

## **Das periphere Nervensystem in der Haut der Schweinswale *Phocoena phocoena* L. 1758 von Günther Behrmann**

### **Protokolle und Nachträge zu den Publikationen**

Für die Dokumentation des Nervensystems der Wale brauchte ich viel Zeit, weil ich nur gestrandete Wale verarbeitete. Diese Tatsache erschwerte eine Planung der Forschung. Große Schwierigkeiten bereitet auch die schnell verlaufende Autolyse. Sie zerstört zuerst die Nervensysteme.

Die Schweinswale leben in küstennahen Gewässern, wo die Sicht meistens nicht gut ist. Mit den Augen kann man da nicht viel sehen und mit den Ohren hören können die Wale nur, wenn der von Menschen erzeugte Krach es erlaubt.

Die Schweinswale orientieren sich hauptsächlich mit den in der Haut liegenden peripheren Nerven, und davon besitzen die Wale mehr als alle anderen Säugetiere.

Weil die Haut sehr dick ist und viel Fett enthält, sind die Nervenendkörperchen schwer zu finden. Deshalb habe ich meine Untersuchungen mit der Zunge der Schweinswale begonnen, die keine Fettschicht hat. Der Rand der Zunge ist mit Papillen besetzt, zu denen ich in der Literatur keine Angaben fand.

In einem der ersten histologischen Schnitte durch eine Papille fand ich einen Hinweis auf elektrische Rezeptoren. Das erinnerte mich an meine Schulzeit. Ein guter Lehrer führte uns ein selbst gebasteltes Modell vor, das zeigte, warum ihm oder uns manchmal die Haare zu Berge stehen. Es ging ihm also darum, uns die Kraft der elektrischen Aufladungen von Gegenständen zu erklären.

Drei Kügelchen aus Holundermark hatte er mit kurzen Fäden an einen hölzernen Zahnstocher gebunden. Dann nahm er seinen Hornkamm, rieb ihn am Ärmel und führte den nun aufgeladenen Kamm zu den Kügelchen, die sich gleich voneinander abstießen und sich weit vom Holz entfernten.

50 Jahre später sah ich bei meinem Schnitt durch eine Zungenpapille ein Ampullenorgan, das fast so aussah, wie das Modell meines Lehrers.

## **Inhaltsverzeichnis**

Rezeptoren, die elektrische Wellen empfangen können	3
Die elektromagnetischen Rezeptoren der Schweinswale	5
Elektromagnetische Felder im Rautenhirn des Schweinswals	8
Grandryische Nervenendkörperchen	9
Lamellierte Druckrezeptoren	10
Oberflächensensibilität der Haut	13
Primäre Sinneszellen	18
Literaturverzeichnis	19

### Rezeptoren, die elektrische Wellen empfangen können

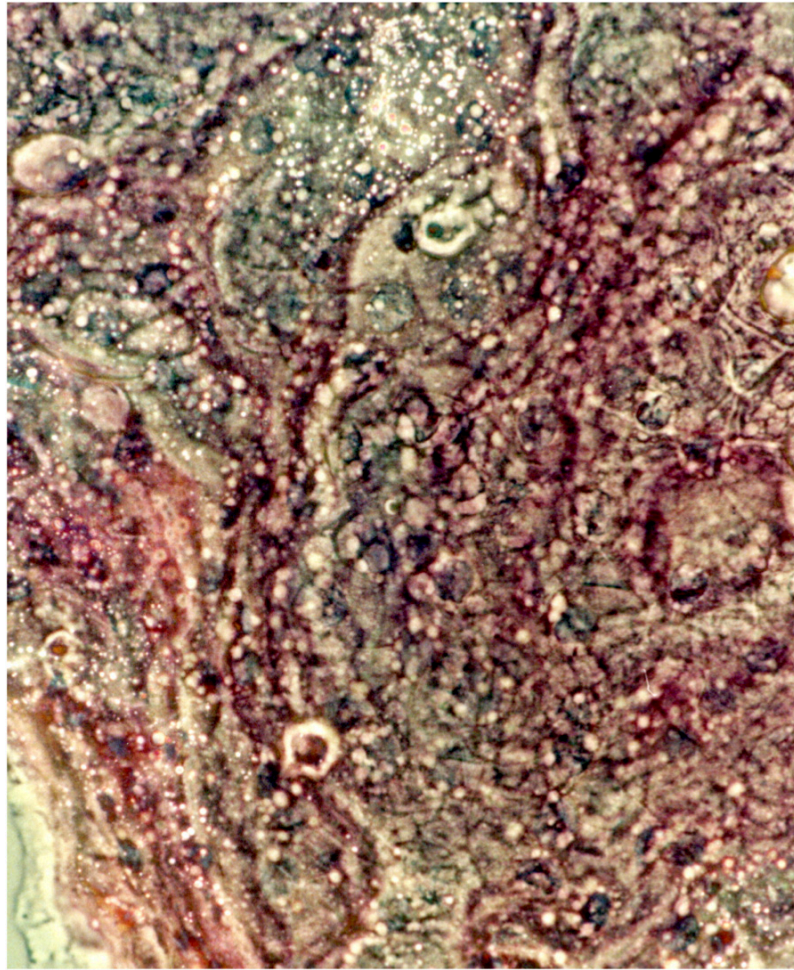


Abb. 1. Schnitt durch eine Zungenpapille eines Schweinswals  
Oben in der Mitte liegt ein Ampullenorgan. Der „Stiel“, ein dünner Nerv,  
der etwas über die Oberfläche hinaus ragt, ist leider nicht zu sehen.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 400 x

Foto: G. Behrmann

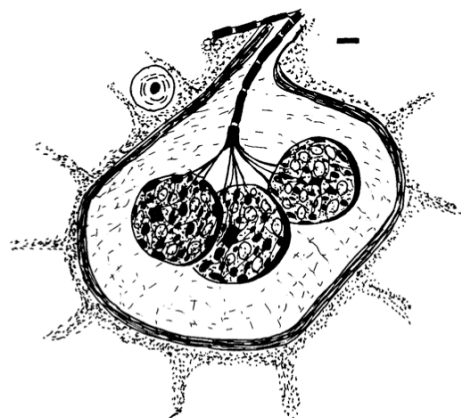
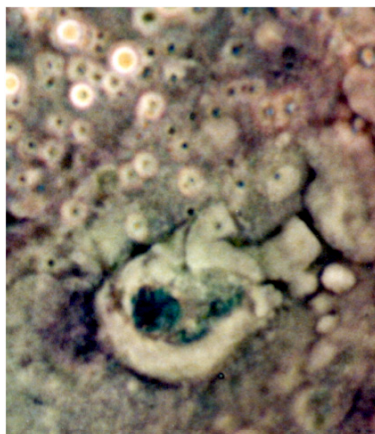


Abb. 2. Dieses ampullenartige Nervenendkörperchen wurde im  
Zusammenhang mit den elektrischen Organen bei Mormyridfischen  
beschrieben, Szabo, 1974.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x

Foto und Zeichnung: G. Behrmann

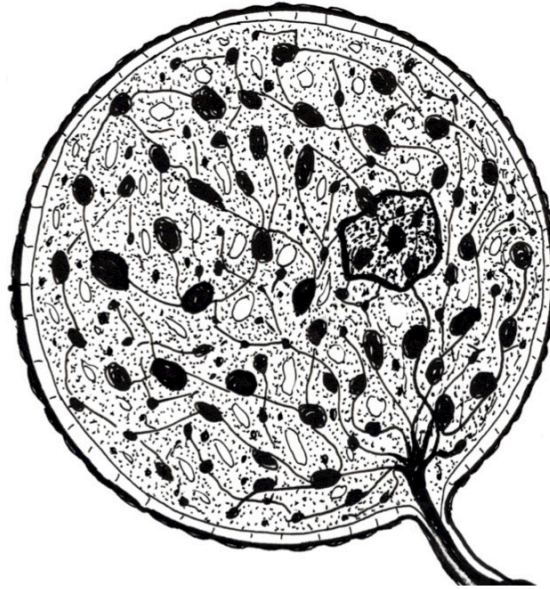


Abb. 3: In der Zeichnung wird festgehalten, dass die kleinen Nervenzellen keine Dendriten zur Haut des Nervenendkörperchens haben. Es sind also keine Druckrezeptoren.

