
Auswirkungen der Wasserqualität auf
die elektrischen Signale von
Apteronotus albifrons (LINNAEUS, 1766)

Diplomarbeit

vorgelegt am
Lehrstuhl für Limnologie
Prof. Dr. KARL-OTTO ROTHHAUPT
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Sektion,
Fachbereich Biologie,
Universität Konstanz

Bearbeitete Internet-Ausgabe

Konstanz, 27.12.2001

Rainer Moll

Dank

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei allen bedanken, durch die diese Diplomarbeit ermöglicht wurde:

Bei meinen Eltern, die mir durch ihre finanzielle und moralische Unterstützung das Studium erleichterten.

Bei Herrn Dr. RAINER BRETTHAUER, der mir diese Arbeit anvertraut hat, und mich auch nach seiner Pensionierung noch weiterhin betreut hat. Und, natürlich, für die vielen Zigarren und den Kaffee :)

Bei den Herren Prof. Dr. KARL-OTTO ROTHHAUPT und Prof. Dr. REINER ECKMANN, die durch ihre Anregungen die Vielfalt der Versuche bereichert haben.

Bei Herrn Dr. phil. Dipl. Inf. HENNING REETZ, der mir bei informationstechnischen Problemen zur Seite stand.

Bei Herrn Dipl. Phys. ANDREAS WUERL, dessen Treiber und Tips mir die Vorbereitungen erleichterten.

Bei Herrn Dipl. Ing. (FH) MATTHIAS SCHNEIDER, dessen Kenntnisse und Mithilfe mir während der Vorbereitungen bei der Auswahl der besten Elektroden halfen.

Bei Frau URSULA KLESS für die vielen Anregungen, den seelischen Beistand und die angenehme Zeit im Labor.

Euch allen vielmals Dank!



Dieses Dokument wurde in L^AT_EX2e erstellt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Schwach elektrische Fische	7
1.2	Die elektrischen Entladungen	10
1.3	Jamming Avoidance Response (JAR)	12
1.4	Motivation	12
2	Material und Methoden	13
2.1	Die Versuchsfische, <i>A. albifrons</i>	13
2.2	Hälterung der Tiere	14
2.3	Die Versuche	16
2.4	Das Versuchsaquarium	16
2.5	Vorbereitungen zum Versuch	18
2.6	Berechnung der Grenzleitfähigkeit ionischer Zusätze	19
2.7	Grundlagen zur Ermittlung der Regressionsgeraden in AAS	21
2.8	Die Signalübermittlung	22
2.9	Die Signalauswertung	24
2.10	Der Rechner	24
3	AAS — (<i>Apteronotus albifrons</i> <u>S</u>ignalauswertung)	25
3.1	Vom Fischsignal zur archivierten Messung	25
3.2	Die Werkzeugleiste	28
3.2.1	Der Beobachtungsmodus	28
3.2.2	Neue Meßreihe starten	28
3.2.3	Eine Messung laden	28
3.2.4	Originaldaten anzeigen	29

INHALTSVERZEICHNIS

3.2.5	Korrigierte (gefilterte) Originaldaten anzeigen	29
3.2.6	Durchschnittskurve anzeigen	29
3.3	Der Beobachtungsmodus	29
3.4	Neue Meßreihe initiieren	30
3.5	Die Messung	32
3.6	Messung laden (Simulationsmodus)	33
3.6.1	Schritt 1 (Daten laden)	36
3.6.2	Schritt 2 (Daten anzeigen)	36
3.6.3	Was zeigen die Displayfenster an?	38
3.7	Die Funktionen der Pulldown-Menüs	40
3.8	Das Kurvenoptionen Menü	40
3.9	Der Datenexport in AAS	42
3.10	Das Menü „GNUplot-konformer Datenexport“	43
3.11	Das Menü „Extras“	46
4	Ergebnisse	48
4.1	Vorgehensweise	48
4.2	Die Wellenform der Entladungen	49
4.3	Wellenformvariation beim gleichen Tier	50
4.4	Variation der Frequenz	55
4.5	Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Frequenz	56
4.5.1	Versuch 1 — Temperaturdifferenz 0.5° C — Fisch 1	56
4.5.2	Versuch 2 — Temperaturdifferenz 1.15° C — Fisch 5	57
4.6	Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform	59
4.6.1	24 Stunden Messung	59
4.6.2	6 Stunden Messung	61
4.6.3	KNO ₃ Messung	64
4.6.4	Vergleich zweier Versuche mit NaCl- und KNO ₃ -Zugabe	66
4.6.5	Versuche mit [O ₂]-Variation als Reiz	71
4.6.6	Durchschnittskurvendifferenzvariation zwischen NaCl- und O ₂ -Messung, Fisch 5	80
4.6.7	Charakteristische Kurvenformdifferenzvariation der Tiere	81

INHALTSVERZEICHNIS

5	Diskussion	83
5.1	Erkenntnisse zur Frequenz der Entladungen	83
5.2	Erkenntnisse zur Wellenform der Entladungen	84
6	Zusammenfassung	87
7	Literaturverzeichnis	89

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Schwach elektrische Fische

Schwach elektrische Fische können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden, zum einen die Gruppe der „Pulsform“-Typen, zum anderen die Gruppe der „Wellenform“-Typen. Zu den Pulsform-Typen gehören die Gattungen *Gymnotus*, *Raja* und *Gnathonemus*, zu den Wellenform-Typen die Gattungen *Gymnarchus*, *Eigenmannia* und *Apteronotus*. Werden die Signale hörbar gemacht, so hören sich die Entladungen der Pulsform-Typen knatternd, die der Wellenform-Typen wie ein Summen an. Deshalb werden sie auch als „Knatterer“ und „Summer“ bezeichnet (KRAMER, 1988) — auf der CD im Rückumschlag dieser Arbeit befindet sich die Sounddatei des Signals eines männlichen Tieres.

Die Tiere der verschiedenen Gattungen besiedeln ähnliche Lebensräume in der tropischen Klimazone (vgl. Abbildung 1.1 auf Seite 8). Interessanterweise sind die südafrikanischen Arten (Mormyriiformes [Osteoglossomorpha], Nilhechte) nicht direkt mit den südamerikanischen Arten (Gymnotiformes [Ostariophysi], Messeraale) verwandt, haben sich also konvergent entwickelt (KRAMER, 1988).

Die (Regenwald)-Flüsse, in denen schwach elektrische Fische leben, zeichnen sich durch einen extrem niedrigen Gehalt an Ionen aus. Verursacht wird dies durch die Pflanzen, die die Umgebung des Gewässers besiedeln und dort mit ihren Wurzeln Nährstoffe entziehen. In solchen Gewässern kann die Leitfähigkeit auf bis zu $6 \mu\text{S}/\text{cm}$ sinken, meist bewegt sie sich zwischen $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ und $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ (KRAMER, 1988). Konstanzer Leitungswasser, das im bundesweiten Vergleich

1.1 Schwach elektrische Fische

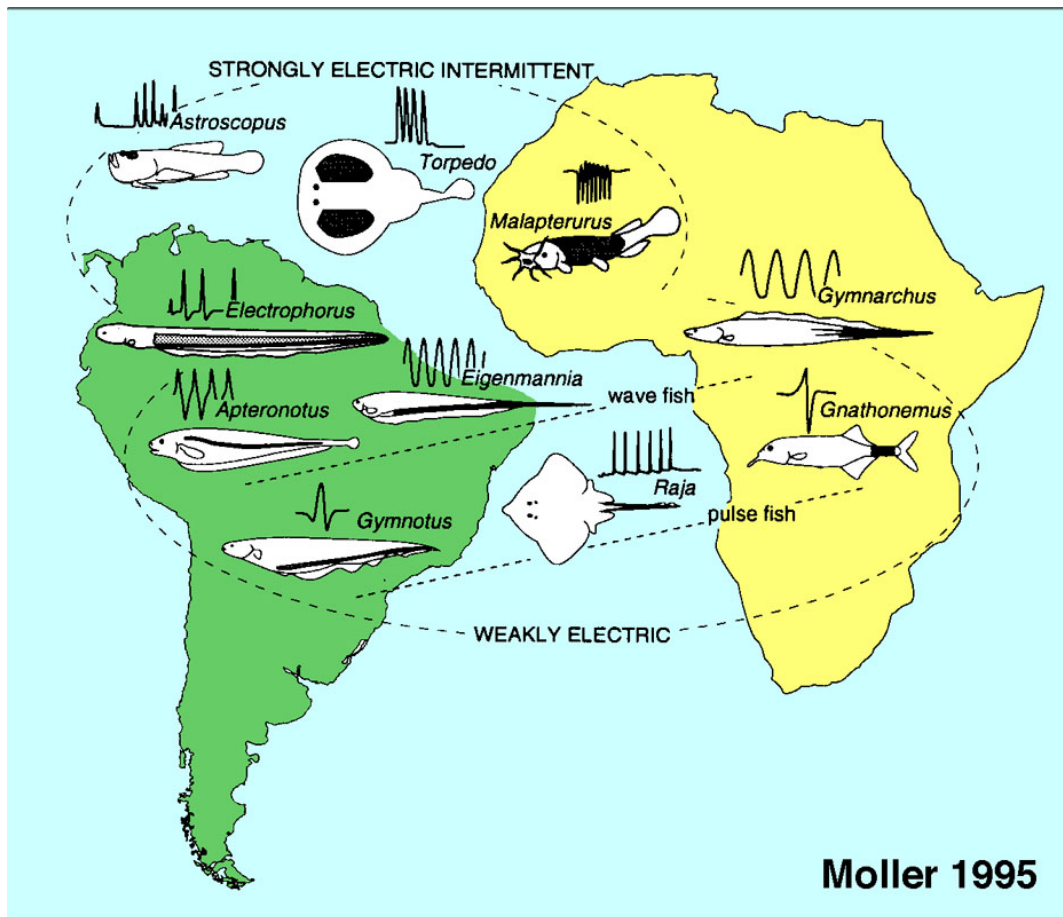


Abbildung 1.1: Übersicht über das Verbreitungsgebiet elektrischer Fische (NELSON, 2001a).

1.1 Schwach elektrische Fische

eine niedrige Leitfähigkeit aufweist, hat eine Leitfähigkeit von $320 \mu\text{S}/\text{cm}$, das Wasser aus Biberacher (a. d. Riß) Leitungen hat eine Leitfähigkeit von $664 \mu\text{S}/\text{cm}$. Vollentionisiertes Wasser weist einen Wert von etwa $1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf.

