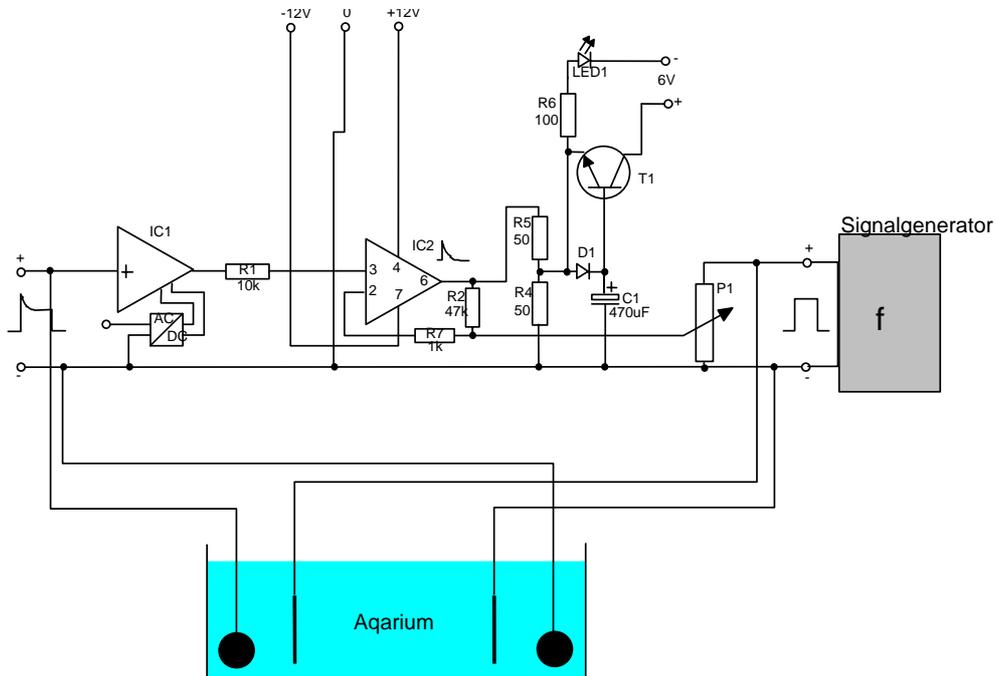
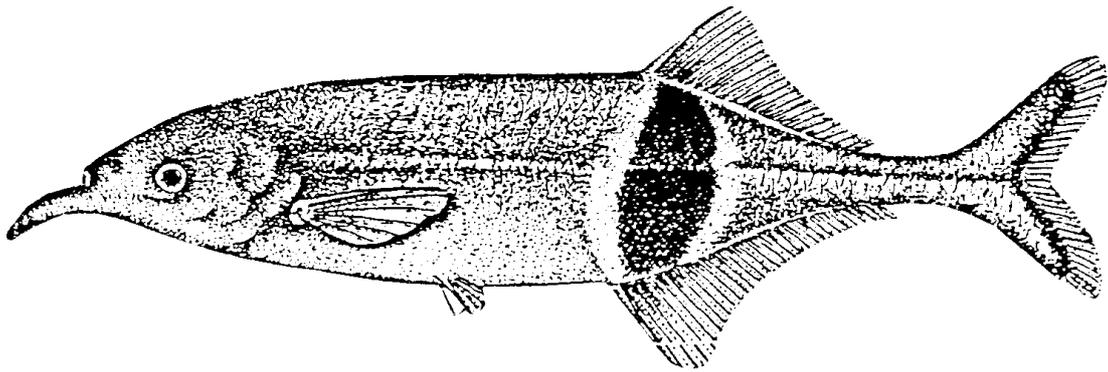


Vom Elefantenrüsselfisch zum Sensor



Inhalt

1. Kurzfassung
2. Einleitung
3. Aufzeichnung der elektrischen Signale des Elefantenrüsselfisches
 - 3.1. Aufnahme mit dem Kassettenrecorder
 - 3.2. Aufnahme mit dem Videorecorder
4. Das Geheimnis des Fisches
5. Der künstliche Elefantenrüsselfisch
 - 5.1. Versuchsapparatur
 - 5.2. Versuchsdurchführung
 - 5.3. Versuchsergebnisse
 - 5.4. Versuchsdeutung
6. Entwicklung eines Sensors für lebendige Stoffe
 - 6.1. Elektronischer „Sensor“
 - 6.2. „Sensor“ mittels EDV
7. Literaturliste

1. Kurzfassung

Ein lustig aussehender, aber auch besonders interessanter Fisch ist der Elefantenrüsselfisch (*Gnathonemus petersii*). Dieser schwach elektrische Fisch ist in vielen Zierfischhandlungen für ca. 15 DM erhältlich. Der Elefantenrüsselfisch hat seine Heimat in Afrika, im schlammigen Wasser des Nils. Diesem Lebensraum hat er sich speziell angepaßt: Sein Merkmal ist ein elektrisches Organ, das schwache elektrische Impulse erzeugt. Mit Hilfe des erzeugten elektrischen Feldes kann er sich im trüben Wasser und selbst bei völliger Finsternis orientieren und seine Beute orten. Dadurch ist er vom Tageslicht unabhängig und kann nachts jagen, wenn seine Feinde schlafen.

Seit ich diesen Fisch besitze, fasziniert mich die Frage, wie er es schafft, lebendige Stoffe von unbelebter Materie zu unterscheiden. Dies war der Auslöser für meine Jugend forscht - Arbeit.