*Zeichnung: G. Behrmann*

Sinnvoll ist das, denn es gibt Meeresgebiete, in denen Wale leben, die keine elektrischen Schläge vertragen, und Fische schwimmen, die sich mit elektrischen Schlägen verteidigen.

Von diesen, etwas ärmer ausgerüsteten ampullenartigen Rezeptoren liegen viele in der Zungenspitze der Schweinswale.

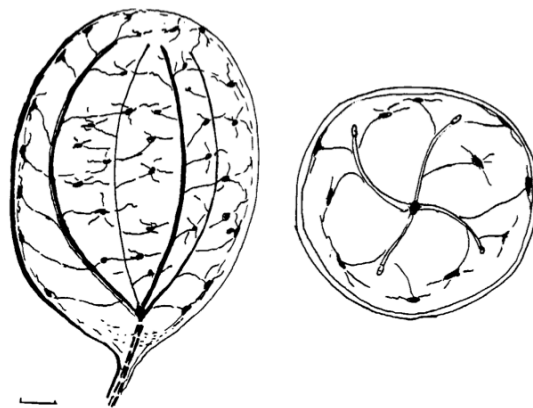


Abb. 4: Drei bis vier solcher 10  $\mu\text{m}$  großen Nervenkörperchen sind in einer um die 15  $\mu\text{m}$  großen Ampulle vereint. Die Dendriten der unmyelierten Preterminalen taktieren die Zellwand, sind also Tastkörperchen.

*Zeichnung: G. Behrmann*

## Die elektromagnetischen Rezeptoren der Schweinswale

Ob Wale bei ihren Wanderungen sich von erdmagnetischen Wellen leiten lassen, wird bis heute diskutiert.

Es war Prof. Dr. Klinowska, die 1985/1986 über häufige Wal-Strandungen an den Küsten der Irischen See berichtete. Diese Strandungen fanden häufig statt, wenn die dort manövrierenden U-Boote auch Probleme mit dem Erdmagnetismus hatten.

Nachdem mir gezeigt wurde, wie die Geräte für Messungen erdmagnetischer Wellen aussehen und funktionieren, suchte ich bei meinen Arbeiten mit der Walhaut auch nach möglichen erdmagnetischen Rezeptoren.

In der Zungenspitze und in der Epidermis der Unterlippe fand ich viele freie endende Nerven, die eng beieinander lagen und über die Haut hinausragten. Die aufspießenden Spitzen der Nervenbündel waren von einer geleeartigen Schicht bedeckt. Dieses Ampullenorgan ist vergleichbar mit dem Seitenlinien-Organ der Fische.

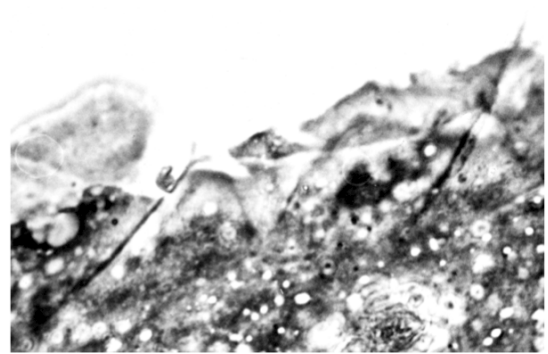
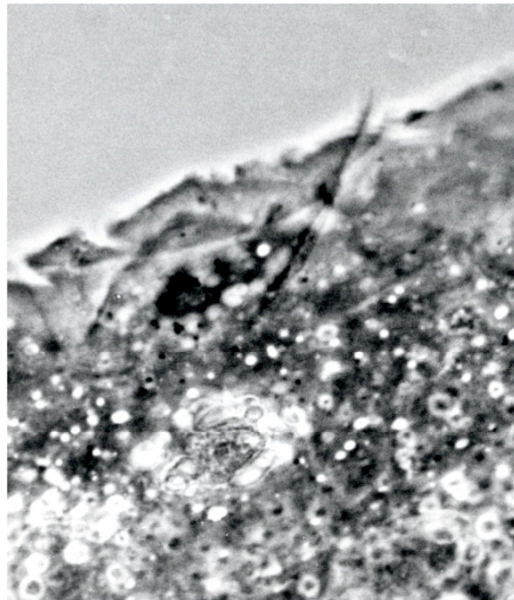


Abb. 5 und 6: Das Seitenlinienorgan der Schweinswale. 15 bis 20  $\mu\text{m}$  unter der Oberfläche der Haut liegt das Ampullenorgan, das aus 6 bis 7 Ampullen und einem Nervenkörper besteht. Aus dem Ampullenorgan ziehen in einem Kanal Nervenbündel zur Oberfläche und zerspleißen sich. Die über die Haut reichende Kuppel des Nervenbündels wird von einer Geleeschicht geschützt.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x



Abb. 7 Ampullen und Nervenendkörperchen

Fotos: G. Behrmann

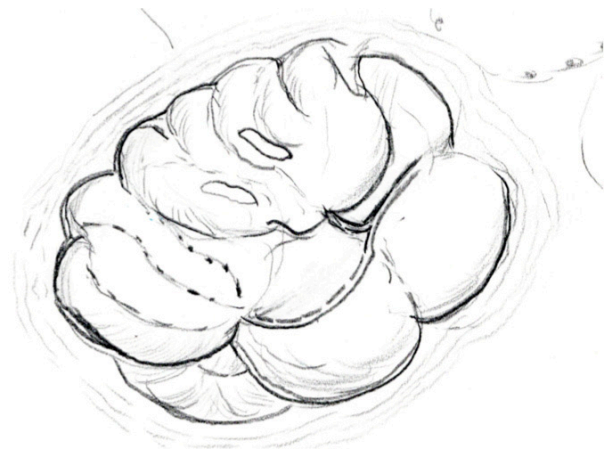
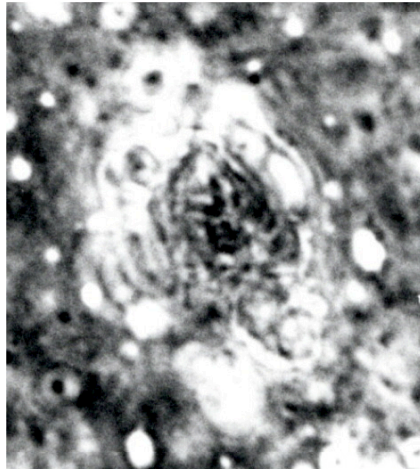


Abb. 8: Foto und Zeichnung zeigen zwei Ampullenformen. In der Mitte liegt eine sehr nervenreiche Ampulle (EC), vergleichbar mit der Ampulle von der Abbildung 1. In den marginal liegenden Ampullen liegen unmyelierte Preterminals (S) (Szabo 1974). Die von allen Ampullen ausgehenden Nerven ziehen gemeinsam durch den Kanal zur Oberfläche.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x