Die niedrige Leitfähigkeit des Wassers hat zur Entwicklung der elektrischen Organe der Tiere beigetragen, da es eine weiträumigere Ausdehnung des elektrischen Feldes ermöglicht als Wasser hoher Leitfähigkeit. Parallel dazu haben sich aufgrund des hohen Anteils an unlöslichen Lehm- und Tonbestandteilen die Augen der Fische zurückentwickelt. Zusätzlich haben sie Sinnesorgane entwickelt, mit denen sie ihre eigenen Impulse, sowie auch fremde elektrische Felder wahrnehmen können. Die Elektrozeporen sind eng verwandt mit dem Akustico-Lateralis-System, zu dem das Seitenliniensystem der Fische und Amphibien, das Gehörsystem sowie das Schweresinnes- und Beschleunigungssystem des Labyrinths gehören (ZUPANC, 1988). Die Entladungen des im Schwanz des Tieres lokalisierten elektrischen Organes baut ein den Körper umgebendes elektrisches Feld auf, welches über epidermale Elektrozeporen wahrgenommen wird (HARDER, 1972; BELL, 1990). Diese Entladungen ermöglichen z. B. die Ortung von Gegenständen in der unmittelbaren Umgebung (10 cm) und Artgenossen (bis ca. 3 m) (HEILIGENBERG, 1977; BASTIAN, 1990). Durch das elektrische Feld als Orientierungshilfe sind schwach elektrische Fische in der Lage, sich im Raum zu bewegen (Galvanotaxis).

Die Elektrozeporen können in 2 Klassen eingeteilt werden, die anhand morphologischer Merkmale leicht unterschieden werden können. Jedoch ist über ihre physiologischen Eigenschaften nichts bekannt (VISCHER et al., 1989). Nahe Objekte, deren elektrische Eigenschaften sich von denen des umgebenden Wassers unterscheiden, beeinflussen die örtlich gemessenen Entladungen des elektrischen Organs (EOD = electric organ discharge) (BULLOCK, 1982; VON DER EMDE, 1990). Der Fisch ist in der Lage, elektrisch leitende von nichtleitenden Gegenständen zu unterscheiden, darüber hinaus differenziert er zwischen ohmschen und kapazitiven Leiteigenschaften des Gegenstands (VON DER EMDE & RINGER, 1992). Nutzen die Tiere ihre elektrischen Signale zur Kommunikation, so geben sie damit Aufschluß über ihr Alter, Geschlecht, Art und Aufenthaltsort. Auf diese Art und Weise haben die schwach elektrischen Fische ihre Nische als nacht-aktive, mit Hilfe ihrer elektrischen Signale jagenden und sich orientierenden Wesen besiedelt.

1.2 Die elektrischen Entladungen

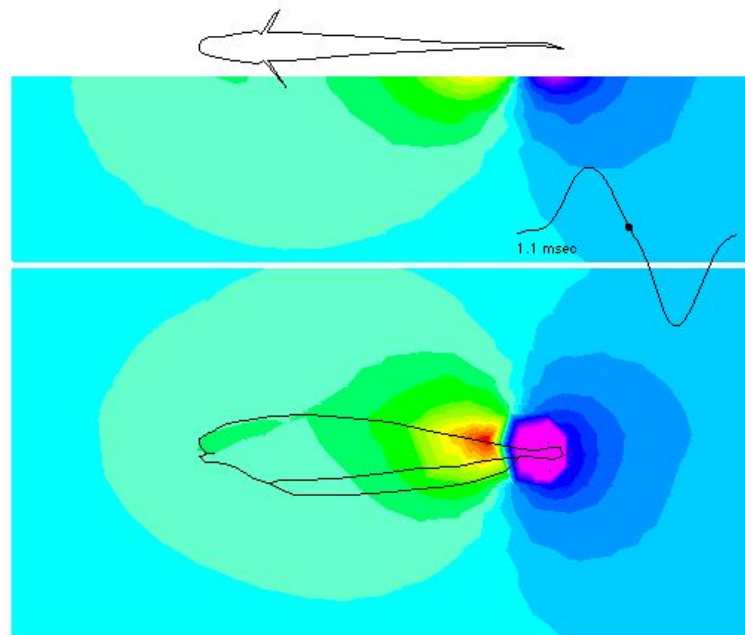


Abbildung 1.2: Wellenform und elektrisches Feld von *A. albifrons* (HUNTER, 1996a).

1.2 Die elektrischen Entladungen

Das erzeugte elektrische Signal der Puls-Typen unterscheidet sich charakteristisch von dem der Wellenform-Typen. Die Entladungen der Puls-Typen sind nicht kontinuierlich. Während der Entladung ist die Frequenz des Signals variabel. Bei den Wellenform-Typen hingegen hängt die Entladungsfrequenz von äußeren Einflüssen ab. Die meisten Messerfische (z. B. *Apteronotus*) zeichnen sich durch eine relativ konstante Entladungsfrequenz aus, die allerdings von äußeren Reizen beeinflusst wird. So erniedrigt sich die Frequenz bei fallender Temperatur, bei Temperaturerhöhung dagegen steigt die Frequenz an (ZUPANC, 1988). Bei *Eigenmannia* wurde ein geschlechtsspezifischer Frequenzunterschied der Entladungen beobachtet. So lagen die Entladungen geschlechtsreifer, männlicher Tiere bei 67 Hz, die von geschlechtsreifen, weiblichen Tieren bei 127 Hz. Die mittlere Entladungsfrequenz noch nicht geschlechtsreifer Tiere lag dazwischen, bei 93 Hz (ZUPANC, 1988). Ähnlich verhält es sich mit der Kurvenform, die sich bei weibli-

1.2 Die elektrischen Entladungen

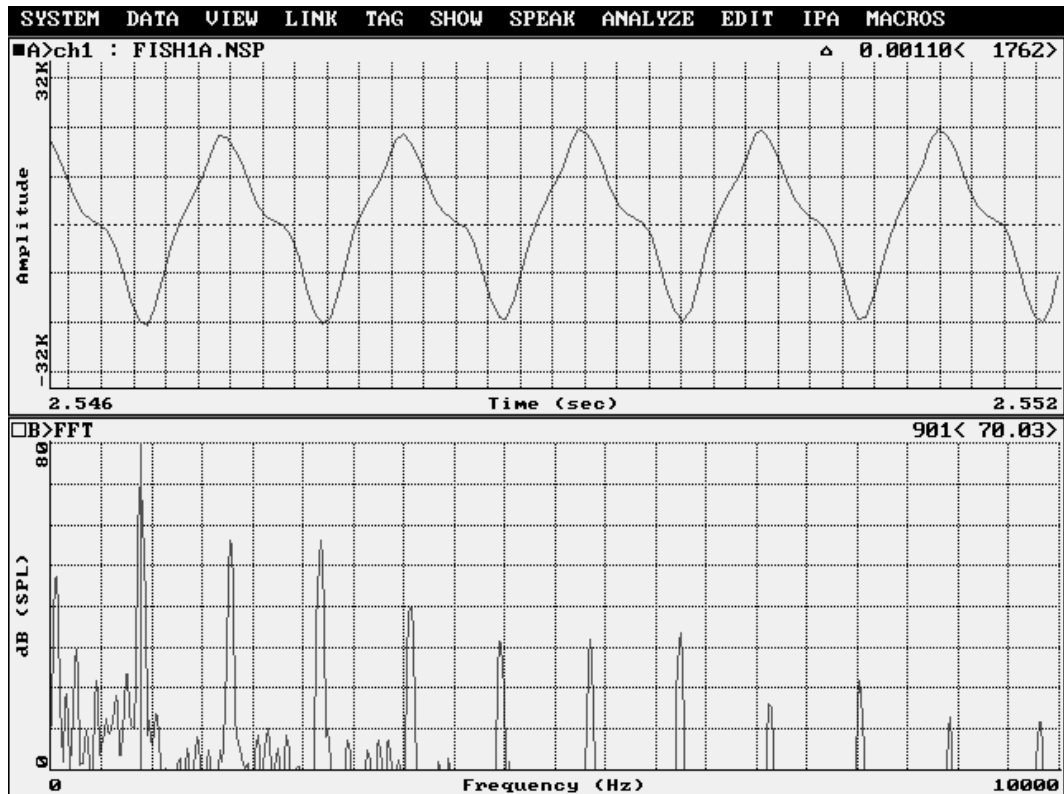


Abbildung 1.3: Kurvenform (oben) und Oberwellen (unten) eines männlichen Tieres der Art *A. albifrons*. ([Sounddatei](#))

In der unteren Bildhälfte ist das Signal per FFT (Fast Fourier Transformation) in seine Frequenzanteile zerlegt dargestellt. Man sieht deutlich die hohen Anteile an Vielfachen des Grundsignals (901 Hz).

chen und männlichen Tieren unterscheidet. Diese Unterschiede werden durch andere Oberwellengehalte bzw. Phasenverschiebungen der spektralen Komponenten erreicht (KRAMER & TEUBL, 1993). Bei männlichen Tieren von *Eigenmannia* hat man eine höhere Intensität der Oberwellen festgestellt als bei den weiblichen Vertretern dieser Art (KRAMER, 1988). Dies trifft auch für männliche Tiere der Gattung *Apteronotus* zu (vgl. Abb. 1.3, S. 11, untere Bildhälfte).

Man hat für Tiere der Gattung *Eigenmannia* nachgewiesen, daß sie geringe Veränderungen in der Kurvenform des Signals differenzieren können (KRAMER & OTTO, 1991). Auf der CD befindet sich eine Computeranimation des elektrischen Signals (HUNTER, 1996b).

1.3 Jamming Avoidance Response (JAR)

1.3 Jamming Avoidance Response (JAR)

Die „jamming avoidance response“ („Störung-Vermeidungs-Reaktion“ bzw. Frequenzabweichreaktion) der Messerfische, untersucht wurde *Eigenmannia*, wird als eine Schutzreaktion zugunsten ihres Elektroortungssystems angesehen. Dazu verändern die Tiere ihre Entladungsfrequenz, falls die Leistung ihres selbst erzeugten Feldes durch ein Störfeld mit geringem Frequenzunterschied gefährdet ist (KRAMER, 1988).

1.4 Motivation

Es hat sich gezeigt, daß schwach elektrische Fische in der Lage sind, Veränderungen der physikalischen Wasserparameter wahrzunehmen und dies — bewußt oder unbewußt — durch Veränderung ihrer Entladungscharakteristik signalisieren (LEWIS et al., 1992a, LEWIS et al., 1992b). Bisherige Arbeiten über schwach elektrische Fische beschränkten sich jedoch weitgehend auf die Bewertung von Frequenzveränderungen des Signals (LEWIS et al., 1992a; LEWIS et al., 1992b). Es ist jedoch bekannt, daß die Tiere zwischen verschiedenen Wellenformen diskriminieren können und daß sich die Signale von weiblichen und männlichen Tieren unterscheiden (KRAMER & OTTO, 1991).

Dies ermutigt dazu, die Wellenform der Entladungen unter verschiedenen Bedingungen genauer zu untersuchen. Der technische Anspruch eines solchen Vorhabens ist relativ hoch: Neben einem Oszilloskop mit GPIB-Schnittstelle wird ein Differenzverstärker und ein leistungsfähiger Rechner benötigt, der mit einer speziellen Schnittstelle zur Übertragung der Daten vom Oszilloskop ausgestattet ist.

Desweiteren ist zur Erfassung, Archivierung und Auswertung der Daten ein Programm nötig. Programme zur Frequenzspektrumsanalyse gibt es zwar, jedoch sind diese sehr teuer (ca. 10000 Mark) und bieten außerdem nicht die Möglichkeit, über einen längeren Zeitraum Signale aufzuzeichnen und in der erwünschten Art und Weise aufzubereiten. Deshalb wurde vor den Versuchen ein entsprechendes Programm erstellt, AAS (A. albifrons Signalauswertung).