Ein Oszilloskop bzw. Computer-Interface zur Beobachtung der elektrischen Signale des Elefantenrüsselfisches stand mir nur in der Schule zur Verfügung, der Fisch bedurfte aber einer intensiven häuslichen Pflege. Das Problem der Signalaufzeichnung löste ich zuerst mit einem Kassettenrecorder. Anschließend gelang es mir, das optische und elektrische Verhalten synchron aufzuzeichnen. Dazu benutzte ich eine Videokamera und, da diese kein „Mikrofon“ für die elektrischen Signale besitzt, einen Videorecorder. Anhand der nun folgenden Versuchsreihen gelang es mir jedoch nicht meine eingangs gestellte Frage: „Wie unterscheidet der Elefantenrüsselfisch zwischen belebten Stoffen und unbelebter Materie?“ zu beantworten.

Aus diesem Grund baute ich mir einen künstlichen elektrischen Fisch. Dadurch konnte ich nun den Verlauf von Sende- und Empfangssignal unterscheiden. Diese Untersuchungsmethode brachte mich an mein Ziel, da ich nun nachweisen konnte, daß tierisches und menschliches Gewebe einen ganz charakteristischen Kurvenverlauf ergaben. Anhand dieser charakteristischen Signale entwickelte ich dann eine elektronische Sensorschaltung für lebendige Stoffe. An einer Realisierung des Sensors mittels EDV arbeite ich zur Zeit noch.

2. Einleitung

Ein lustig aussehender, aber auch besonders interessanter Fisch ist der Elefantenrüsselfisch (Gnathonemus petersii). Dieser schwach elektrische Fisch ist in vielen Zierfischhandlungen für ca. 15 DM erhältlich. Der Elefantenrüsselfisch hat seine Heimat in Afrika, im schlammigen Wasser des Nils. Diesem Lebensraum hat er sich speziell angepaßt: Sein Merkmal ist ein elektrisches Organ, das schwache elektrische Impulse erzeugt. Mit Hilfe des erzeugten elektrischen Feldes kann er sich im trüben Wasser und selbst bei völliger Finsternis orientieren und seine Beute orten. Dadurch ist er vom Tageslicht unabhängig und kann nachts jagen, wenn seine Feinde schlafen.

Seit ich diesen Fisch besitze, fasziniert mich die Frage, wie er es schafft, lebendige Stoffe von unbelebter Materie zu unterscheiden. Dies war der Auslöser für meine Jugend forscht - Arbeit.

3. Aufzeichnung der elektrischen Signale des Elefantenrüsselfisches

Problem: Ich hätte mir gerne die Signale des Elefantenrüsselfisches angesehen, wußte aber nicht wie. Ich hatte kein Oszilloskop oder Oszillosgraph zu Hause und konnte mir auch keins besorgen. Mir stand nur in der Schule ein Oszilloskop zur Verfügung, aber ich konnte den Fisch nicht ohne Risiko in die Schule transportieren.

3.1 Aufzeichnung mit dem Kassettenrecorder

Idee: Meine Idee war, daß ich versuchen würde, die Signale mit einem Kassettenrecorder aufzuzeichnen, um sie dann in der Schule auf dem Oszilloskop sichtbar zu machen. Ich war zuerst skeptisch, da ich von Tonbandaufnahmen keine so gute Qualität gewohnt war. Aber versuchen mußte ich es ja.

Versuchsplanung: Mir war bekannt, daß der Spannungsbereich am Eingang der Tape-Buchse meines Kassettenrecorders 0-200mV betragen sollte. Um meinen Kassettenrecorder nicht zu gefährden, mußte ich mich zuerst einmal über die Höhe der Spannungssignale des Elefantenrüsselfisches informieren. In Zupanc, G.K.H., 1982 S.127 fand ich, daß die Signale des Fisches 200mV nicht übersteigen würden. Die Anschlußbelegung der Tape-Buchse entnahm ich einer Zeitschrift (Elektronik Aktuell Magazin 2/94 S.71).

Versuch: Über die DIN-Eingangsbuchse gab ich die Signale des Elefantenrüsselfisches auf den Kassettensrecorder.

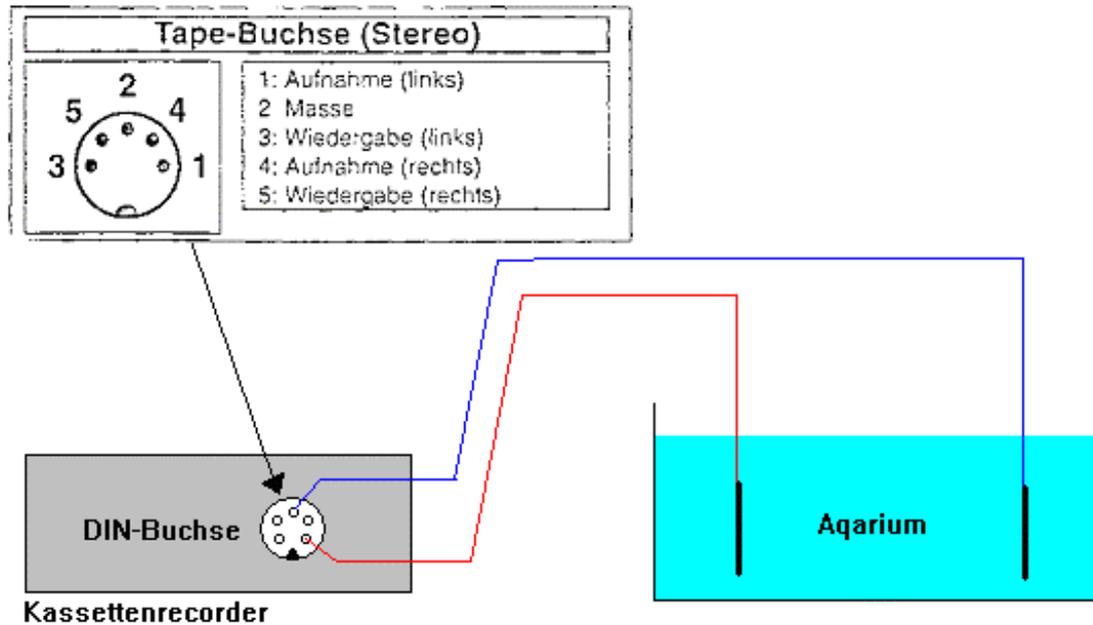
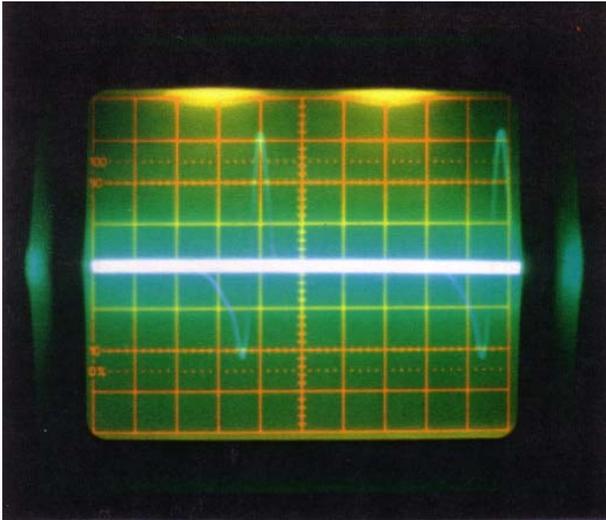