Foto und Zeichnung: G. Behrmann

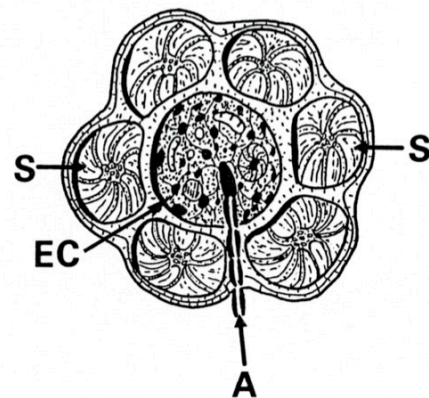
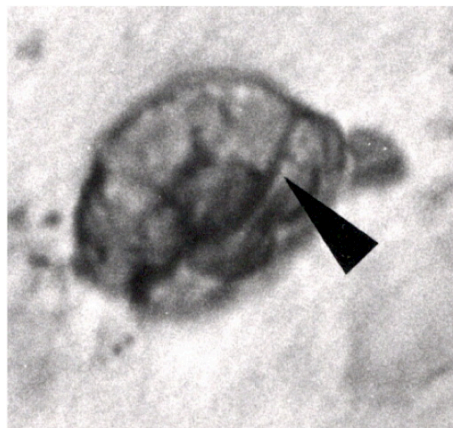


Abb. 9: Vom kompakten Ampullenorgan zieht ventral ein Axon (A). Die marginal liegenden Ampullen mit unmyelierten Preterminals (S) wurden von Szabo (1974) den Seitenlinienorganen zugeordnet.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x

Foto und Zeichnung: G. Behrmann

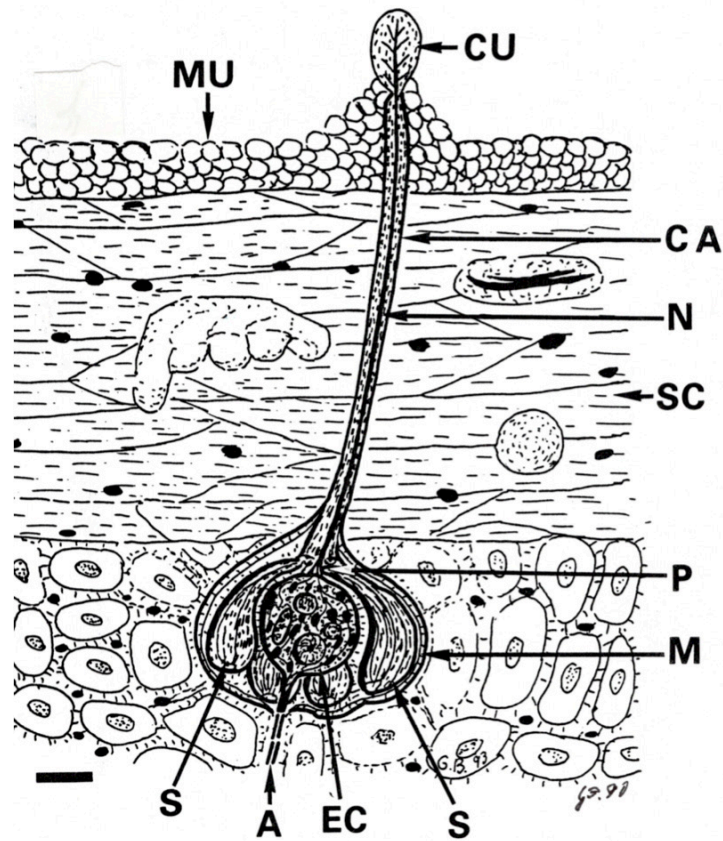


Abb: 10: Elektromagnetisches Ampullenorgan, Behrmann, 1990  
A Axon, CA Nervenkanal, CU Kuppel, EC Elektrorezeptor,  
M Membran, MU Schleimschutz, N Nervenbündel, P Poren,  
S Ampullen, SC parakeraotische Haut.

Maßstab: 10 µm

Zeichnung: G. Behrmann

## Elektromagnetische Felder im Rautenhirn des Schweinswals

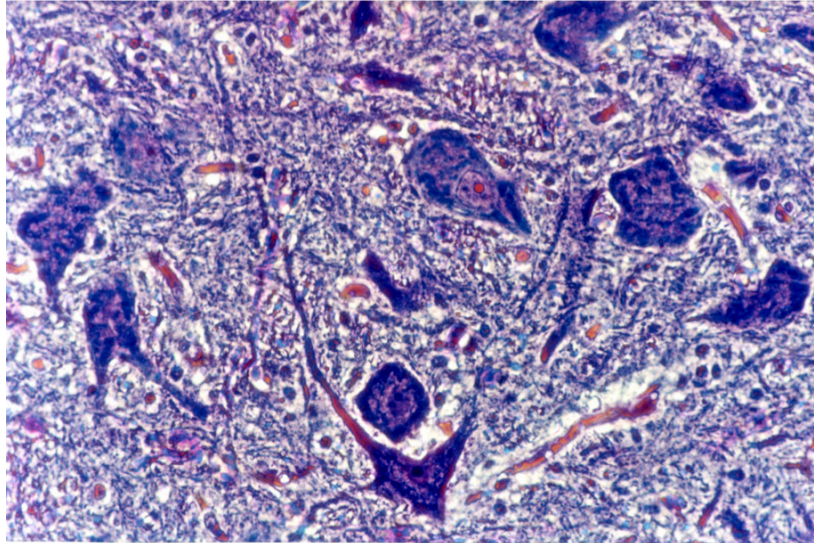


Abb. 11: Die Neuronen im elektrischen Feld des Schweinswals

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x

Foto: G. Behrmann

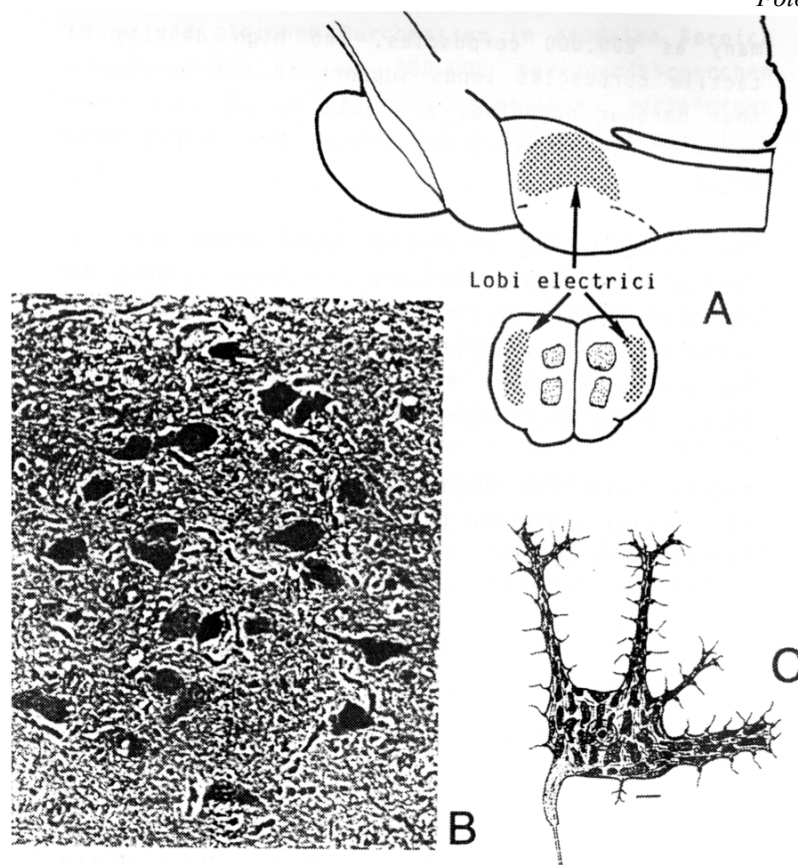


Abb. 12: Im Rautenhirn der Schweinswale liegen die größten Neuronen des zentralen Nervensystems