Kapitel 2

Material und Methoden

2.1 Die Versuchsfische, *A. albifrons*

Bei den Fischen handelte es sich um Tiere aus einer örtlichen Zoohandlung. Da die Zucht dieser Tiere bisher ohne Erfolg war, bekommt man für gewöhnlich Wildfänge. Es handelte sich um 6 Tiere, zwischen 10 und 12 cm Körperlänge. Ausgewachsen und in freier Natur werden diese Fische 30 – 60 cm lang.

Die Art *A. albifrons* wurde ausgewählt, da die Tiere dieser Spezies, bis auf die Paarungszeit, striktes Revierverhalten aufweisen. Ein Artgenosse, der sich in das Revier eines anderen begibt, muß mit Attacken rechnen, bis sich der Stärkere behauptet und das Revier für sich beansprucht (dabei spielt das Geschlecht des Tieres scheinbar eine untergeordnete Rolle). Dies brachte einerseits für die Hälterung



Abbildung 2.1: *A. albifrons* (NELSON, 2001b).

2.2 Hälterung der Tiere

Probleme mit sich, da für jedes Tier ein eigenes Aquarium bereitgestellt werden mußte. Andererseits sollte das Tier durch den alleinigen Aufenthalt im Testaquarium weniger eingeschüchtert sein als ein Schwarmfisch, z. B. *Eigenmannia*.

Gefüttert wurden die Tiere mit lebenden roten und weißen Mückenlarven, tiefgefrorenen roten, weißen und schwarzen Mückenlarven sowie ab und zu Trockenfutter.

2.2 Hälterung der Tiere

Die Tiere wurden anfangs in Aquarien der Abmessung (B x H x T) 250 mm x 300 mm x 496 mm gehalten (Volumen ca. 30 Liter). Die Aquarien standen nebeneinander und waren über Glasröhren miteinander verbunden. Das erste und letzte Aquarium war an eine Pumpe (6,5 Liter pro Minute) angeschlossen. Die Pumpe sog aus dem sechsten Aquarium Wasser an und pumpte dieses durch einen Topffilter zurück ins erste Aquarium. So bildete das System einen geschlossenen Wasserkreislauf, der für gleichmäßigen Durchfluß und Filterung sorgte. Zudem konnte durch die Verbindung der sechs Aquarien erreicht werden, daß in allen Aquarien die gleiche Wasserqualität und -temperatur herrschte. Die Aquarien befanden sich in einem vollklimatisierten Raum, die Temperatur wurde auf 27.5° C, die Luftfeuchtigkeit auf 50 % eingestellt. Daraus resultierte eine Wassertemperatur von 25.0 (± 0.5)° C. Die Aquarien wurden mit jeweils einem großen Versteck (große Tonröhre), einem kleineren Versteck (kleine Tonröhre oder Tontunnel) und einem zusätzlichen Gegenstand (Stück Lavagestein, Blumentopf, Holz, (Kunststoff-)Gardinenstück) ausgestattet, der von Zeit zu Zeit zwischen den Aquarien ausgetauscht wurde.

Als die Tiere größer wurden (ca. 17 cm Länge), wurden sie in Aquarien der Größe (B x H x T) 400 mm x 420 mm x 750 mm (Volumen ca. 115 Liter) umgesetzt. Das Fischwasser wurde aus 1/3 Bodenseewasser (aus 60 m Tiefe, Analyseblatt vgl. HTML-Dokument auf der CD) und 2/3 vollentionisiertem Wasser gemischt und in Fässern zu je 60 Liter im Klimaraum aufbewahrt. Das Wasser wurde wöchentlich einer Analyse unterzogen, dazu wurden Reagenziensätze („Aquamerck“) der Firma Merck, Darmstadt verwendet. In Tabelle 2.1 auf Seite 15 sind die Ergebnisse der Wasseranalysen zusammengefaßt.

2.2 Hälterung der Tiere

Tabelle 2.1: Wasserwerte der Hälterungsbecken

Carbonhärte [mval/l]	1.8 (−0.1)
SBV [mval/l]	0.643 (−0.036)
Nitrit [mg/l]	< 0.01
Nitrat [mg/l]	5 – 15
O₂ [mg/l]	7 – 8
pH-Bereich	6.7 (±0.3)
Leitfähigkeit [μ S/cm]	180 (±15)

Mit zunehmender Größe der Fische wurden vermehrt Protein-Metaboliten im Aquarienwasser akkumuliert, so daß die Wasserwechsel nicht mehr ausreichten, um den Nitratgehalt unter 50 mg/l zu halten. Aus diesem Grund wurde ein Nitrat-austauscher - Granulat in den Filterkreislauf integriert, welches in der Lage war, das $[\text{NO}_3^-]$ von 24 Litern Wasser pro Stunde gegen $[\text{Cl}^-]$ auszutauschen. Es handelte sich hierbei um 1 Liter „Anionenaustauscher ES-32“ der Firma „Otto & William Stössel“ in 65558 Heistenbach/Diez. Der Austauscher konnte bei Bedarf durch (optional mehrmaliges) Befüllen mit Kochsalzlösung (250 Gramm Kochsalz auf 1,5 Liter Leitungswasser) regeneriert werden. Nach ca. 30 Minuten konnte die Flüssigkeit mit Leitungswasser ausgespült werden.

Seit der Verwendung des Filters wurde das Hälterungswasser aus 5/6 voll-entionisiertem und 1/6 Bodenseewasser gemischt. Dadurch wurde der durch den Ionenaustausch bedingte Leitfähigkeitsanstieg kompensiert.

Über zwei Zeitschaltuhren (zeitversetztes Ein- und Ausschalten) wurde die Beleuchtungs- und damit Aktiv-/Ruhephase der Tiere auf je zwölf Stunden eingestellt. Dies entspricht den Beleuchtungszeiten der natürlichen Umgebung. Gefüttert wurde täglich vor Eintritt der Dunkelheit. Vor dem Füttern wurde mit einem Schlauch mittels Unterdruck Unrat und Kot der Tiere entfernt. Dadurch wurde verhindert, daß durch mechanischen Zerfall und biologischen Abbau die Nitrat-/Nitritkonzentration im Wasser unnötig schnell anstieg.

2.3 Die Versuche

2.3 Die Versuche

Für die Versuche wurden dem Kreislauf jeweils ca. 30 Liter Wasser entnommen, mit dem das Versuchsaquarium sowie ein Notfallbecken befüllt wurden. Das Notfallbecken diente nach dem Versuch für den Rücktransport des Fisches, da es „unbehandeltes“ Wasser enthielt. Am Abend vor dem Versuch wurde das Wasser ins Testaquarium gefüllt, damit es sich temperieren konnte. Am nächsten Tag wurde der Fisch in einer schwarzen (kein Licht!) Kunststofftasche vom Klimaraum ins Labor transportiert. Bei den Messungen wurde das Becken zusätzlich belüftet, um die Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten. Bei den Sauerstoffversuchen (Verdrängung des Sauerstoffs durch Stickstoff) wurde eine Thermoskanne mit flüssigem Stickstoff befüllt und mit einem Gummistopfen, der zwei Anschlüsse hatte, versehen. Ein Anschluß führte zu dem Ausströmer im Aquarium, der andere diente der Druckregulation.

Bei den Messungen wurde das Wasser zusätzlich mittels einer Aquariumpumpe (Eheim, Typ 1026) umgewälzt. Im Fall der Temperatur- und Sauerstoffmessungen wurde dadurch die Meßsonde des Meßgeräts (WTW, Multiline P4) kontinuierlich mit Wasser umspült.

2.4 Das Versuchsaquarium

Das Versuchsaquarium (vgl. Abbildung 2.2 auf Seite 17) mit den Abmessungen (250 mm x 300 mm x 496 mm) enthielt ein Versteck (große Tonröhre), zwei Meßelektroden und eine Elektrode zur Erdung. Die Position und Anordnung der Elektroden war bei allen Versuchen gleich. Das Versuchsaquarium wurde mit ca. 25 Litern Wasser befüllt, welches zuvor dem Fischwasserbestand der Hälterungsbecken im Klimaraum entnommen wurde. Das Aquarium stand auf Kunststoffschraubdeckeln (als Abstandshalter) in einem größeren Aquarium, das ebenfalls geerdet war. Das größere Aquarium (400 mm x 420 mm x 750 mm) war mit Leitungswasser gefüllt und diente als Wasserbad sowie zur elektrischen Abschirmung. Es stand auf einer Styroporplatte, dazwischen befand sich eine Heizmatte (Hersteller: Thermolux, Heizleistung: 200 W). Im Wasserbad befand sich außerdem ein Heizstab (Hersteller: Jäger, Heizleistung: 100 W), der die Temperatur mit einer Toleranz von 0.15° C konstant hielt.

2.4 Das Versuchsaquarium

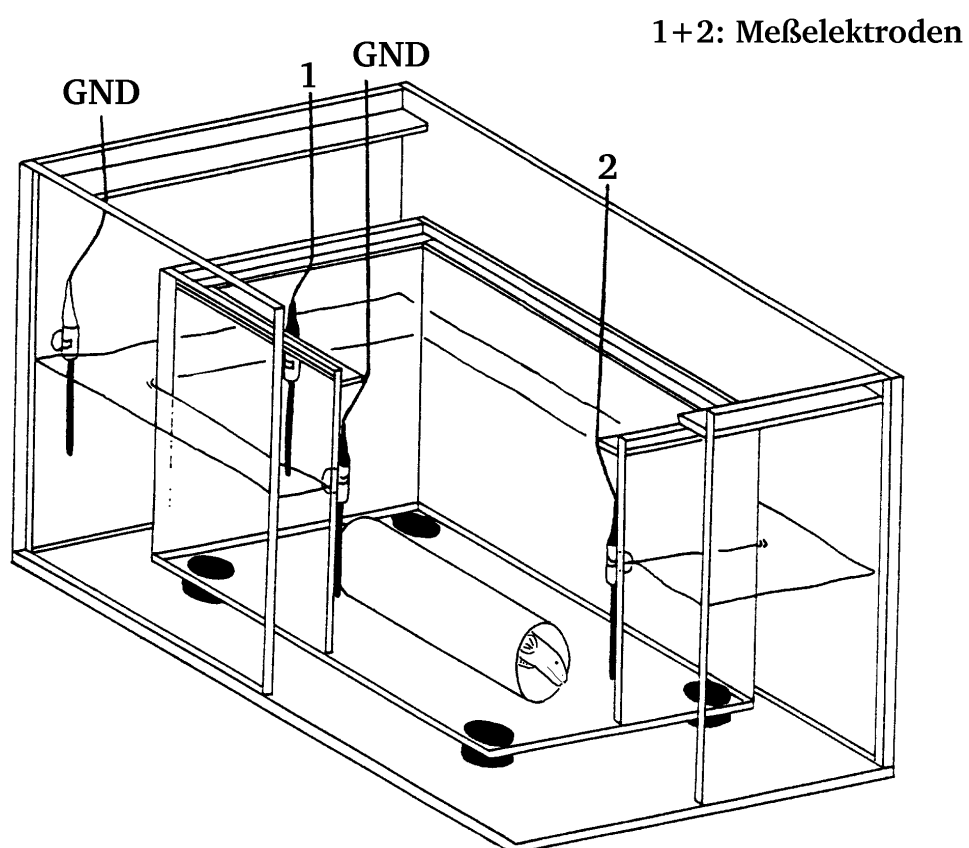


Abbildung 2.2: Das Versuchsaquarium mit den Erdungselektroden (GND) und den beiden Meßelektroden (1, 2).