Abb.1: Aufzeichnung der elektrischen Signale des Elefantenrüsselfisches mit einem Kassettensrecorder

Als Empfänger verwendete ich zwei Weißblechplatten (15x15cm), die ich mit einem normalen, zweiadrigen Kabel mit dem Kassettensrecorder verband. Die Platten hatte ich an zwei Holzstäbchen befestigt und positionierte sie vor bzw. hinter dem Fisch im Aquarium, um eine möglichst große Amplitude des empfangenen Signals zu erreichen.

Auswertung: Die bespielte Kassette nahm ich mit in die Schule und spielte sie in der Physik ab. Die Signale gab ich ebenfalls über die DIN-Buchse auf das Oszilloskop. Jetzt sah ich sie mir an.

Ergebnis: Als mein Physiklehrer die Signale auf dem Oszilloskop sah (siehe Abb.2), war er begeistert. Die Qualität der Aufnahme war sehr gut. Auch ich war froh, daß ich nun eine Methode gefunden hatte, die Signale des Elefantenrüsselfisches aufzuzeichnen. Außerdem freute sich mein Physiklehrer, daß ich einen Weg gefunden hatte, der es allen forschenden Schülern erlaubt, mit einfachsten Mitteln einen U-t-Diagramm aufzuzeichnen.



y-Achse: 100mV pro Kästchen

x-Achse: 0.1ms " "

Abb.2: Mit dem Kassettensrecorder aufgezeichnete und anschließend auf dem Oszilloskop dargestellte Signale des Elefantenrüsselfisches.

3.2. Aufzeichnung mit dem Videorecorder

Im Gespräch mit meinem Physiklehrer kam mir die Idee, daß es für Versuchsreihen sinnvoller wäre, Bild und elektrische Signale des Elefantenrüsselfisches synchron aufzuzeichnen.

Dazu lieh ich mir von meinem Großvater eine Videokamera. Nun wollte ich mit der Aufzeichnung der Signale beginnen. Dies war aber leichter gesagt als getan:

die Videokamera besaß kein „Mikrofon“ für die elektrischen Signale des Fisches. Ich überlegte mir eine andere Lösung:

Die Videokamera besaß einen Audio-Ausgang und getrennt davon einen Video-Ausgang. Mit Hilfe eines Scart/Cinch-Adapterkabels, einem VHS-Videorecorder und einem Kassettendeck löste ich das Problem:

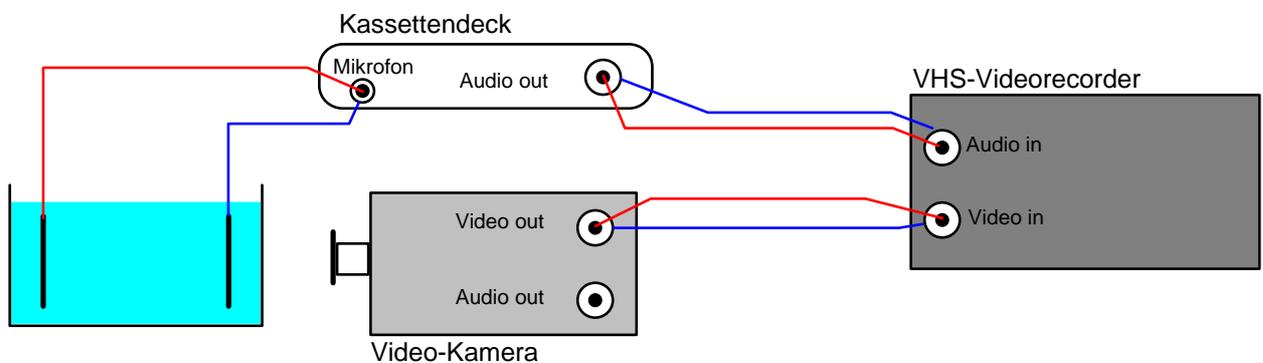


Abb.4: Versuchsanordnung zum künstlichen Elefantenrüsselfisch

Das von der Videokamera kommende Video-Signal gab ich auf den Video-In-Stecker des Adapterkabels, das Audio-Signal des Kassettendecks gab ich auf den Audio-In-Stecker des Adapterkabels. Den Mikrofon-Eingang des Kassettendecks verband ich mit den Empfangselektroden im Aquarium. So konnte ich die Signale synchron aufzeichnen.