A schematisierter Längs- und Querschnitt durch das Rautenhirn

B Neuronen im elektromagnetischen Feld, Vergr. 400 x

C Modell des größten Neurons, Maßstab 10  $\mu$ m

Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Foto und Zeichnungen: G. Behrmann



## Grandryische Nervenendkörperchen

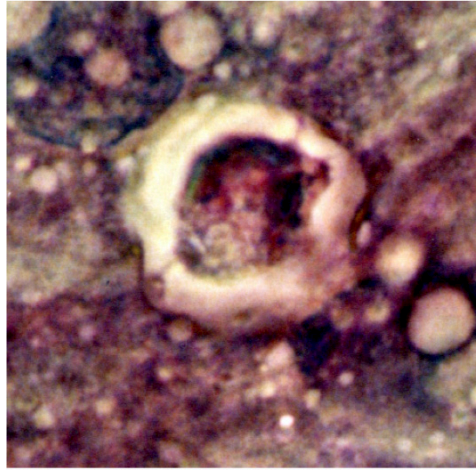


Abb. 13

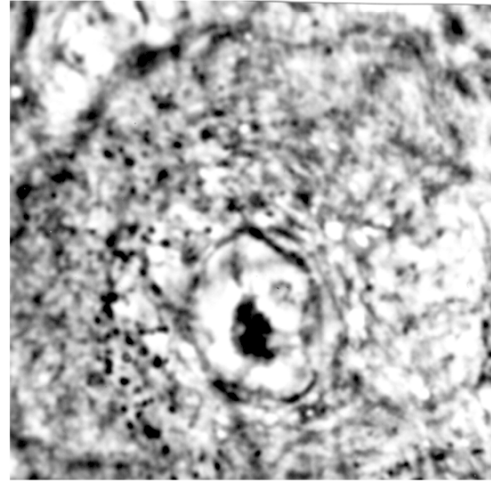


Abb. 14

Abb. 13 und 14: Im gleichen Areal (s. Abb.1) ist auch ein Grandryisches Nervenendkörperchen zu sehen (Grandry, 1889). Mit seinem Hof wird es bis 30  $\mu\text{m}$  groß.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin, Vergr. 1000 x

Foto: G. Behrmann 1997

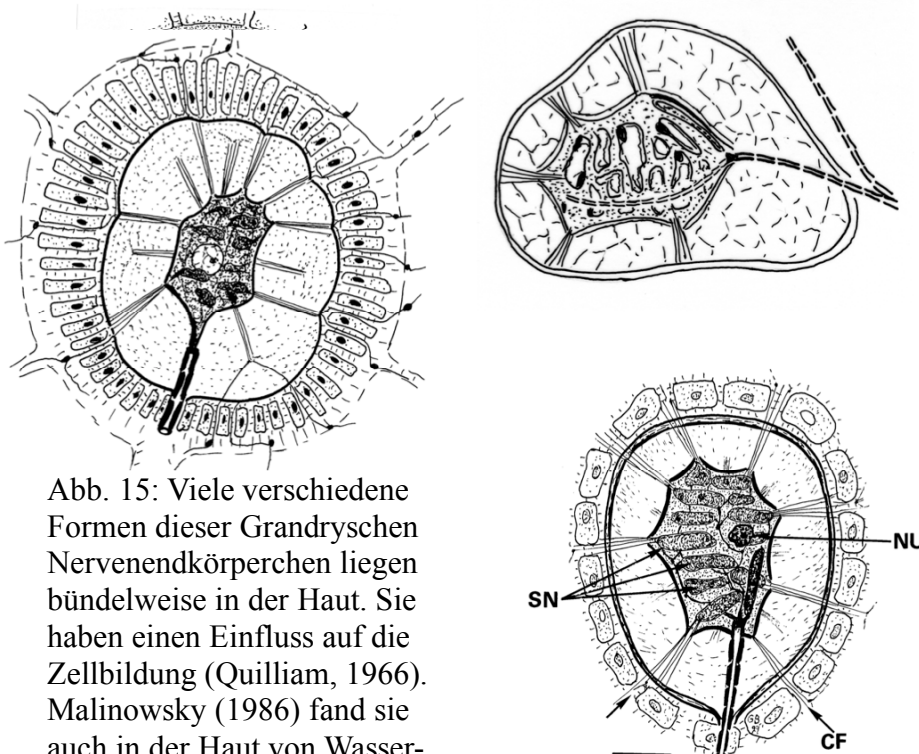


Abb. 15: Viele verschiedene Formen dieser Grandryischen Nervenendkörperchen liegen bündelweise in der Haut. Sie haben einen Einfluss auf die Zellbildung (Quilliam, 1966). Malinowsky (1986) fand sie auch in der Haut von Wasservögeln.

Zeichnungen: G. Behrmann

### Lamellierte Druckrezeptoren

Die meisten Druckrezeptoren sind bekannt und wurden vorher schon in Menschen und Tieren gefunden. Die Druckrezeptoren der Wale sind noch lange nicht bekannt, denn immer noch werden neue Variationen gefunden. Besucher von Delfinarien können beobachten, dass die Delfine Gegenstände mit den Nasen berühren. Dort und in der Zungenspitze liegen die größten lamellierten Tastorgane. Darüber hinaus liegen in der Haut des Kopfes und des ganzen Körpers und in der darunter liegenden Muskulatur eine große Anzahl Druckrezeptoren. Einige davon sollen nun hier vorgestellt werden. Die größte Variationsbreite in der Haut der Wale haben die lamellierten Druckrezeptoren, die Vater-Pacini und Golgi-Mazzoni beschrieben haben. Die größten Druckrezeptoren liegen in der Nasenspitze und können bis zu 5 mm lang werden. Sie bestehen aus zwiebelartig aufgebauten nervösen Lagen und können dadurch unterschiedliche Drücke erfassen.

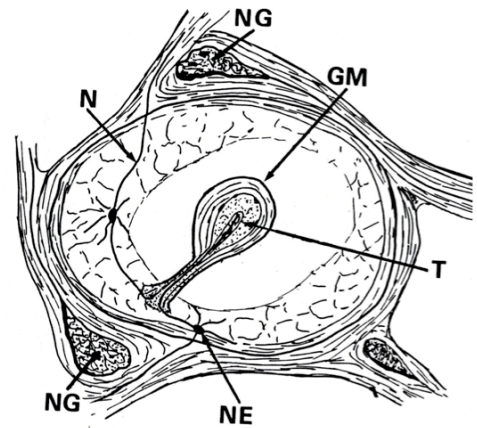
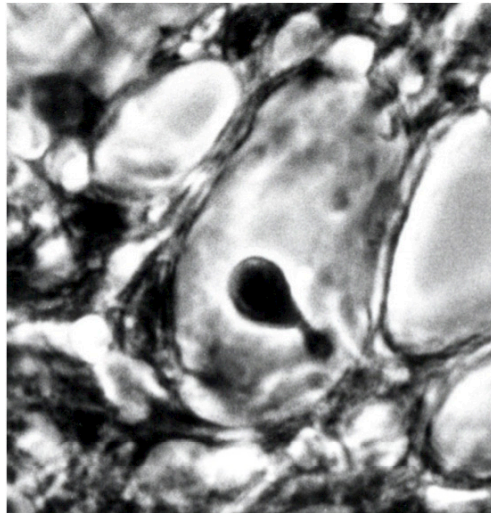


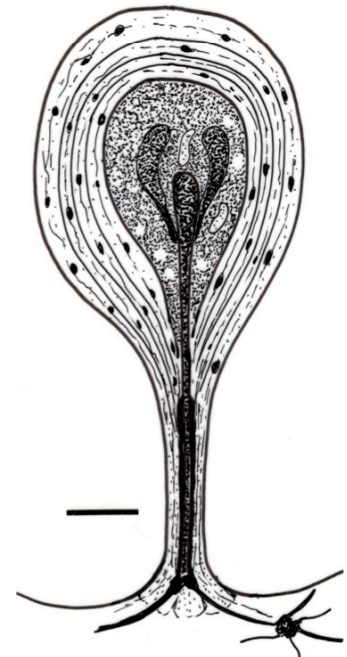
Abb 16: Die kleinsten, nur 6  $\mu\text{m}$  langen Druckrezeptoren, liegen in der Zunge der Schweinswale, und in den männlichen Genitalien der Menschen.

