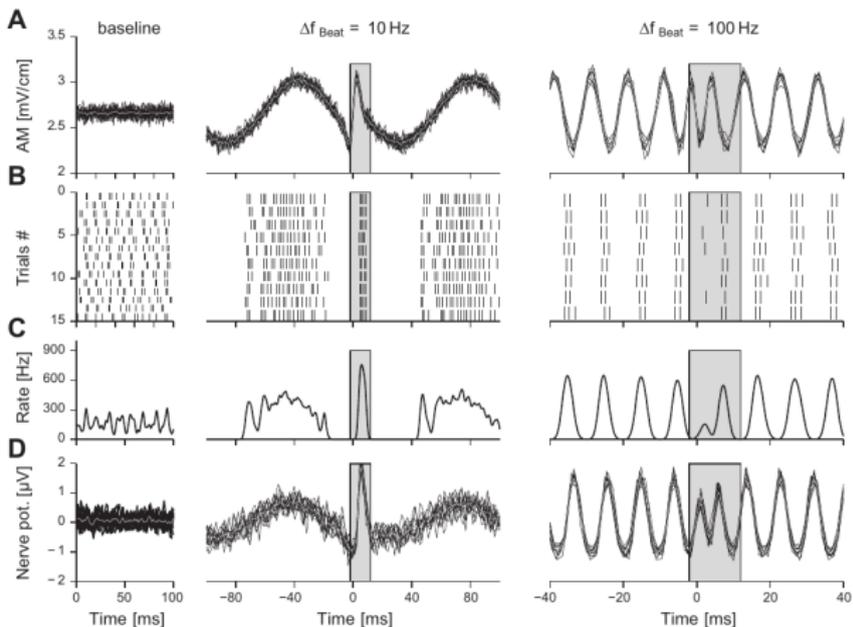
# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

Interaktionen zwischen Fischen führt zu Modulationen des eigenen Feldes.



# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

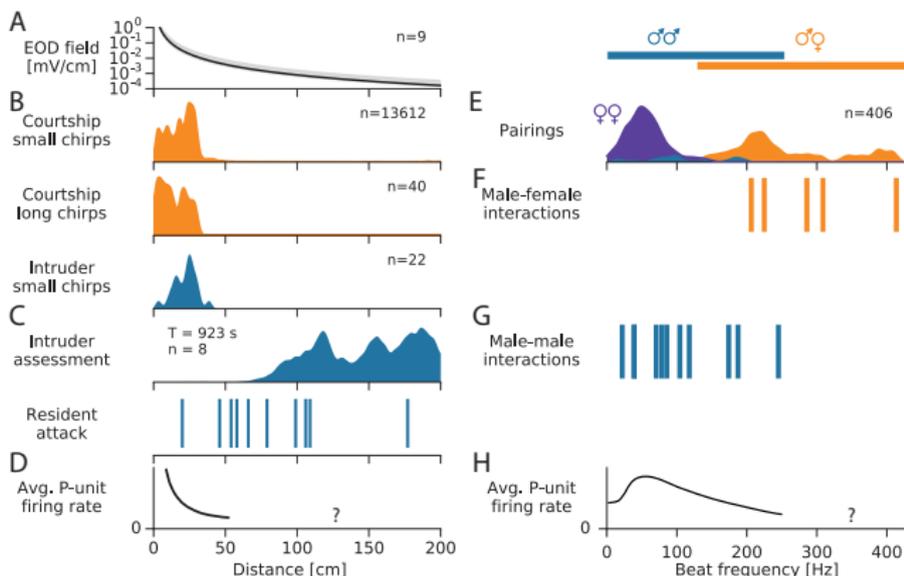
P-unit kodieren die Modulation des eigenen Feldes