Um die Qualität der Aufnahmen allgemein zu verbessern, verwendete ich zuerst ein besseres Kassettendeck (aus meiner Hifi-Anlage). Dann baute ich mir einen besseren Empfänger und verwendete abgeschirmte Kabel:

In die Mitte eines Kunststoffrohres ($l = 9\text{ cm}$) bohrte ich ein Loch und klebte ein Koax-Kabel ein. Die beiden Adern führte ich an beiden Seiten des Kunststoffrohres heraus und wickelte sie zu einer Elektrode auf. Die Enden des Rohres klebte ich zu.

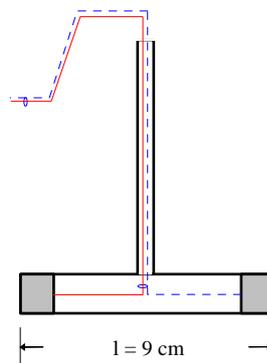


Abb.3: *Empfangsdoppелеlektrode*

Zuletzt versuchte ich weiter die Störsignale durch Abschirmen des Aquariums zu minimieren. Hierzu verwendete ich Aluminiumdrahtgeflecht (Maschenweite ca. 0.5 cm), das ich rund um das Aquarium herum anbrachte.

Nun war es mir endlich möglich, das optische und elektrische Verhalten des Elefantenrüsselfisches synchron aufzuzeichnen und anzuschauen.

Die Signale konnte ich nach der Aufnahme über die Scart-Buchse eines Videorecorders ausgeben und auf dem Oszilloskop sichtbar machen, während parallel dazu das optische Verhalten des Fisches zu beobachten war.

Nun konnte mit den unterschiedlichsten Versuchsreihen begonnen werden.

4. Das Geheimnis des Fisches

So interessant die Beobachtungen und Aufzeichnung der Signale des Fisches auch waren, einer Beantwortung meiner Eingangsfragestellung „Wie unterscheidet der Fisch lebendige Stoffe von unbelebter Materie?“ brachten sie mich nicht näher.

Auch in der von mir gelesenen Literatur fand ich nur einen Hinweis zur Lösung des Rätsels:

G. von der Emde und H. Bleckmann schreiben in Spektrum der Wissenschaft /Januar 1993 S. 26-29, daß der Fisch aufgrund kapazitiver Signalverzerrung - hervorgerufen durch die Membranen in den Gewebezellen der anderen Lebewesen - auf deren Anwesenheit in seinem elektrischen Feld schließt. Diese Ergebnisse ergaben sich aus anatomischen Untersuchungen (Messungen an den Nervenfasern des Fisches). Diese Ergebnisse kann ich natürlich nicht durch eigene Versuche bestätigen, da im Rahmen einer Jugend forscht - Arbeit diese Art von Tierversuchen verboten ist.

Auch über Verhaltensbeobachtungen gelang es mir letztlich nur Ansatzweise, die Untersuchungen von v. der Emde und Bleckmann zu bestätigen. In einer Versuchsreihe legte ich dem Fisch Spulen, Widerstände und Kondensatoren vor. Auf einen vorgehaltenen Kondensator von 22 nF reagierte der Fisch deutlich. Er griff ihn an. Dieses Verhalten ließ sich jedoch nicht erneut hervorrufen. Eine automatische Reaktion auf kapazitive Signalverzerrung ließ sich somit nicht einwandfrei bestätigen.

Enttäuscht stellte ich für einige Zeit meine Untersuchungen ein, bis mir plötzlich der Gedanke kam, mir einen künstlichen Elefantenrüsselfisch zu bauen.

5. Der künstliche Elefantenrüsselfisch

Ich wollte also das Problem von einer anderen Seite anpacken und baute mir einen künstlichen Elefantenrüsselfisch, um meßtechnisch zu klären, wie belebte und unbelebte Stoffe das elektrische Feld verändern. Mittels des künstlichen Fisches konnte ich Sende- und Empfangssignal getrennt messen und vergleichen, während ich ja beim echten Elefantenrüsselfisch nur das verformte Sendesignal = Empfangssignal messen konnte.

5.1. Versuchsaapparatur

Ich füllte ein Aquarium mit Leitungswasser. Dann brachte ich 4 Elektroden im Wasser ein. Die Sendeelektroden (S_1 und S_2) bestanden aus Kohleplatten und waren mit einem Abstand von 13 cm in der Mitte des Aquariums angebracht. Die Empfangselektroden (E_1 und E_2) waren zwei Metallkugeln, die sich mit einem Abstand von 25 cm (Mittenabstand) im Wasser befanden. Das Aquarium hatte die Abmessungen 30cm x 20cm x 20cm und war zu 15cm mit Wasser gefüllt. Die 4 Elektroden tauchten ganz ins Wasser, um keine Signalveränderungen durch den schwankenden Wasserspiegel beim Eintauchen der Stoffe hervorzurufen.

Mittels des Signalgenerators gab ich nun Rechtecksignale auf die Sendelektroden (S_1 und S_2) sowie auf den Eingang B des Oszilloskops (bzw. des Computer-Interfaces). Die Spannung zwischen den Empfangselektroden (E_1 und E_2) gab ich auf den anderen Eingang A des Oszilloskops (siehe Abb.4).