2.5 Vorbereitungen zum Versuch

Vor den eigentlichen Versuchen mit Fischen wurde das System mit einem Signalgenerator (Tektronix FG 501) getestet. Dieser bietet die Möglichkeit, verschiedene Kurvenformtypen (Sinus, Sägezahn, Rechteck) auszuwählen und mit beliebiger Frequenz und Wellenform zu generieren. So wußte ich genau, welches Signal ich zu erwarten hatte. Mit dem von Fischen generierten Signal wäre eine Kalibrierung des Rechners nicht möglich gewesen. Auch vor der Anwendung einer neuen Testsubstanz kam der Signalgenerator zum Einsatz: Die Testsubstanz bzw. der Reiz wurde in der erwünschten Konzentration zugegeben bzw. angewandt, und es konnte am Rechner verfolgt werden, ob sich das Signal veränderte. Da das vom Signalgenerator erzeugte Signal konstant ist, hätte einer Veränderung des gemessenen Signals ein systematischer Fehler zu Grunde gelegen. So konnte genau ermittelt werden, ob die Anwendung eines Reizes eine technisch bedingte Veränderung hervorruft. Weder Phasenverschiebungen noch unterschiedliche Hemmung oder Verstärkung einzelner Oberschwingungen des Signals konnten im Versuch mit dem Signalgenerator festgestellt werden. Als Effekt trat jedoch nach Zugabe von Salzen eine Verringerung der Amplitude des Signals auf. Das rührt daher, daß mit der Zugabe von Salzen eine Erhöhung der Leitfähigkeit einhergeht. Dies hat zur Folge, daß bei gleichbleibendem Signal die Ausdehnung des elektrischen Feldes verringert wird und deshalb die Feldstärke im Bereich der Meßelektroden geringer ist. Die Stärke der Störungen bleibt jedoch gleich, da sie nicht im Versuchsbecken, sondern auf dem Weg zu Verstärker/Oszilloskop ihren Ursprung haben. Die geringere Ausdehnung des Signals und die gleichbleibende Stärke der Störungen haben wiederum zur Folge, daß Signale, die nach der Zugabe von Salzen gemessen werden, bei der Skalierung in y-Richtung mehr verstärkt werden müssen als die Signale zu Versuchsbeginn und daher generell schlechter bewertet werden, weil der Anteil der Störungen größer ist. Ein einfaches Rechenbeispiel: Der Anteil des Fischsignals sei vor der Leitfähigkeitsänderung 8 mV und 2 mV kämen durch äußere Störungen (z. B. Monitorstrahlung, Strahlung von elektrischen Leitungen) dazu. Dann beträgt der Anteil des Fischsignals 80 %, der der Störungen 20 %. Beträgt nun nach einer Leitfähigkeitsänderung die gemessene Spannung des Fischsignals nur noch 3 mV bei einem gleichbleibenden, zusätzli-

2.6 Berechnung der Grenzleitfähigkeit ionischer Zusätze

chen Anteil von 2 mV Störungen, dann hat sich damit der prozentuale Anteil der Störungen auf 40 % erhöht. Allerdings entspricht dieser technische Nebeneffekt einer stufenartigen Verschiebung („Shift“) und hebt sich dadurch von Veränderungen der Kurvenform, die durch den Fisch verursacht wurden, ab.

Eine mögliche Hypothese ist, daß der Fisch eine Zunahme der Leitfähigkeit durch das Schrumpfen seines elektrischen Feldes bemerkt, da sich dadurch seine „Sichtweite“ verringert. Um dem entgegenzuwirken, könnte der Fisch die Spannung seiner Signale erhöhen. Da sich das Signal aus unterschiedlichen Anteilen verschiedener Frequenzen (Oberwellen) zusammensetzt, wäre es möglich, daß diese Anteile nicht proportional zueinander verstärkt werden und daraus eine Kurvenformänderung resultieren müsste. Der Effekt der unterschiedlichen Verstärkung einzelner Oberwellengehalte könnte durch das Vorhanden- bzw. Nichtvorhandensein diverser Reize (Lichtreiz, Fütterung, Leitfähigkeitsänderung, Änderung des Sauerstoffgehalts) beeinflusst werden.

2.6 Berechnung der Grenzleitfähigkeit ionischer Zusätze

Es folgt ein Rechenbeispiel zur Berechnung der zuzusetzenden Menge an NaCl, um eine definierte Leitfähigkeitsänderung ($\Delta\lambda$) von $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ einzustellen. Andere ionische Zusätze konnten auf die gleiche Art und Weise behandelt werden. (Werte aus „Elektrochemie — Grenzleitfähigkeit der Ionen“, (BUTT, 2000)):

$$\text{Grenzleitfähigkeit}_{[\text{Na}^+]} : 50.1 \frac{\text{cm}^2}{\Omega * \text{mol}}$$

$$\text{Grenzleitfähigkeit}_{[\text{Cl}^-]} : 76.4 \frac{\text{cm}^2}{\Omega * \text{mol}}$$

2.6 Berechnung der Grenzleitfähigkeit ionischer Zusätze

$$\begin{aligned}\text{Grenzleitfähigkeit}_{\text{NaCl}} &= \text{Grenzleitfähigkeit}_{[\text{Na}^+]} + \text{Grenzleitfähigkeit}_{[\text{Cl}^-]} \\ &= (50.1 + 76.4) \frac{\text{cm}^2}{\Omega * \text{mol}} \\ &= 126.5 \frac{\text{cm}^2}{\Omega * \text{mol}} \\ &= 126.5 \frac{\text{mS}}{\text{cm} * \text{M}}\end{aligned}$$

Erwünscht sei eine Leitfähigkeitsänderung ($\Delta\lambda$) von $200 \mu\text{S}/\text{cm}$:

$$\begin{aligned}\frac{1}{c} &= \frac{126.5 \text{E}^{-3} \text{S} * \text{cm}}{\text{cm} * \text{M} * \text{S} * 200 \text{E}^{-6}} \\ &= \frac{632.5}{\text{M}} \\ \Rightarrow c &= \mathbf{1.58 \text{ mM}}\end{aligned}$$

2.7 Grundlagen zur Ermittlung der Regressionsgeraden in AAS

Es müssen also pro Liter

$$\begin{aligned}c * M_{g(\text{NaCl})} &= 1.58 \frac{\text{mmol}}{\text{l}} * 58.44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \\ &= 92.4 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ NaCl}\end{aligned}$$

zugegeben werden, um die Leitfähigkeit (λ) um $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ zu steigern. Für den Versuch muß noch die im Testaquarium befindliche Wassermenge ermittelt werden, damit man die benötigte Zusatzmenge berechnen kann.

2.7 Grundlagen zur Ermittlung der Regressionsgeraden in AAS

AAS (A. albifrons Signalauswertung) kann für die qualitative Wellenformbewertung sowie für den Frequenzverlauf Regressionsgeraden berechnen, die dann mit Startscript für GNUplot zur weiteren Bearbeitung in Dateien ausgegeben werden. Die der Berechnung zugrunde liegenden mathematischen Zusammenhänge (ZÖFEL, 1988) sind nachfolgend aufgeführt:

Gesucht wird ein objektives Verfahren zur Ermittlung der Geradengleichung

$$y = b * x + a$$

2.8 Die Signalübermittlung

mit der Steigung b und dem Ordinatenabschnitt a . (...) Nach GAUSS ist die Regressionsgerade diejenige Gerade, für welche die Summe der Quadrate der Abweichungen aller Punkte von dieser Geraden ein Minimum wird. Gemeint sind dabei die Abstände parallel zur Ordinate, so daß es bei der Bestimmung des Regressionskoeffizienten von wesentlicher Bedeutung ist, welche der beiden gegebenen Variablen man auf der Abszisse (x -Achse) und welche man auf der Ordinate (y -Achse) aufträgt. Die Formel zur Bestimmung des Regressionskoeffizienten lautet:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}))}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(...)

Der Ordinatenabschnitt bestimmt sich nach der Berechnung von b zu

$$a = \bar{y} - b * \bar{x}$$

2.8 Die Signalübermittlung

Als Meß- und Erdungselektroden wurden Ferritstäbe verwendet. Diese wurden an abgeschirmte BNC-Leitungen angelötet und mit Silicon und Parafilm isoliert und abgedichtet. Das Signal der Elektroden wurde an den Differenzverstärker (Eigenbau von MICHAEL VAN DER WALL) weitergegeben und an das Oszilloskop (Tektronix TDS 350) weitergeleitet. Der Differenzverstärker kann 10-, 100- und 1000fach verstärken. Das daraus resultierende Signal des gleichen Fisches unter gleichen Bedingungen unterscheidet sich jedoch bezüglich der Wellenform (vgl. Abb. 2.3, S. 23). Dieser Effekt ergibt sich dadurch, daß der Verstärker nur bis zu einer bestimmten Höchsfrequenz originalgetreu verstärkt, wird dieser Frequenzbereich überschritten, so fehlen diese höheren Frequenzen im verstärkten Signal. Dadurch verändert sich die Wellenform des Signals da hochfrequente, (harmonische) Oberwellengehalte der Kurve wie bei einem low-pass-Filter verschwinden. Dies wird umso deutlicher, je größer der Verstärkungsfaktor ist (siehe hierzu Abbildung 2.3, Seite 23).

Das Oszilloskop bot ebenfalls die Möglichkeit, die Differenz zweier Kanäle zu verstärken, jedoch nur für Spannungen oberhalb 1 V. Die Entscheidung war, den

2.8 Die Signalübermittlung

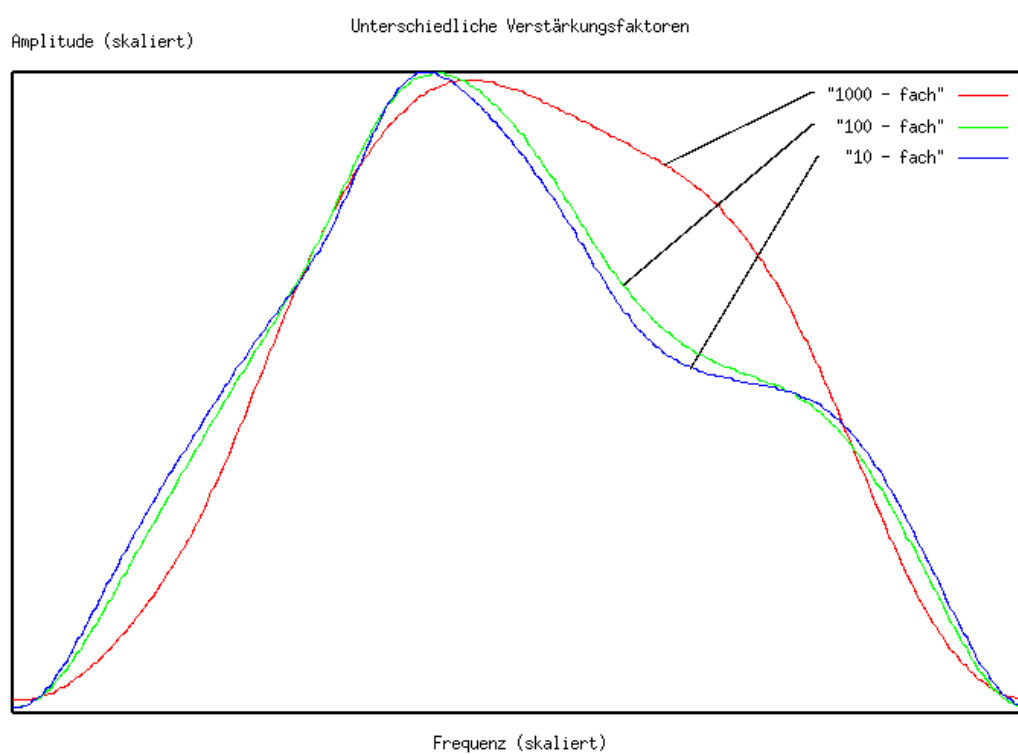


Abbildung 2.3: Das Resultat der 1000-, 100- und 10-fachen Verstärkung des Fischsignals mit dem 2-Kanal-Differenzverstärker.