**GM** Golgi-Mazzonisches Tastkörperchen, **N** Nerv, **NE** Nervenzellen, **NG** Neurogliazellen, **T** Terminal mit Innenkolben

Vergr.: 1000 x, Maßstab: 1  $\mu\text{m}$ ; Färbung: Toluidin/Eosin

*Foto und Zeichnungen: G. Behrmann*

Warum brauchen Wale solche Druckrezeptoren? Weil die Wale feste, unbewegliche Lippen haben, fokussieren sie die von ihnen erzeugten Schallwellen mit der Zunge, wobei der Schwellkörper die Funktion der menschlichen Lippen übernimmt.



Die Nasenspitze ist das wichtigste Tastorgan der Wale.

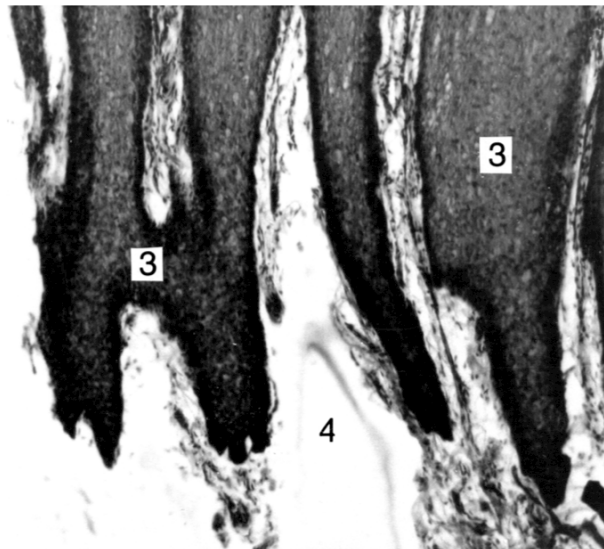


Abb. 17: Der nagelartige Übergang von der oberen Hautschicht Nr. 3 (Stratum spinosum) zur mittleren Hautschicht Nr. 4 (Stratum papillare)

Pottwal, *Physeter macrocephalus*, Färbung Hämatoxilin/Eosin, Vergr. 200 x

Foto: G. Behrmann

Die Menge und die Variationsbreite der lamellierten Druckrezeptoren ist bei Delfinen im Bereich der Kopfhaut besonders hoch.

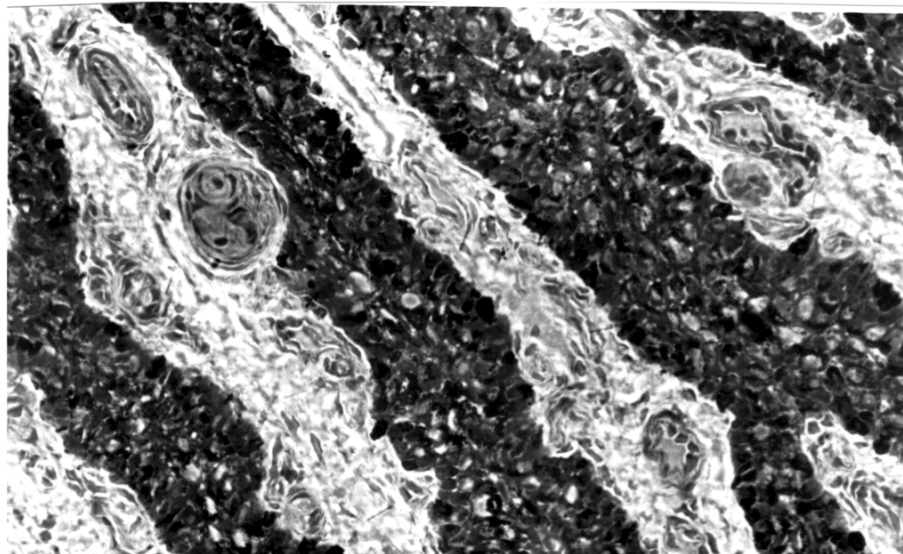


Abb. 18: Querschnitt durch die zwiebelförmig aufgebauten Druckrezeptoren

Vergr. 400 x, Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Foto: G. Behrmann

Die zwiebelförmig aufgebauten nervösen Lagen ermöglichen den Walen unterschiedliche Druckkräfte zu erfassen.

Die Größe der Druckrezeptoren und die Dünne der histologischen Schnitte ergeben selten ein ganzes Bild. So muss man aus vielen einzelnen Schnitten den ganzen Körper rekonstruieren.

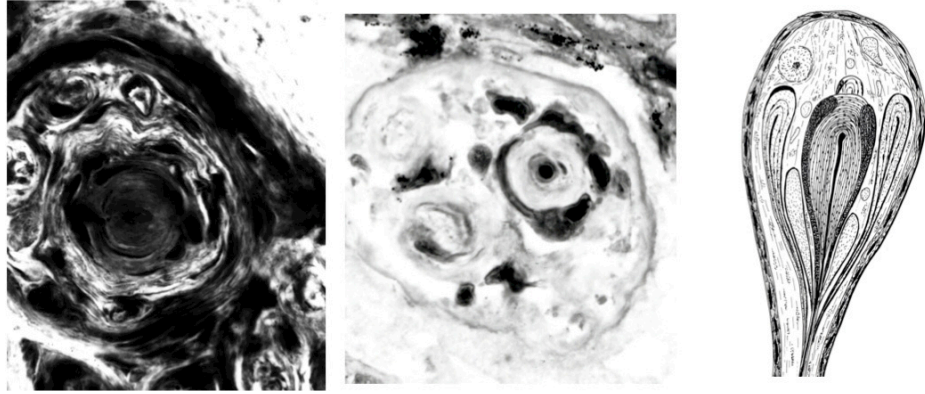


Abb. 19: Druckrezeptoren in der Nasenspitze von Walen, Fingerspitzen von Menschen, Haut von Katzen