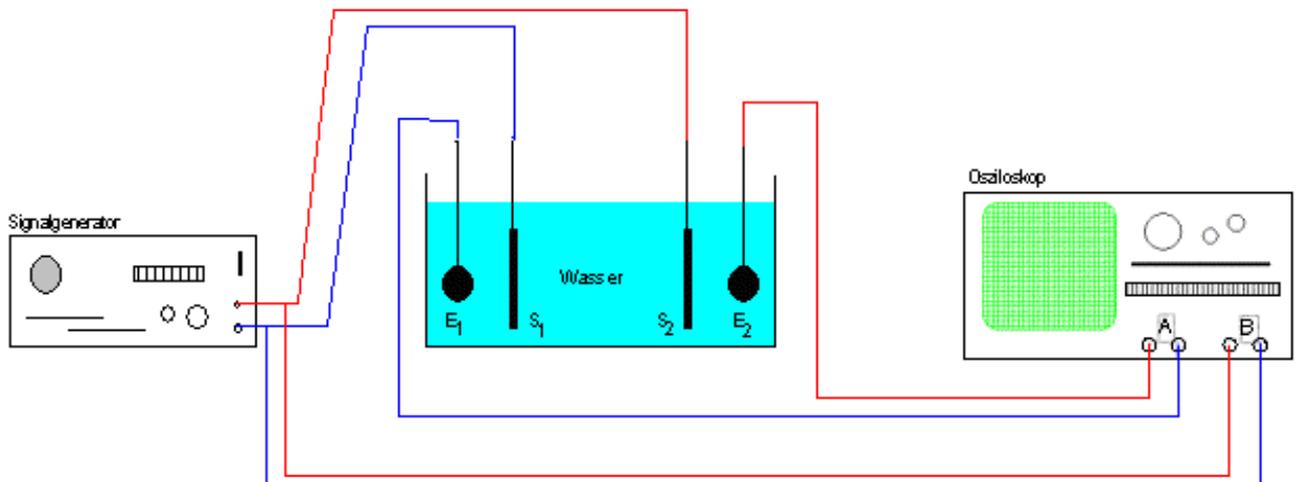


Abb.4: Versuchsaapparatur zum künstlichen Elefantenrüsselfisch

5.3. Versuchsdurchführung

Auf die Sendelektroden gab ich ein Rechteck-Signal mit einer Spannung von ca. 4 V und einer Frequenz von 1000 Hz. Danach tauchte ich verschiedene Stoffe in das Wasser ein:

- | | | | | | |
|-----|--------------|-----|-----------------|----|------------------------------|
| 1. | Kunststoff | 2. | Holz (alt) | 3. | Eisen |
| 4. | Stein | 5. | Hände (meine) | 6. | Hände (die eines Mitschüler) |
| 7. | Fleischwurst | 8. | Schweinefleisch | 9. | Kohlrabi |
| 10. | Möhre | 11. | Apfel | | |

Alle Stoffe waren ungefähr handdick. Die Computerdiagramme speicherte ich ab und druckte sie aus (siehe Kapitel 5.3.).

5.3. Versuchsergebnisse

Ich erhielt folgende Computerdiagramme (blau = Sendesignal ; schwarz = Empfangssignal):

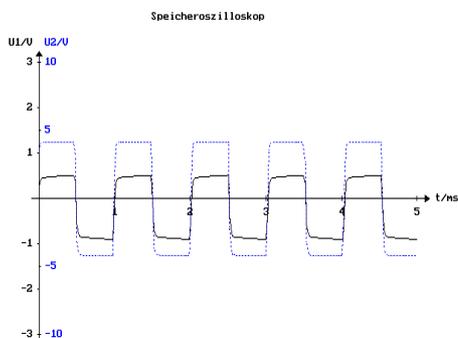


Abb.5a: Kein Stoff im Wasser

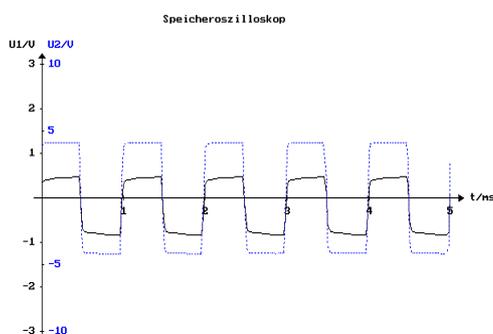


Abb.5b: Kunststoff im Wasser

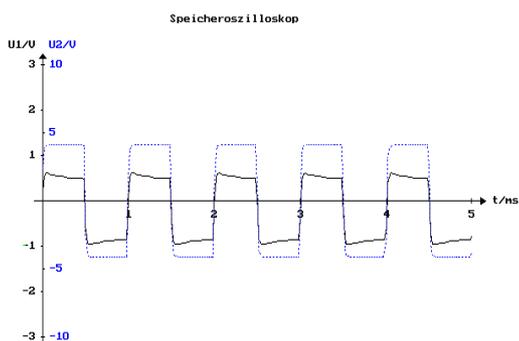


Abb.5c: Hand im Wasser

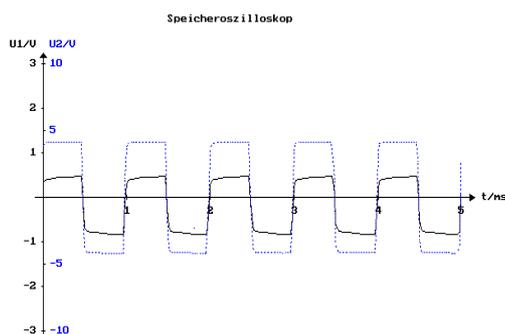


Abb.5d: Schweinefleisch im Wasser

Die übrigen Stoffe ergaben keinen anderen Kurvenverlauf als bei Nichts, Kunststoff oder Schweinefleisch im Wasser. Auffallend beim Vergleich der Signale ist, daß nur bei Abb.5c (Hand im Wasser) ein anderer Kurvenverlauf des Empfangssignals zu erkennen ist. Nur hier fällt die empfangene Spannung im zeitlichen Verlauf ab. Bei allen anderen Diagrammen steigt sie leicht an.