2.9 Die Signalauswertung

Differenzverstärker zwar zu verwenden, aber ausschließlich mit der geringsten Verstärkungsstufe, 10-fach, zu arbeiten. Somit wurde gewährleistet, daß der in den Messungen enthaltene Fehler immer derselbe ist. Eine mit Hilfe von Dr. HENNING REETZ (Henning.Reetz@uni-konstanz.de) ermöglichte Messung der Signale per DAT-Recorder und Ansicht derselben mittels eines Computerprogramms zur Frequenzanalyse ergab, daß der bei 10-facher Verstärkung entstehende Fehler vernachlässigbar ist.

2.9 Die Signalauswertung

Die gemessenen Kurven gelangten vom Oszilloskop per GPIB-Schnittstelle in den Rechner, der für diesen Zweck mit einer entsprechenden GPIB-Karte ausgestattet wurde. Der Treiber für die GPIB-Karte konnte direkt von ANDREAS WUERL (Andreas.Wuerl@uni-konstanz.de) übernommen werden, für das Oszilloskop habe ich ein eigenes Treibermodul programmiert welches die erforderlichen Funktionen beherrscht und im Hauptprogramm AAS integriert seinen Dienst leistet. Da der Funktionsumfang des Programms recht umfangreich ist, widme ich diesem Thema ein eigenes Kapitel (Kapitel 3).

2.10 Der Rechner

Die wichtigsten Bestandteile des Rechners:

- Hauptplatine: ASUS — K7M (5PCI/1ISA)
- Prozessor: 850 MHz — AMD Athlon
- RAM: 256 MB

Das Betriebssystem der Wahl war Linux (SuSE 7.1), da sämtliche Bibliotheken (Standard-gcc, Qt) und Programme (Editoren, Compiler) frei zur Verfügung stehen.

Kapitel 3

AAS — (*Apteronotus albifrons* Signalauswertung)

3.1 Vom Fischsignal zur archivierten Messung — das Funktionsprinzip

Wenn man die vom Oszilloskop aufgezeichneten Signale betrachtet, so fällt auf, daß sich die Amplitude des Signals je nach Position des Fisches ändert. Ebenso ändert sich der Triggerpunkt und die Polarität des Signals, wenn sich der Fisch umdreht. Von einer Fixierung der Fische wurde aber zugunsten der Bewegungsfreiheit der Tiere abgesehen. Zusätzlich bietet die elektronische Aufzeichnung viele weitere Vorteile, auf die später eingegangen wird.

Die Grundidee ist einfach: Das Programm soll die Signale kontinuierlich aufzeichnen, verarbeiten und in einer übersichtlichen Form wiedergeben können. Dies sollte durch Skalieren des Signals in x- und y-Richtung auf eine vorgegebene Ausdehnung möglich sein. Dazu wird Periodenlänge und Amplitude des Signals ermittelt sowie ein Multiplikationsfaktor für die x- und y-Richtung berechnet. In der oberen Fensterhälfte werden die Originaldaten dargestellt, der blaue Rahmen repräsentiert die für Frequenz und Amplitude gefundenen Werte (die in Abb. 3.1 auf S. 26 dargestellte Messung zeigt ein vom Frequenzgenerator generiertes Signal).

An dieser Stelle findet eine interne Filterung statt, das Programm verwirft Messungen, deren Frequenz bzw. Amplitude z. B. aufgrund von überlagerten Störungen nicht genau ermittelt werden können.

3.1 Vom Fischsignal zur archivierten Messung

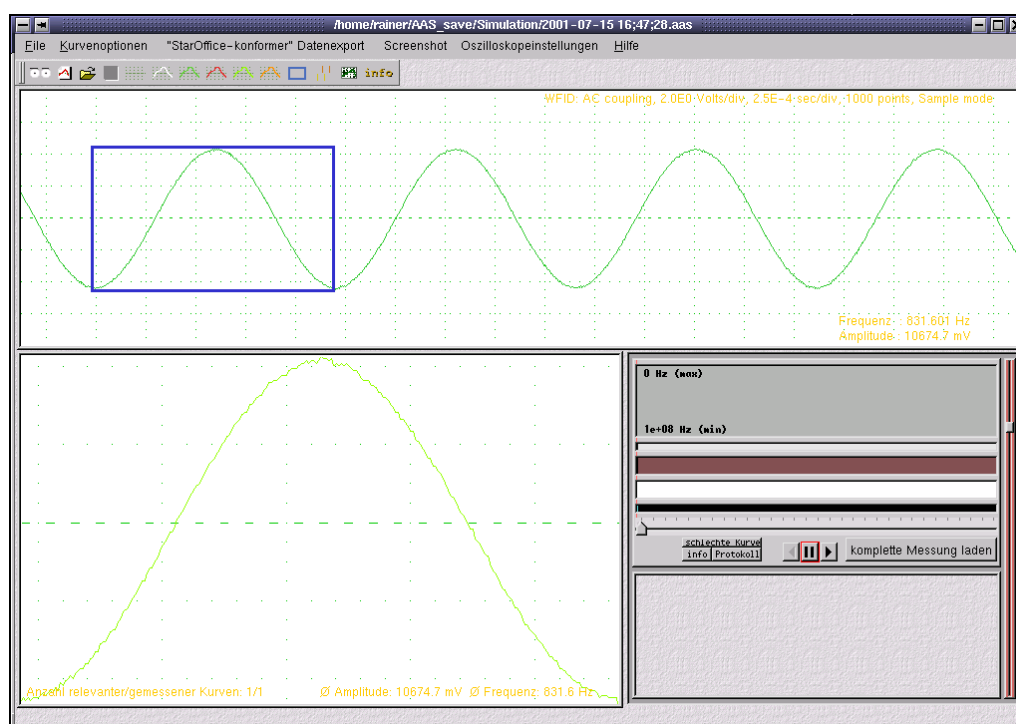


Abbildung 3.1: Eine Sinuskurve (Frequenzgenerator), der blaue Rahmen (obere Bildhälfte) repräsentiert die gefundenen Werte für Frequenz (1/Periodenlänge) und Amplitude. In der unteren Bildhälfte ist das Signal skaliert dargestellt.

3.1 Vom Fischsignal zur archivierten Messung

Das Fenster mit den Originaldaten enthält rechts oben zusätzliche Informationen über die Oszilloskopeinstellungen („WFID: AC coupling“ = Wechselstrom, „2.0E0 Volts/div“ = 2 Volt pro Kästchen, „2,5E-4 sec/div“ = 250 μ sec pro Kästchen, „1000 points“ = 1000 Meßpunkte pro Messung, „Sample mode“ = Oszilloskop übermittelt Daten im sample-mode), rechts unten in diesem Fenster finden sich Angaben über Frequenz und Amplitude der momentan dargestellten Kurve, hier 831.601 Hz und ca. 10.67 V.

Links unten befindet sich ein Fenster, in dem die skalierten Daten dargestellt werden. Es werden die Originaldaten sowie optional auch die Durchschnittskurve, die während der Messung aus den Originaldaten bis zur Zugabe eines Zusatzes errechnet wird, angezeigt. In diesem Wiedergabefenster steht links unten die absolute Anzahl der aufgezeichneten Messungen, daneben die Anzahl der zur Berechnung der Durchschnittskurve verwendeten Kurven („Anzahl relevanter/gemessener Kurven“). Rechts daneben stehen Angaben über die durchschnittliche Amplitude sowie der durchschnittlichen Frequenz. Es gibt zwei Möglichkeiten weshalb eine Kurve nicht zur statistischen Auswertung herangezogen wird:

- (1) Die Amplitude ist sehr schwach und müsste deshalb stark vergrößert werden. Dadurch würde aber der Anteil der Störungen, der absolut gesehen immer gleich groß ist, stark in die Berechnung der Durchschnittskurve einfließen.
- (2) Die Frequenz kann aufgrund äußerer Störungen nicht genau ermittelt werden.

Wird auf die Bewertung solcher Kurven verzichtet, so gehen dadurch bis zu 10 % der Einzelmessungen verloren. Dies ist aber zu rechtfertigen, da diese Kurven nicht auswertbar sind und immer noch genügend Kurven zur statistischen Auswertung verbleiben. Eine Meßreihe umfaßt zwischen 3000 und 4000 Einzelmessungen zu je 1000 Datenpunkten.

Neben dem Fenster (Abb. 3.1, S. 26) mit den skalierten Daten befindet sich ein Dialogfeld; über dieses kann die Wiedergabe einer Messung gesteuert werden. Ganz oben auf dem Bild befinden sich auch Dialogelemente wie Menüleiste („File“, „Kurvenoptionen“, . . .) und Toolbar („Werkzeugleiste“), deren wichtigste Funktionen ich anschließend vorstellen werde.

3.2 Die Werkzeugleiste

3.2 Die Werkzeugleiste (Toolbar)

Die Dialogflächen der Werkzeugleiste können durch Anklicken aktiviert werden. Bereiche der Werkzeugleiste, deren Betätigung eine Aktion auslöst, sind in den Abbildungen (Abb. 3.2 bis Abb. 3.7) rot umrandet. An dieser Stelle werden die Funktionen der Werkzeugleiste nur kurz angesprochen, später wird näher auf diese Funktionen eingegangen.

3.2.1 Der Beobachtungsmodus

Wird die gekennzeichnete Fläche angeklickt, so wird in den „Beobachtungsmodus“ gewechselt. Ein neues Dialogfenster erscheint, in dem verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, die für die Aufzeichnung der Daten übernommen werden (vgl. Abschnitt 3.3, S. 29).



Abbildung 3.2: Der Beobachtungsmodus.

3.2.2 Neue Meßreihe starten

Durch Anklicken dieser Dialogfläche wird das Vorbereiten einer neuen Messung aktiviert. Sind alle notwendigen Daten eingegeben, startet die Messung (vgl. Abschnitt 3.4, S. 30).



Abbildung 3.3: Neue Messung initiieren.