Fotos und Zeichnungen: G. Behrmann

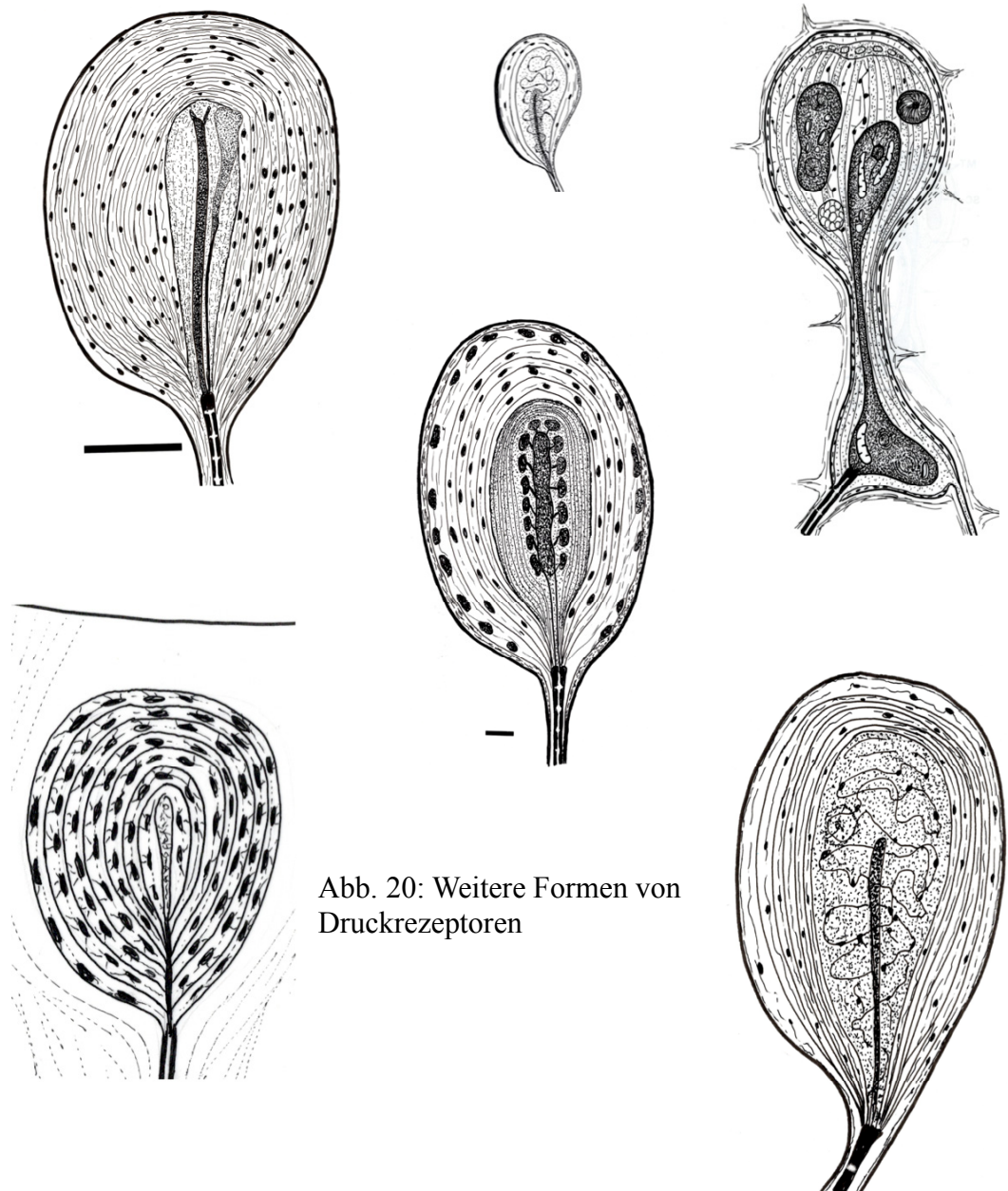


Abb. 20: Weitere Formen von Druckrezeptoren

Zeichnungen: G. Behrmann

## Oberflächensensibilität der Haut

Von russischen Wissenschaftlern wurden vor Jahren Strömungsversuche an Delfinen und Menschen gemacht.

Bei der Schwimmerin verschob sich schon bei etwas stärkerer Strömung die Haut, und bei starker Strömung entstanden Hautfalten.

Die Haut des begleitenden Delfins blieb auch bei starker Strömung glatt und die Beobachtungen zeigten, dass auftretende Veränderungen auf der Haut sofort ausgeglichen wurden.

Frage: Womit registrieren die Wale die Unebenheiten in der Haut ?

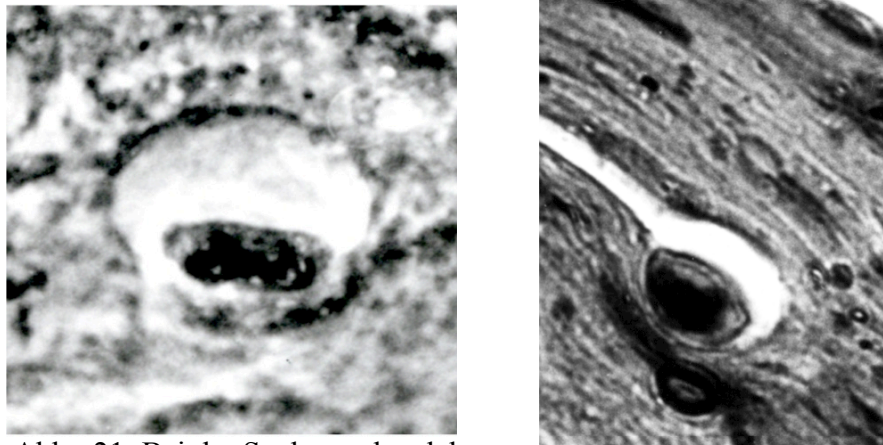


Abb. 21: Bei der Suche nach solchen Nervenendkörpern fanden sich einige, die unmittelbar unter der Hautoberfläche liegen, und solche funktionen übernehmen können.

Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Fotos: G. Behrmann

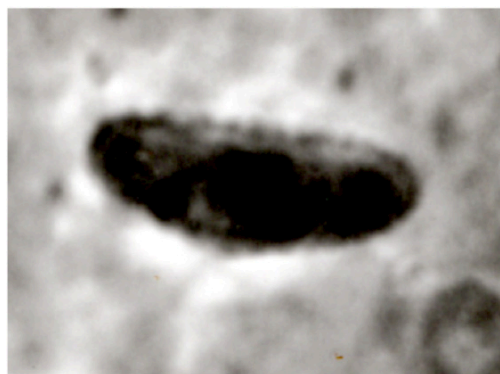


Abb. 22: Parallel zur Hautoberfläche liegen 20 bis 30  $\mu\text{m}$  Tiefe hochsensible tellerförmige Wahrnehmungsrezeptoren, die den Druck auf die Hautoberfläche registriert. Über stramm gespannten Kollagenfibrillen wird der Druck auf das 20 bis 30  $\mu\text{m}$  langen tellerartigen Tastorgan geleitet. Unter dem Teller liegen Tuben, die über Axone die Signale weiterleiten.

Vergr. 400x, Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Foto: G. Behrmann

Die beschriebenen Einzelheiten sind auf dem Foto kaum zu erkennen, zeichnerisch hilft hier die Funktion der Wahrnehmungsrezeptoren zu erklären.

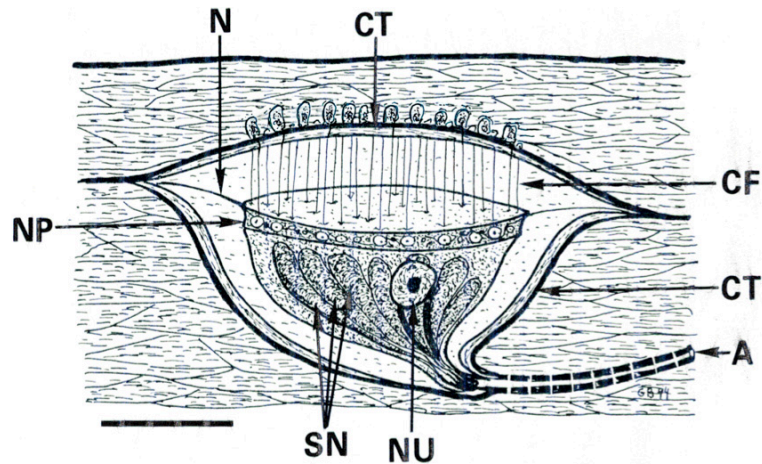


Abb. 23: A Axon, CF Kollagenfibrillen, CT Zellwand, Nerv, NP Tellerscheibe, NU Zellkern, SN nervöse Ampullen

Zeichnung: G. Behrmann

Größere, sensorische Nervenendkörper liegen etwas tiefer, aber sehr nah der Hautoberfläche.