Walz et al., J. Neurophysiol., 2014

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

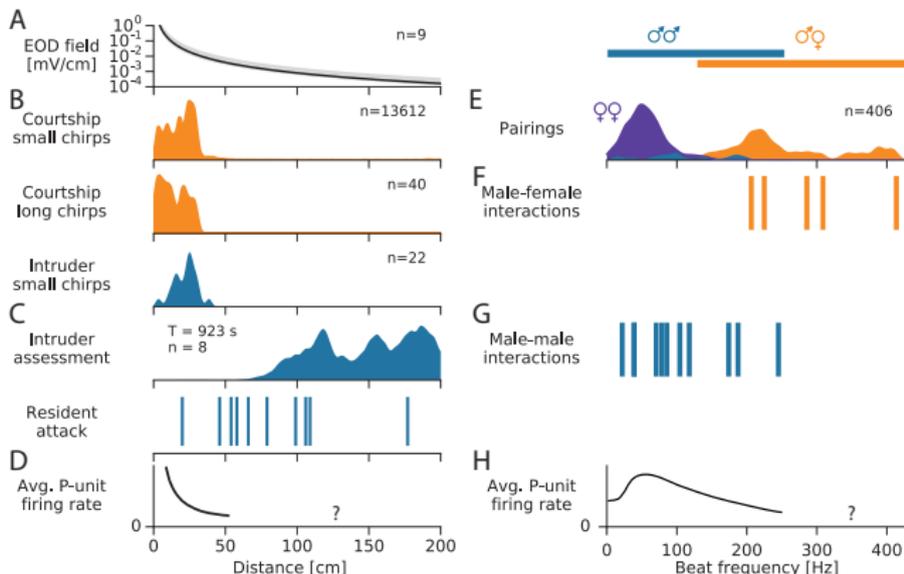
Wie werden natürliche Kommunikationssignale kodiert?



Henninger et al., J. Neurosci., 2018

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

Wie werden natürliche Kommunikationssignale kodiert?

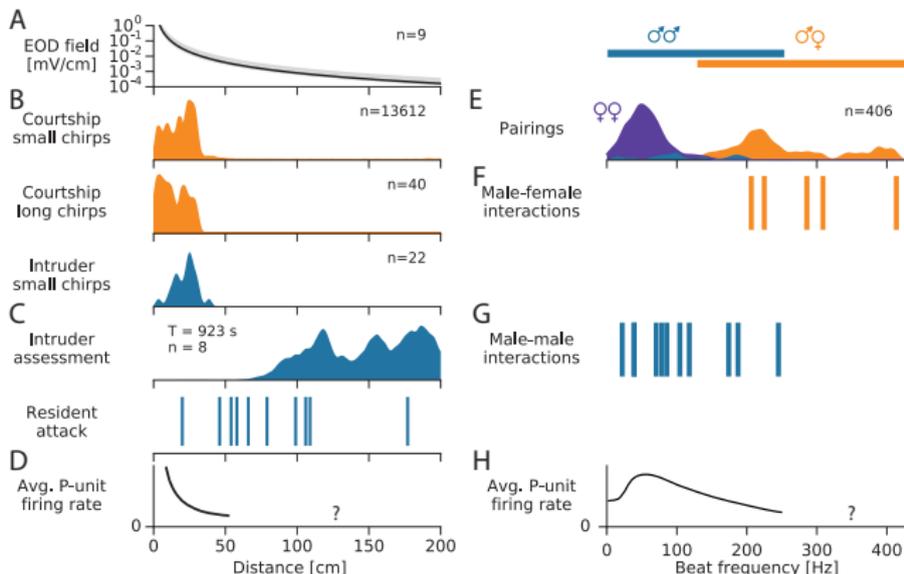


Henninger et al., J. Neurosci., 2018

- ▶ Eindringende ♂ werden in Entfernungen detektiert, in denen die Signale **sehr** schwach sind.

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

Wie werden natürliche Kommunikationssignale kodiert?



Henninger et al., J. Neurosci., 2018

- ▶ Eindringende ♂ werden in Entfernungen detektiert, in denen die Signale **sehr** schwach sind.
- ▶ ♂ ♀ Interaktionen finden in Kontexten statt, die bislang nicht untersucht sind.

# Neuronale Kodierung elektrosensorischer Information

## Zusammenfassung

- ▶ Das Nervensystem schwach elektrischer Fische ist mit elektrophysiologischen Methoden gut zugänglich.
- ▶ P-Typ Elektrozeporen zeigen eine große Heterogenität.
- ▶ Diese Eigenschaften macht das System aus “computational” Sicht sehr interessant.
- ▶ Wie Kommunikationssignale im natürlichen Kontext kodiert werden ist bislang unbekannt.

# Schlussfolgerungen

# Aktive Orientierung in elektrischen Fischen

## Elektrische Fische ...

- ▶ erfahren ihre Umgebung mit dem aktiven elektrischen Sinn.
- ▶ die Evolution versucht das aktiv erzeugte Feld zu verbergen.
- ▶ lassen sich konditionieren und zeigen Verhaltensleistungen, die man höheren Wirbeltieren zuschreibt.
- ▶ lösen neuronale Probleme in Bereichen, die bislang weitgehend unerforscht und "computational" spannend sind.



[neuroetho.uni-tuebingen.de](http://neuroetho.uni-tuebingen.de)