3.2.3 Eine Messung laden

In diesem Modus wird der Datensatz einer abgeschlossenen Messung geladen. Dabei verhält sich das Programm so, als fände die Messung momentan statt (Simulationsmodus, vgl. 3.6, S. 33 ff.).



Abbildung 3.4: Eine Messung laden.

3.3 Der Beobachtungsmodus

3.2.4 Originaldaten anzeigen

Wird diese Fläche angeklickt, so werden die Original-Rohdaten der aktuellen Meßkurve sowohl



Abbildung 3.5: Originaldaten ein-/ausblenden.

im Original Datenfenster, als auch im Fenster mit den skalierten Kurven angezeigt. Zu beachten ist, daß diese „hinter“ der Kurve der korrigierten Rohdaten dargestellt wird und deshalb größtenteils von dieser überlagert ist.

3.2.5 Korrigierte (gefilterte) Originaldaten anzeigen

Das Programm filtert grobe Meßfehler aus dem Datensatz, diese Kurve repräsentiert die korrigierten Daten. Auch diese Kurve erscheint in beiden Fenstern.



Abbildung 3.6: Korrigierte Daten anzeigen.

3.2.6 Durchschnittskurve anzeigen

Wird diese Fläche angeklickt, so wird im Fenster mit den skalierten Daten die



Abbildung 3.7: Durchschnittskurve ein-/ausblenden.

Durchschnittskurve der bisher gemessenen, für „gut“ befundenen Kurven gezeichnet. Für diese Dialogflächen gilt: Werden sie nochmals gedrückt, so wird die jeweilige Kurve wieder gelöscht.

3.3 Der Beobachtungsmodus

Im Beobachtungsmodus (Abb. 3.8, S. 31) kann die Datenquelle ausgewählt werden, „CH 1“ (= Kanal 1) und „CH 2“ (= Kanal 2) sind Meßkanäle, „Ref 1“ und „Ref 2“ sind Datenspeicher, in die einzelne Messungen abgespeichert und durch Anklicken wieder ausgelesen werden können.

3.4 Neue Meßreihe initiieren

Ebenfalls kann das Zeitintervall für die Messung gewählt werden, die Zeit also, die zwischen den einzelnen Meßpunkten liegen soll. Soll eine Meßreihe über einen ganzen Tag durchgeführt werden, so sollte das Zeitintervall etwa bei 30 Sekunden liegen. Das wären für einen Zeitraum von 24 Stunden $24 * 60 * 2 = 2880$ Messungen. Mit dem beschriebenen Rechner sollte nicht mehr als eine ca. 5000 Einzelmessungen umfassende Messung aufgezeichnet werden, da sonst der Hauptspeicher nicht ausreicht.

Das Display (Abb. 3.8, S. 31 rechts unten) gibt den Startzeitpunkt, die aktuelle Uhrzeit und die Dauer der Überwachung wieder. In diesem Modus werden keine Daten dauerhaft aufgezeichnet, es können auch keine Daten auf einen Datenträger abgespeichert werden. Der Beobachtungsmodus dient ausschließlich der Justierung des ankommenden Signals, er bietet die Möglichkeit, am Oszilloskop Einstellungen vorzunehmen und dies am Rechner zu verfolgen. Die Einstellungen für die vertikale und horizontale Auflösung können am Oszilloskop angepaßt werden, z. B. wenn sich die Leitfähigkeit und damit die Amplitude des gemessenen Signals verändert. Das Programm berücksichtigt die Veränderung bei der Aufbereitung der Daten.

3.4 Neue Meßreihe initiieren

Wird eine neue Meßreihe initiiert (vgl. Abb. 3.9, S. 32), so werden die Einstellungen bezüglich Datenquelle und Meßintervall aus dem Beobachtungsmodus übernommen (vgl. Abschnitt 3.2, S. 28 und Abschnitt 3.3, S. 29).

Als Dateiname wird das aktuelle Datum mit Uhrzeit voreingestellt, Änderungen können aber vorgenommen werden. Es können verschiedene Wasserparameter wie Temperatur, Leitfähigkeit und pH eingegeben werden, sie repräsentieren die entsprechenden Werte bei Versuchsbeginn. Als Bemerkung kann in Kurzform der Zweck dieser Messung und Informationen über den Fisch eingegeben werden (z. B. „Fisch 6 — Nitratmessung“). Die Bemerkung erscheint bei der Auswertung als Diagrammtitel.

Unter dem Punkt „Kurvenorientierung“ kann die Orientierung der Kurve im großen Fenster voreingestellt werden. Diese Einstellung ist nur bei der Messung asymmetrischer Kurven sinnvoll.

3.4 Neue Meßreihe initiieren

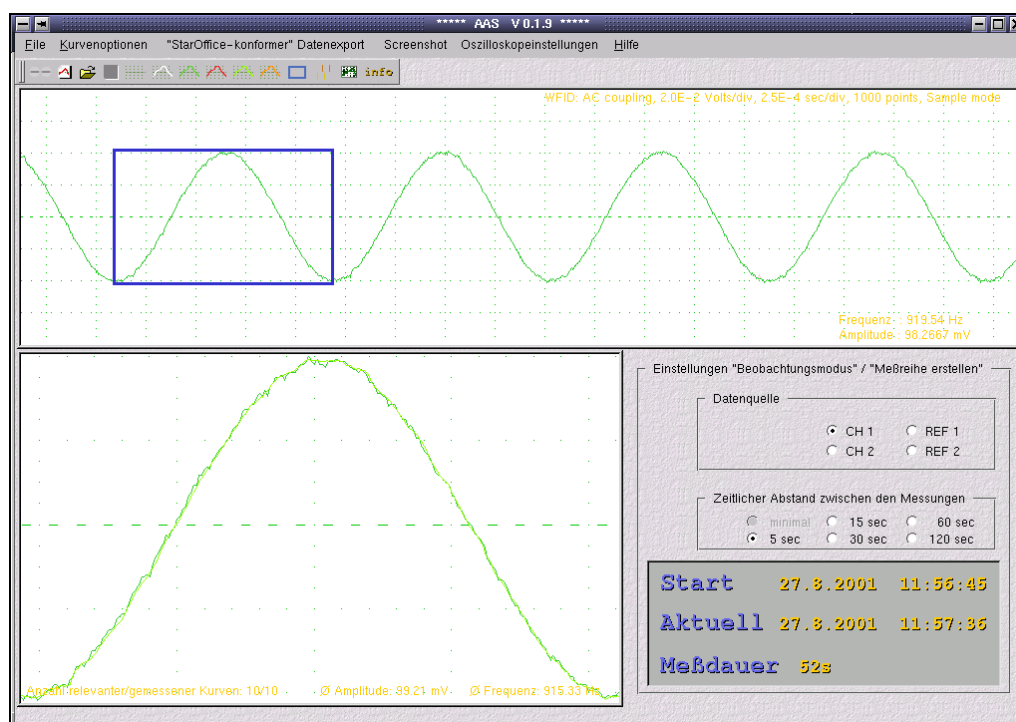


Abbildung 3.8: Der Beobachtungsmodus — Im Display rechts unten kann die Datenquelle (Datenkanal) sowie der zeitliche Abstand zwischen den Einzelmessung ausgewählt werden.

3.5 Die Messung

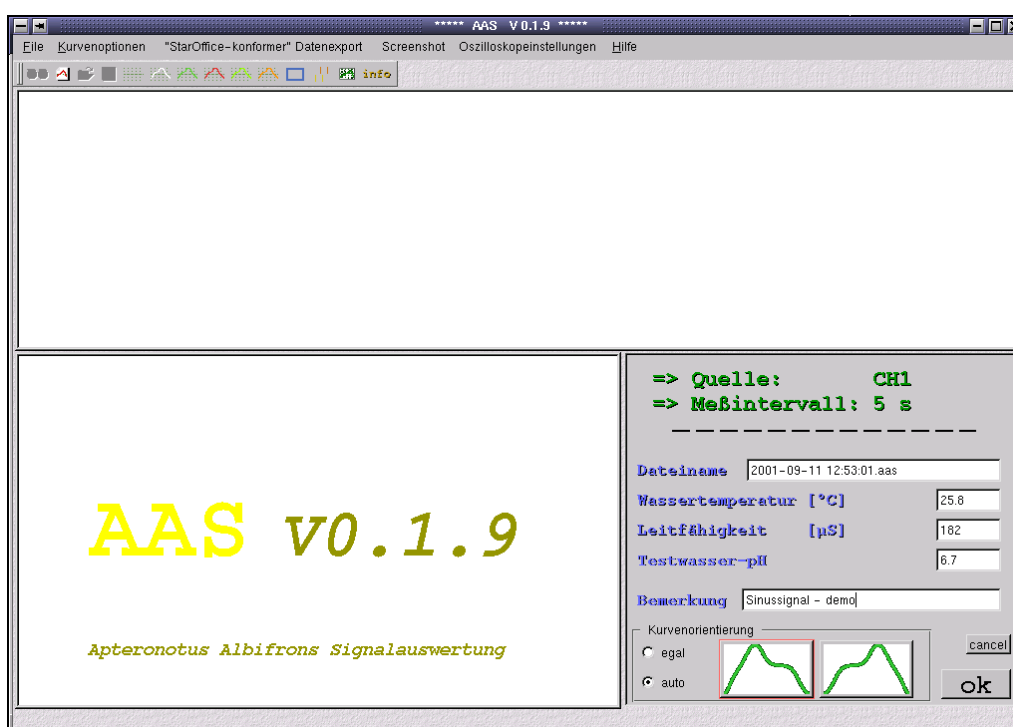


Abbildung 3.9: Neue Reihe initiieren — bevor die Messung beginnen kann, müssen einige Parameter eingegeben werden.

Wird „ok“ angeklickt, so startet die Messung. Gleichzeitig wird das Versuchsprotokoll geöffnet, es enthält bei Versuchsbeginn die vorher eingegebenen Daten. In das Versuchsprotokoll können zusätzlich Beobachtungen, die während der Messung gemacht werden, eingetragen werden. Solche Beobachtungen sind z. B. Temperatur, Sauerstoffkonzentration oder Nitratgehalt zu markanten Zeitpunkten. Allgemein handelt es sich hierbei um Parameter, die „von Hand“ gemessen wurden und nicht automatisch in die Auswertung mit eingehen. Auch können hier Auffälligkeiten im Verhalten des Fisches dokumentiert werden.

3.5 Die Messung

Im Fenster der oberen Hälfte der Abbildung 3.10 auf Seite 34 werden die Originaldaten der Messung angezeigt. Der blaue Rahmen markiert durch seine Ausdehnung die ermittelten Werte für Amplitude und Periodendauer.

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

Im Fenster links unten findet sich die skalierte Kurve der letzten Einzelmessung und die Durchschnittskurve der Einzelmessungen. Bis zum ersten Zusatz werden alle (auswertbaren) Kurven zur Berechnung der Durchschnittskurve herangezogen.

Die Dialogfläche rechts unten zeigt zeitliche Informationen zur Messung: Den Start, die aktuelle Zeit und die Differenz davon als Meßdauer.