Abb. 24: Diese Wahrnehmungsrezeptoren werden über 500  $\mu\text{m}$  breit. In den Ampullen ziehen verstärkte Nerven in Richtung Oberhaut, wo deren Dentriten an der Tubenmembran taktieren.

Zeichnung: G. Behrmann

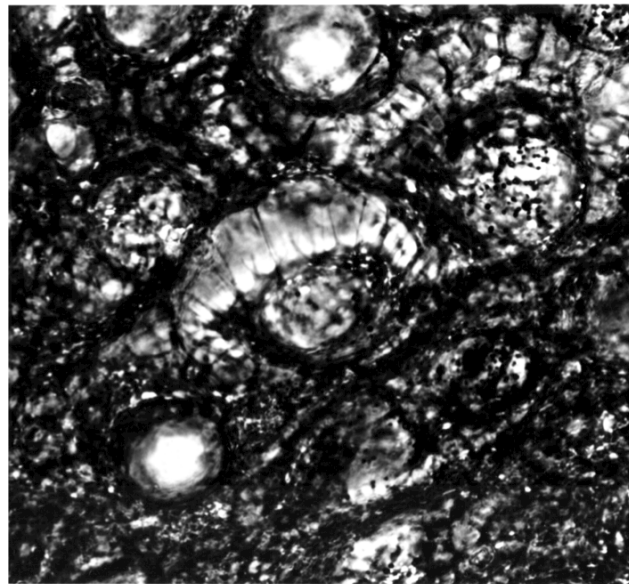


Abb. 25: Auf Grund ihrer Ausstattung können die Rezeptoren größere Hautflächen erfassen. Die Dendriten der langen verstärkten Nerven empfangen den Druck und leiten ihn in den zentralen Nervenkörper.

Hinter dem beschriebenen Rezeptor ist ein größerer zu sehen.

Vergr. 400 x, Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Foto: G. Behrmann

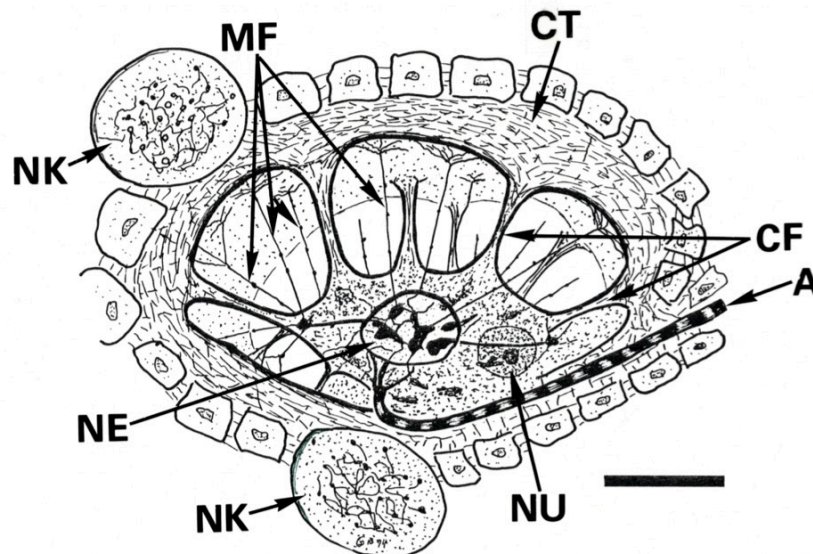


Abb. 26: A Axon, CF Ampullenhaut, CT reticulares Bindegewebe, NE Nervterminal, NU Zellkern, MF Nerven mit Dendriten oben, NK freie Nervenkörperchen

Maßstab 50 µm, Vergr. 400 x

Foto und Zeichnung: G. Behrmann

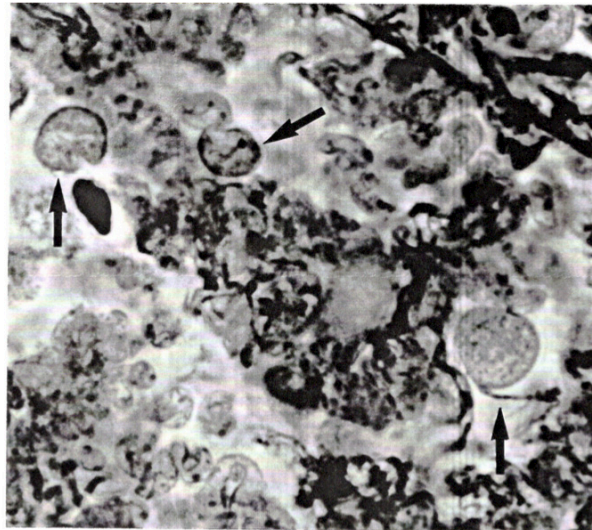


Abb. 27: Die freien Nervenendkörperchen mit einem max. Durchmesser von  $10\mu\text{m}$  haben keine Verbindung zu den großen Wahrnehmungsrezeptoren, sind aber häufig in deren Nähe zu finden. Weil das Axon nur selten zu sehen ist, wurden sie bisher vernachlässigt.

Vergr.400x, Färbung: Hämatoxilin /Eosin

Foto: G. Behrmann

3 bis 5 mm tiefer, unterhalb der parakeraotischen Schicht liegen in der mittleren Haut (*Stratum papillare*) ovale Tastrezeptoren, die eine Verbindung zur Hautmuskulatur haben.

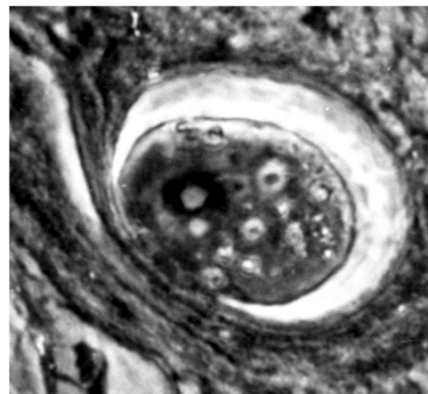
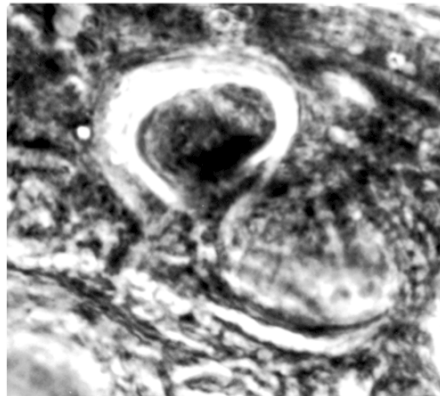


Abb. 28 und 29: Diese Meissnersche Tastrezeptoren sind um die  $100 \times 60 \mu\text{m}$  groß.

Vergr. 400 x Färbung Hämatoxilin/Eosin

Foto: G. Behrmann



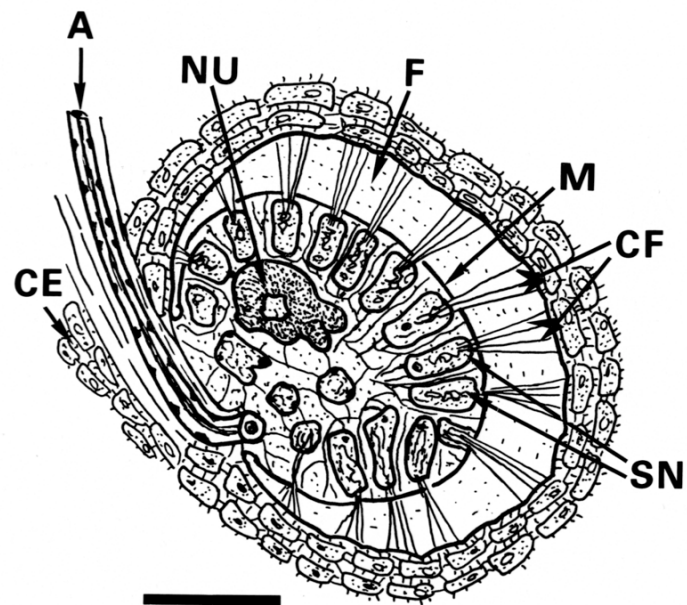


Abb. 30: Unter Verlust ihrer Myelinscheide dringen die Axone in die Kapsel ein und terminieren in den Ampullen. Von den Ampullen ziehen viele Kollagenfibrillen zur Kapselmembran und kontrollieren so den Druck auf die ganze Hautlage mit ihren dünnen Unterhautmuskeln.