5.4. Versuchsdeutung

Von meinen Diagrammen, insbesondere von Abb.5c war ich hellauf begeistert, denn nun war ich selbst in der Lage - wie auch der Elefantenrüsselfisch - lebendige Stoffe von toten Stoffen zu unterscheiden. Kurz: Hat das empfangene Signal am Anfang einen Peak, so befindet sich ein lebendiger Stoff im elektrischen Feld! Mit dieser Entdeckung eröffnet sich die Möglichkeit einen völlig neuartigen Sensor, einen Sensor für lebendige Stoffe zu entwickeln.

Meine Versuchsergebnisse lassen sich m. E. nicht mit den Erkenntnissen von v. der Emde und Bleckmann (Spektrum der Wissenschaft 1/93) deuten, denn im frischen Schweinefleisch (Abb.5d) sind die Zellwände noch weitgehend unbeschädigt, so daß sie nach v. der Emde und Bleckmann das Signal kapazitiv verzerren. Mein Peak ist jedoch nicht das Ergebnis einer kapazitiven Signalverzerrung. Die Entstehung der Peaks deutete ich wie folgt: Das Rechtecksignal reizt die Nevenzellen so an, das diese selbst Impulse abgeben. Das empfangene Signal ist also das Summensignal aller gereizten Gewebezellen, die eine „Antwort“ auf das Rechtecksignal geben und des Rechtecksignals selber.

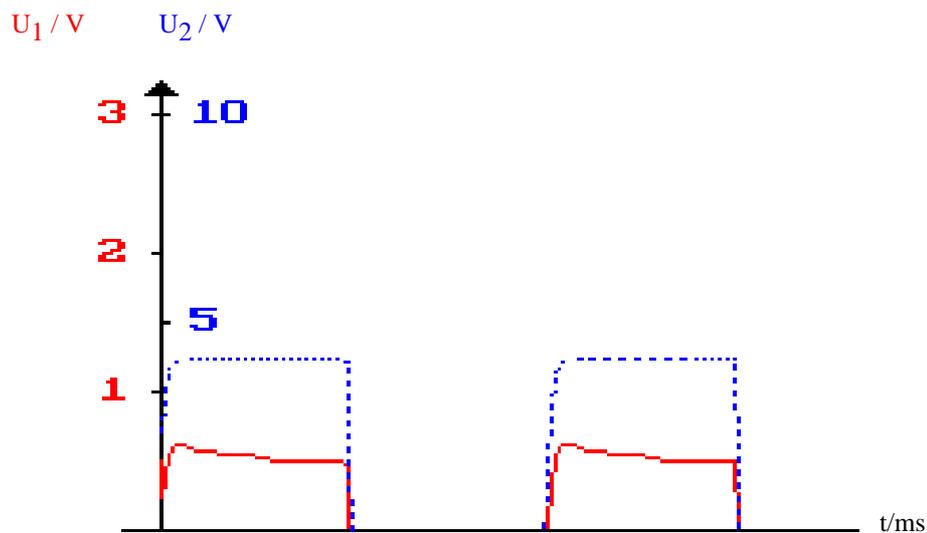
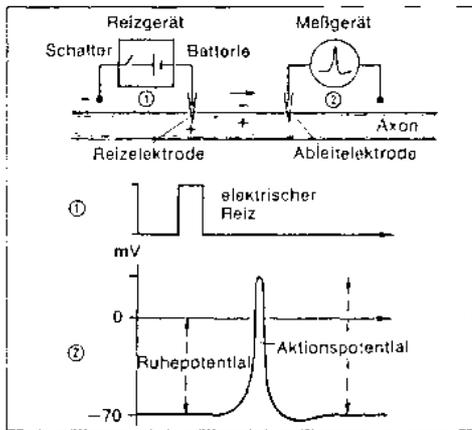


Abb.6: Sendesignal (blau) und Empfangssignal (rot) für lebendige Stoffe in vergrößerter Darstellung

Eine Bestätigung meiner Versuchsdeutung fand ich u.a. in Daumer, K. / Hainz, R., 1979 S. 71ff:



„Natürlicherweise wird eine Nervenfasern erregt, wenn z.B. bestimmte Sinneszellen, die mit dieser Faser verbunden sind, optisch bzw. chemisch oder mechanisch gereizt werden. Man kann eine Erregung aber auch in einem isolierten Axon auslösen, wenn man an einer Stelle der Membran das Ruhepotential durch einen kurzen Stromstoß abschwächt. Durch einen derartigen künstlichen, elektrischen Reiz wird eine kurzfristige Umpolung der Membran ausgelöst, die sich selbsttätig als

Umpolungswelle nach beiden Seiten von der Reizstelle aus über das Axon fortplant. Den zeitlichen Verlauf der Potentialänderung an einer Membranstelle kann man über eine intrazelluläre Mikroelektrode am Kathodenstrahlzilloskop sichtbar machen. Man bezeichnet sie als Aktionspotential. Um näheren Aufschluß über die Auslösebedingungen und charakteristischen Eigenschaften von Aktionspotentialen zu erhalten, werden Reiz- und Ableitelektroden möglichst nahe nebeneinander in das Axon gestochen. Dann werden Polung und Stärke der Reize systematisch variiert:“