Funktion der Buttons:

- **„Protokoll“**: Das Meßprotokoll wird angezeigt und kann editiert werden.
- **„Clipboard“**: Falls aktiviert, werden die aktuellen Meßdaten ins clipboard (Zwischenspeicher) kopiert.
- **„Abbrechen“**: Die aktuelle Messung wird abgebrochen, Protokoll und Daten werden verworfen.
- **„Ende“**: Meßdaten und Protokoll werden gespeichert, die Messung ordentlich beendet.
- **„Zusatz“**: Soll ein Zusatz zugegeben werden, so kann der entsprechende Text in das Textfeld eingegeben und durch Anklicken des „Zusatz“-Buttons bestätigt werden (ein Tropf-Geräusch wird hörbar). Die Zusätze werden durchnummeriert und im Simulationsmodus angezeigt. Einzelmessungen, die nach dem ersten Zusatz aufgezeichnet werden, werden nicht zur Berechnung der Durchschnittskurve verwendet.

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

Im Simulationsmodus (vgl. Abb. 3.11, S. 35) wird eine schon abgeschlossene Messung geladen, allerdings so, daß es für das Programm keinen Unterschied macht, ob die Messung momentan stattfindet oder vom Datenträger geladen wird. Diese Methode hat den Vorteil, daß so Veränderungen am Programm vorgenommen werden können und man diese sofort testen kann, ohne wirklich eine Messung

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

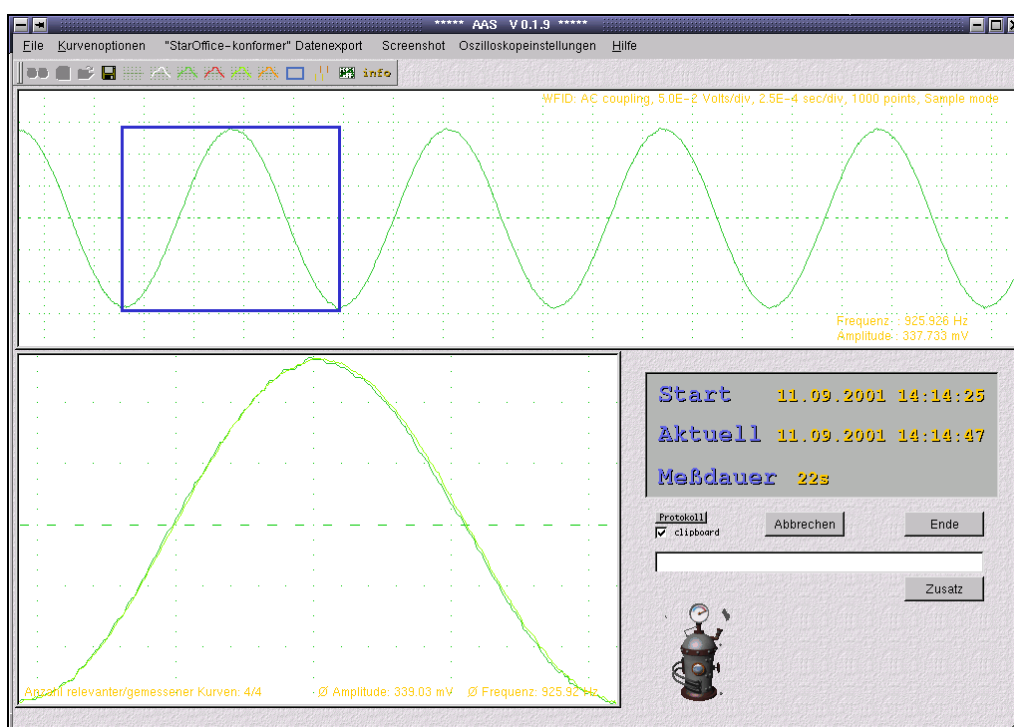


Abbildung 3.10: Die Messung läuft.

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

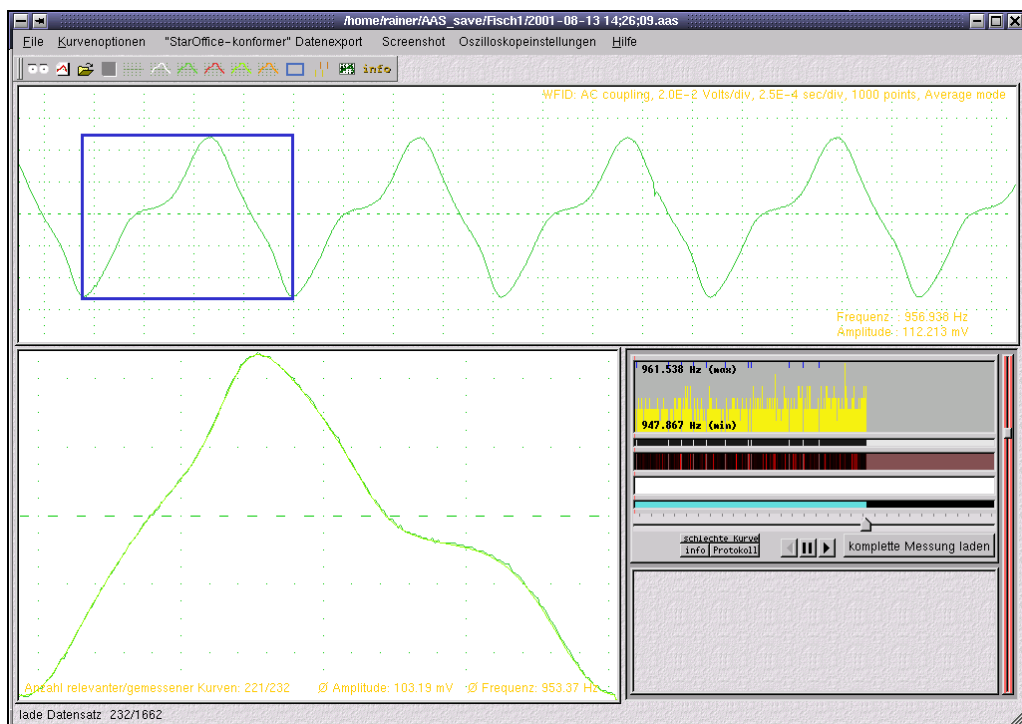


Abbildung 3.11: Der Simulationsmodus — Die Daten einer Reihe werden geladen.

vorzunehmen. Die Displayfenster sind (noch) nicht alle mit Funktionen verbunden, könnten damit also für zukünftige Versionen verwendet werden.

Der Simulationsmodus verläuft in zwei Schritten, als erstes soll die Bedienung der Dialogflächen erläutert werden (vgl. für Schritt eins Abb. 3.12, S. 36 und Abb. 3.13, S. 37 für Schritt zwei).

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

3.6.1 Schritt 1 (Daten laden)

Die Meßdaten einer vorangegangenen Messung werden mit der selben Geschwindigkeit geladen, mit der sie aufgezeichnet wurden. Per Schieberegler läßt sich das Zeitintervall für die Wiedergabe verändern, Einstellungen von 0.01 bis 128 Sekunden sind möglich. Damit läßt sich der Ladevorgang individuellen Wünschen anpassen. Mit Hilfe des „Pause“-Buttons (Symbol) kann die Simulation angehalten, durch Anklicken des „Play“-Buttons (Sym-

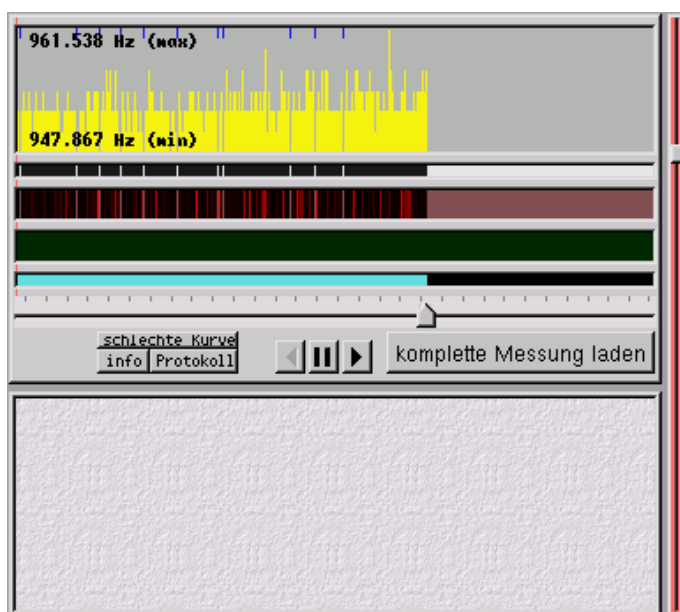


Abbildung 3.12: Schritt eins — Der noch inaktive Schieberegler über den Buttons zeigt den Fortschritt des Ladevorgangs an.

bol) wieder fortgesetzt werden. Die Buttons „info“ und „Protokoll“ ermöglichen die Einsicht in die während der Messung eingegebenen Begleitinformationen. Wenn aus Zeitgründen auf die Darstellung der Kurven während des Ladens verzichtet werden soll, ermöglicht der Button „komplette Messung laden“ schnelles Laden des kompletten Datensatzes. Der Simulationsmodus wird dann bei Schritt zwei fortgesetzt.

3.6.2 Schritt 2 (Daten anzeigen)

Gegenüber Schritt eins bietet Schritt zwei komfortablere Möglichkeiten bezüglich der Datenkontrolle und Datenauswertung. Mit den Doppelpfeilbuttons links und rechts (Abb. 3.13, S. 37) kann schnell im Datensatz „geblättert“ werden. Der Datensatz wird jetzt mit Hilfe der Richtungspfeile (in der Mitte) in beide Richtungen durchlaufen. Über den Button „nur 'gute' Kurven“ werden Kurven, die nicht berücksichtigt wurden, ausgeblendet (— es handelt sich dabei um Kurven, deren

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

Periodenlänge/Frequenz aus technischen Gründen nicht ermittelt werden konnten, vgl. S. 27).

Der „schlechte Kurve“-Button findet Verwendung, wenn bei der Durchsicht der Graphen der Einzelmessungen „Ausreißer“ eliminiert werden sollen. Diese Kurven werden bei der Auswertung nicht mehr berücksichtigt. (Unter „Extras“ gibt es die Möglichkeit, das schlechteste 1% der Kurven eines Zusatzbereiches zu verwerfen, vgl. S. 46) Das Textdisplay (in Abb. 3.13, S. 37, unten) zeigt statistische Informationen zur aktuellen Einzelmessung. Da die einzelnen Wellenformen durch die

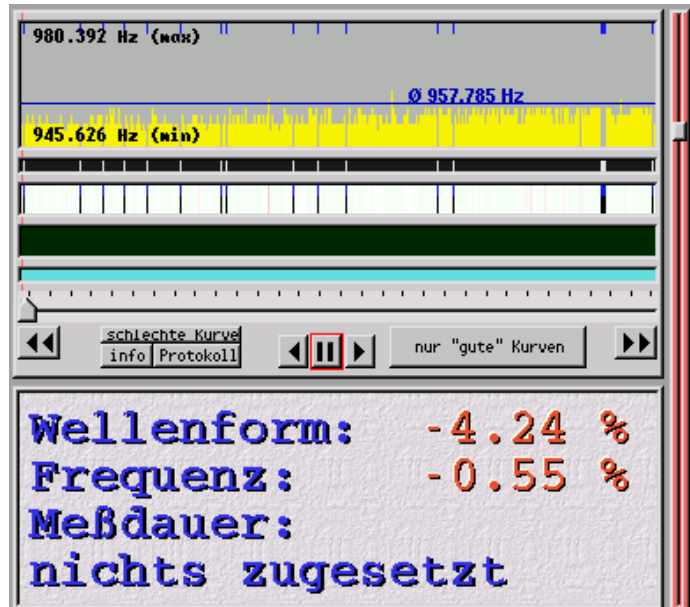


Abbildung 3.13: Schritt 2 — „schlechte“ Kurven geben sich als Lücken bzw. blaue Markierung zu erkennen. Wird der Button „nur „gute“ Kurven“ gedrückt, so werden diese nicht mehr dargestellt.