A Axon, CE Zellgewebe, CF Kollagenfibrillen, F Zellwasser, M Membran, NU Zellkern, SN sensible Ampullen.

Zeichnung: G. Behrmann

### Primäre Sinneszellen

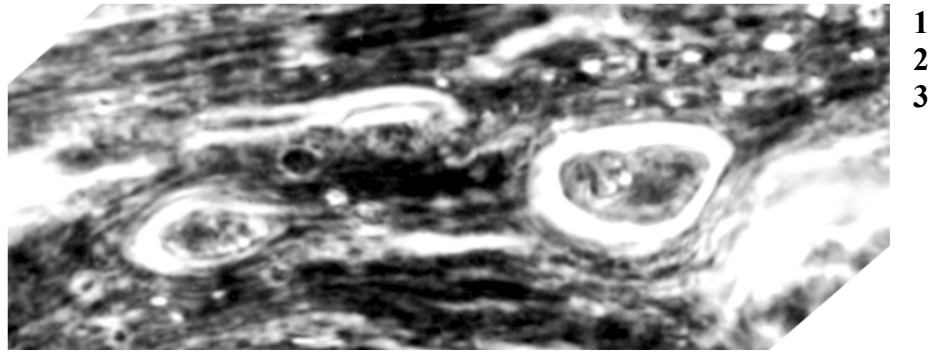


Abb. 31: Mechanorezeptoren sind eingebettet in die dünnen Muskelsträngen der Oberhaut. Verschiedene Nervenendkörperchen liegen dicht nebeneinander, alle müssen also unterschiedliche Funktionen haben. Deutlich erkennbar sind  
1 Ruffischer Druckrezeptor, 2 Grandry'sches Hautkörperchen,  
3 ein Tellerdruckrezeptor .

Vergr. 1000 x, Färbung Hämatoxilin/Eosin

Foto: G. Behrmann

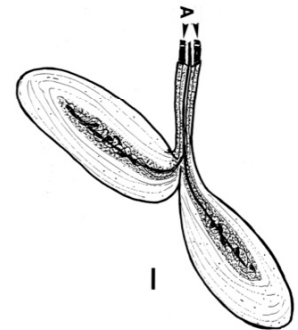
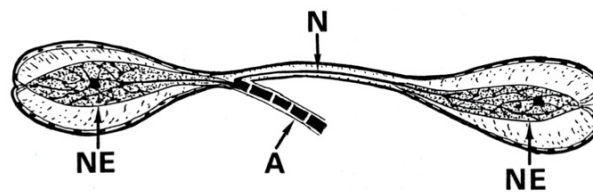


Abb. 32: Zwei Ruffinische Tastkörperchen (NE) sind durch Tuben verbunden zu einem Dehnungsrezeptor.

Zeichnung: G. Behrmann

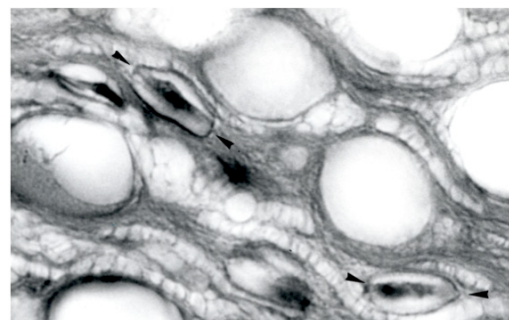
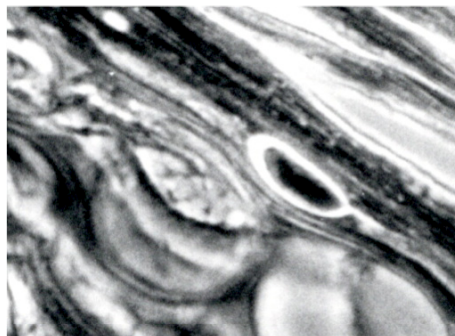


Abb. 33: Die gesamte Muskulatur unter der Oberhaut ist somit unter Kontrolle der peripheren Nerven. Die Haut der Delfine bleibt immer glatt.

Vergr. 1000 x, Färbung Hämatoxilin/Eosin

Foto: G. Behrmann

## Literatur

- Behrmann G. (1988) The peripheral nerve ends in the tongue of the harbour porpoise *Phocoena phocoena* (Linné, 1758). *Aquatic Mammals* 14(3), 107-112.
- Behrmann G. (1990) The tuberous organs of the harbour porpoise *Phocoena phocoena* (Linné, 1758). *Aquatic Mammals* 16(1), 33-35.
- Behrmann, G. (1991) The peripheral nerve endings in the skin of the harbour porpoise *Phocoena phocoena* (Linné, 1758). In: J.J. Symoens: Proceedings of the Symposium on Whales, Brüssel 1991, 149-156.
- Behrmann, G. (2000) Die peripheren Nervenendigungen in der Haut. In: Anatomie des Zahnwalskopfes 2, 191- 241, Publikationen AWI.
- Boeke, J. (1934) Niedere Sinnesorgane. In: Handbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere. Band 2, p. 855 – 878. Verlag Urban & Schwarzenberg, Berlin/Wien.
- Golgi, C. (1880) zitiert nach Boeke, 1934.
- Grandry, P. (1889) zitiert nach Boeke, 1934.
- Klinowska M. (1985a) Cetacean live strandings relate to geomagnetic topography. *Aquatic Mammals* 11, 27 -32.
- Klinowska M. (1985b) Cetacean live stranding dates relate to geomagnetic disturbances. *Aquatic Mammals* 11, 109 – 119.
- Klinowska M. (1986) The Cetacean magnetic sense-evidence from strandings. In: Research of dolphins (eds. M. M. Bryden & r. Harrison) pp. 401-432. Clarendon Press, Oxford.
- Malinowsky, L. (1986) Mechanoreceptors and free nerve endings. In: Biology of the Integument 2. (ed. Bereiter-Hahn, J. , A.G. Matoltsy & K. S. Richards), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 535 – 603.
- Mazzoni, V. (1891) zitiert nach Boeke. 1934.
- Meissner, G. & Wagner (1852) zitiert nach Boeke 1934.
- Pacini, F. (1867) zitiert nach Boeke. 1934.
- Quilliam, T. A. (1966) Structure of the receptor organs. In: Touch heat and pain. (eds. A. V. S De Reuck & J. Knigth) 86 - 116 , Journal of Zoology, London.
- Ruffini, A. (1905) Les expansions nerveuses de la peau. n: Rev. deh. De Histologie 1.

*Behrmann G (2019) Das periphere Nervensystem der Haut der Schweinswale (Phocoena phocoena L. 1758)*

Szabo, T. (1974) Anatomy of specialized lateral line organs of electroreception. In Handbook of Sensory Physiology 3 (ed Fassard), Springer Verlag Berlin Heidelberg, 14 – 58.