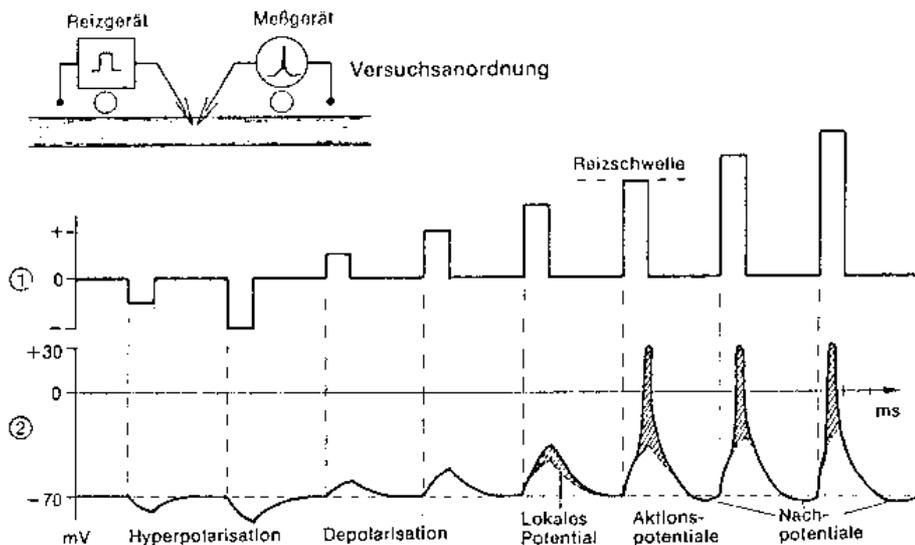


Abb. 7: Untersuchung der Auslösebedingungen für Aktionspotentiale (Daumer, K./Hainz, R., 1979 S. 72)

Wie man also sehen kann, wird erst ein Impuls aktiv von der Nervenzelle gesendet, wenn durch ein genügend starkes Signal ihre Reizschwelle überschritten wird. Dann ändert sich schlagartig ihre Polarität.

Wenn nun alle Zellen der Hand, die sich im Wasser befindet, ausgelöst durch das Rechtecksignal im Wasser, schlagartig ihre Polarität ändern, d.h. ein Aktionspotential senden, sollte dies ausreichen, um eine Änderung des elektrischen Feldes messen zu können. Das empfangene Signal würde dann durch den

Impuls der Zellen am Anfang - leicht verzögert - größer sein als bei Ende des Signals. Genau das ist bei meinen Versuchen der Fall.

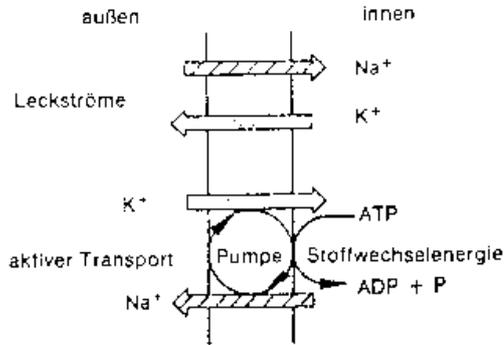


Abb.8: Kalium-Natrium-Pumpe
(Daumer, K./Hainz, R., 1979 S. 70)

Diese Theorie würde auch bestätigen, warum bei Schweinefleisch keine Verzerrung auftrat: Die Zelle kann nur ihre Ruhespannung aufrechterhalten, wenn die „Kalium-Natrium-Pumpe“ aktiv ist, sonst würde die Spannung durch die Leckströme schnell abfallen. Ohne die Ruhespannung jedoch, kann die Zelle kein Aktionspotential auslösen. Der aktive Transport von Natrium und Kalium kostet aber Energie, die in Form von ATP verbraucht wird. Bei der toten

Nervenzelle des Schweinefleischs (siehe Abb.5d) ist kein ATP vorhanden, die Kalium-Natrium-Pumpe funktioniert nicht mehr, folglich können auch keine Aktionspotentiale mehr ausgelöst werden (vgl. Daumer, K./Hainz, R., 1979 S. 70 und Abb.8). Es erfolgt keine Signalverzerrung, die aber auftreten würde wenn die Verzerrung durch Kapazitäten hervorgerufen würde, denn die dafür verantwortlichen Zellwände sind noch unbeschädigt.

6. Entwicklung eines Sensors für lebendige Stoffe

Der Gedanke auf der Grundlage meiner Forschungsergebnisse einen „Sensor“ für lebendige Stoffe zu entwickeln ließ mich nicht mehr los.

6.1. Elektronischer „Sensor“

Ich überlegte, aus welchen Komponenten eine Schaltung aufgebaut sein müsste, die erkennt, ob der eingetauchte Gegenstand lebendig ist oder nicht. Die Schaltung müsste die Signale (empfangenes und gesendetes) vergleichen bzw. sie gegeneinander eliminieren. Das nun entstehende Signal würde bei lebendigen Stoffen eine abfallende Flanke haben, bei toten Stoffen nicht. Dies müsste die Schaltung erkennen. Lange überlegte ich, wie eine solche Schaltung zu realisieren wäre. Ich kam zu diesem Schluß:

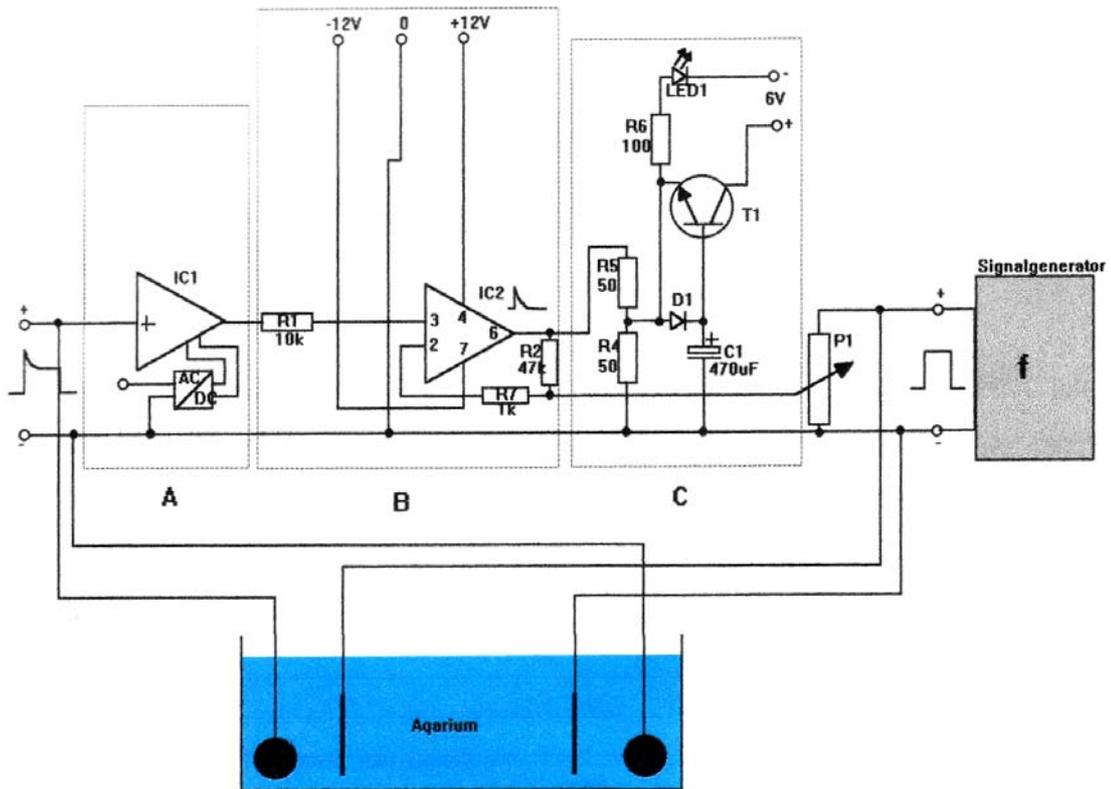


Abb.8: Sensorschaltung

Die Schaltung besteht im wesentlichen aus 3 Teilen:

- A: Der IC ist ein Verstärker mit sehr hochohmigem Eingang und einem Übersetzungsverhältnis von 1:1. Er dient dazu, das empfangene Signal zu stabilisieren, damit es nicht zusammenbricht.
- B: Nachdem mittels des Spannungsteilers P1 das ungestörte Empfangssignal zu Null kompensiert worden ist, ist die Schaltung B einsatzbereit. Durch die Kompensation wird erreicht, daß nicht das gesamte Signal, sondern nur der Signalpeak von belebten Stoffen verstärkt wird. Diese Verstärkung ist notwendig um das Eingangssignal (Peak) soweit anzuheben, daß es T1 durchschalten kann ($U_b > 600\text{mV}$). R2 und R7 bestimmen das Verstärkungsverhältnis.
- C: Das von der Schaltung B verstärkte Signal wird nun auf die Schaltung C gegeben. Diese ist so konstruiert, daß sie nur bei abfallender Flanke des von IC2 kommenden Signals die Leuchtdiode LED1 aufleuchten läßt. Sie funktioniert wie folgt:

Die Spannung am Ausgang von IC2 steigt und lädt über Diode D1 den Kondensator C1 auf. An C1 liegt also während des Aufladevorgangs eine kleinere Spannung als an R4. Wenn nun die von IC2 kommende Spannung abfällt ist die Spannung an C1 größer als an R4. Das hat die Folge, daß sich C1 nun über den Transistor entladen muß, da D1 sperrt. Dieser wird dabei durchgeschaltet, und die Leuchtdiode LED1 leuchtet.

6.2 „Sensor“ mittels EDV

Da meine Schaltung (siehe Kapitel 6.1.) doch sehr stör anfällig war, sann ich auf eine andere, stör unanfällige Lösung des Problems. Mir kam die Idee, mittels eines Computer-Interfaces und EDV das Problem zu lösen. Ein Computer-Interface steht mir in der Schule zur Verfügung. Jetzt muß ich aber noch das Programm für den Computer schreiben. Das ist mit Turbo-Pascal möglich. Das Programm sollte folgendermaßen vorgehen:

Zuerst sollte es die Differenz des gesendeten und des empfangenen Signals bilden. Dies sollte bei konstanter Sendefrequenz an mehreren Stellen im Verlauf eines Signals geschehen. Wenn nun die Differenzen im zeitlichen Verlauf des Signals größer werden (siehe Abb.5c und Abb.6), sollte das Programm signalisieren, daß sich ein lebender Stoff im Wasser befindet. Wenn die Differenzen jedoch kleiner werden (siehe Abb.5a, 5b und 5d), würde das bedeuten, daß sich kein lebender Stoff im Wasser befindet. Leider kam ich bis jetzt noch nicht dazu, ein Programm zu schreiben und die Lösung mittels EDV auszuprobieren. Ich hoffe aber, es am Wettbewerbstag vorführen zu können.

7. Literaturliste

1. Daumer, Karl u. Hainz, Renata Verhaltensbiologie,
München, 1979
2. N.N. ELEKTRONIC ACTUELL Magazin
2/94
3. Haas, Johannes Die Physiologie der Nervenzelle
Berlin, 1962
4. Pütz, Jean (Hrsg.) Experimente: Elektronik
Köln, 1977
5. Marguerre, Hans Bionik - von der Natur lernen
Berlin 1991
6. v. der Emde, G. u. Bleckmann, H. Der siebte Sinn schwach elektrischer Fische
in: Spektrum der Wissenschaft 1/1993
7. Zupanc, Günther K. H. Fische und ihr Verhalten
Melle, 1982
8. Zupanc, Günther K. H. Fische im Biologieunterricht
Köln, 1990