Skalierung nur noch in relativiertem Bezug stehen können, ist auch die Prozentangabe als solche ausgelegt: Die Durchschnittskurve aller relevanten Einzelmessungen (bis zum ersten Zusatz) liegt demnach bei 0%, Kurven die mit einem Wert über 0% versehen wurden, sind weniger deckungsgleich mit der Referenzkurve (Durchschnittskurve) als der Durchschnitt aller berücksichtigten Kurven. Wird eine Kurve mit einem Wert unter 0% versehen, so ist diese näher an der Durchschnittskurve als der Durchschnitt aller (berücksichtigten) Kurven. Somit kann dieser Prozentwert kann als „relative Abweichung der Wellenform der Einzelmessung von der durchschnittlichen Abweichung aller relevanten Kurven von der Durchschnittskurve“ betrachtet werden.

Für die Angabe der Frequenz konnten Absolutwerte verwendet werden. Die Frequenz wird in Hertz [Hz] angegeben, im Displayfenster wird zusätzlich die Abweichung der Einzelmessung von der Durchschnittsfrequenz in Prozent wie-

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

dergegeben. Trägt eine Einzelmessung den Wert „-0.55 %“, so liegt sie demnach um 0.55 % unter der durchschnittlichen Frequenz aller gemessenen Kurven. Darunter wird die Meßdauer, unter dieser der aktuelle Zusatz (falls schon was zuge-setzt wurde) mit Numerierung angezeigt.

3.6.3 Was zeigen die Displayfenster an?

(Aufzählung von oben nach unten, falls unterschiedlich dann steht „S1“ für „Schritt 1“ und „S2“ für „Schritt 2“. Siehe dazu die Abbildungen 3.11 bis 3.13 auf den Seiten 35 bis 37.)

- **Frequenzfenster:** Links oben steht die höchste gemessene Frequenz aller für die Bewertung relevanter Kurven, links unten die niedrigste. Einzelmessungen, die nicht berücksichtigt werden, werden in diesem Fenster durch eine kurze, vertikale blaue Linie markiert. Es fehlt die gelbe Linie. Wird der Button „nur 'gute' Kurven“ angeklickt, so verschwinden nicht relevante Messungen aus allen Fenstern, für die Statistik ist nur ihre Anzahl interessant. Durch Anklicken des stattdessen erscheinenden „alle Kurven“-Buttons werden wieder alle Kurven angezeigt.

S2: Da bei Schritt zwei alle Einzelmessungen geladen sind, ist zu diesem Zeitpunkt auch eine Durchschnittsfrequenz berechenbar. Sie wird im Frequenzfenster als horizontale, blaue Linie mit der Durchschnittsfrequenz aller Einzelmessungen dargestellt.

- **Fenster „Fisch Orientierung“:** Ändert der Fisch seine Richtung, dann ändert sich damit auch die Polarisierung seines elektrischen Feldes. Das Programm erkennt dies (vgl. Abschnitt 3.4, S. 30, Stichwort „Kurvenorientierung“) und kann, falls ausgewählt, die Darstellung im Fenster mit den skalierten Kurven in eine definierte Richtung zeichnen. Ein Richtungswechsel wird durch einen Farbwechsel (schwarz/grau) markiert; nicht durchgezogene, weiße Linien kennzeichnen nicht relevante Kurven.
- **Fenster „Qualitative Einschätzung der Kurve“:**

S1: Während des Ladevorgangs verändert sich zwangsläufig immer wieder die Durchschnittskurve. Rot gezeichnete Kurven sind solche, die mehr oder

3.6 Messung laden (Simulationsmodus)

weniger stark (je nach Intensität des Rottones) von der Durchschnittskurve abweichen. Sie werden selbst mit zur Berechnung der Durchschnittskurve herangezogen, im Gegensatz zu Ausreißern (irrelevante Kurven), die in diesem Dialog nicht eingezeichnet werden. Wird eine Einzelmessung geladen, die weniger deckungsgleich als die bisher schlechteste ist, werden alle Markierungen in den neuen, relativen Bewertungen neu gezeichnet.

S2: Ähnlich wie die Prozentangabe zur Wellenform verhält sich die Färbung der Markierungen für die Einzelmessungen in diesem Fenster. Je intensiver der Grünton einer Kurve ist, umso besser deckt sie sich mit der Durchschnittskurve. Kurven, deren Farbton näher an weiß liegt, sind ähnlich deckungsgleich mit der Durchschnittskurve wie der Durchschnitt aller relevanten Kurven. Je intensiver der Rotton einer Kurve ist, desto weniger deckt sie sich mit der Durchschnittskurve.

- Das schwarze Fenster darunter hat bisher keine Funktion zugewiesen bekommen.
- **Das türkisfarbene Zusatz-Fenster** markiert pro Farbwechsel einen Zusatz.

S2: Der Zusatz mit Numerierung wird im Textdisplay-Fenster angezeigt.

3.7 Die Funktionen der Pulldown-Menüs

3.7 Die Funktionen der Pulldown-Menüs

An dieser Stelle sollen die wichtigsten Funktionen der Pulldown-Menüs erklärt werden. Einige Funktionen wurden schon an früherer Stelle erläutert, vergleichen Sie dazu die entsprechenden Verweise. Die Punkte „Beobachten“ (Seite 29), „Neue Meßreihe“ (Seite 30) und „Oeffne“ (Seite 33) wurden bereits besprochen.

Der Menüpunkt „Speichern“ funktioniert nur, wenn momentan eine Messung läuft und entspricht dem Button „Ende“ während einer Messung. Über den Menüpunkt „Beenden“ kann das Programm verlassen werden.



Abbildung 3.14: Das **File-Menü** ermöglicht unter anderem das Abspeichern und Laden von Messungen.

3.8 Das Kurvenoptionen Menü

An dieser Stelle sollen die Funktionen des Kurvenoptionen-Menüs erklärt werden (vgl. Abb. 3.15, S. 41):

- **Displayeinteilung anzeigen:** Die Gittereinteilung des Originaldatenfensters und des skalierten Fensters kann über diesen Menüpunkt wahlweise an- und ausgeschaltet werden.
- **Originaldaten anzeigen:** Die Originaldaten (rosa) werden per default von den Rohdaten (grün) überlagert. Treten korrigierbare Fehler auf, z. B. sogenannte bitflips, dann sieht man aus der grünen Kurve eine rosa Spitze herausragen.
- **Rohdaten anzeigen:** Die Rohdaten-Kurve entspricht der korrigierten Originaldaten-Kurve. Sie wird grün gezeichnet und überlagert in identischen Bereichen die Originaldaten-Kurve.

3.8 Das Kurvenoptionen Menü

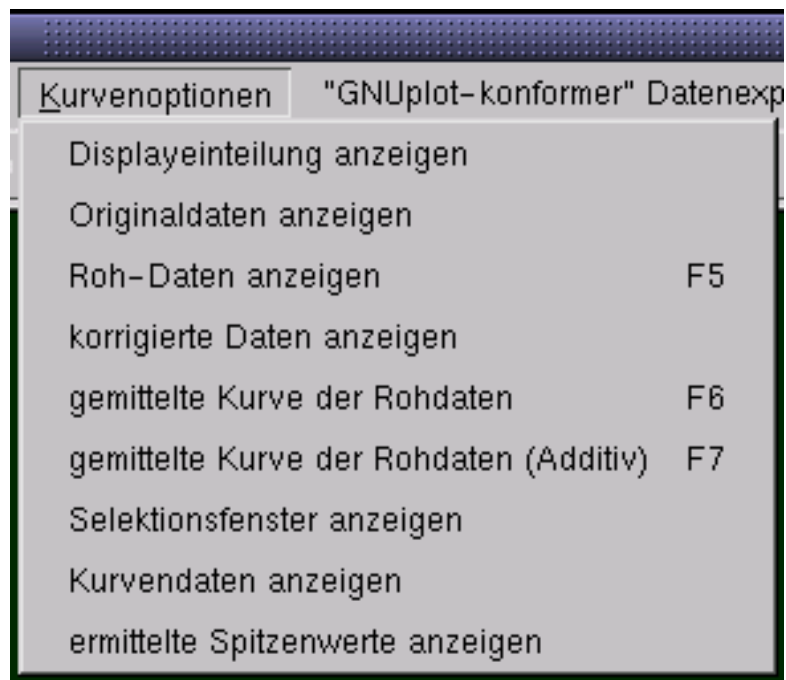


Abbildung 3.15: Über das **Kurvenoptionen-Menü** können die Kurven ausgewählt werden, welche in den beiden Graphikfenstern dargestellt werden sollen — sehr unterschiedliche Kombinationen können sinnvoll sein um sich eine Übersicht über den Datensatz zu verschaffen.

- **Korrigierte Daten anzeigen:** Zur Peakermittlung (Bestimmung der Periodenlänge) wird das „gleitende Mittel“ der Rohdatenkurve errechnet. Die resultierende Kurve kann durch Anklicken dieses Menüpunkts betrachtet werden. Diese Funktion war zum Debuggen des Programms hilfreich.
- **Gemittelte Kurve der Rohdaten:** Hiermit kann die Durchschnittskurve aller relevanten Einzelmessungen bis zum ersten Zusatz wahlweise von den beiden Displays hinzugefügt oder entfernt werden. Diese Kurve wird hellgrün dargestellt und überlagert (bei gleichen Werten) die Originaldatenkurve und die Rohdatenkurve.
- **Gemittelte Kurve der Rohdaten (Additiv):** Wird dieser Unterpunkt gewählt, so wird die Durchschnittskurve der Rohdaten im Bereich des aktuellen Zusatzes errechnet und mit deren Differenz zur Referenz, also der Durch-

3.9 Der Datenexport in AAS

schnittskurve der Rohdaten bis zum ersten Zusatz, im Fenster mit der Darstellung der skalierten Kurven gezeichnet.

- **Selektionsfenster anzeigen:** Optional kann der blaue Rahmen, der zur Markierung einer Periodenlänge und der Amplitude dient, ein- und ausgeschaltet werden.
- **Kurvendaten anzeigen:** Mittels dieses Menüeintrags können zusätzliche Kurveninformationen ein- und ausgeblendet werden. Es handelt sich um Informationen über die am Oszilloskop eingestellte x- und y-Einteilung. Dieser Eintrag entspricht dem „info“-Button der Toolbar.
- **Ermittelte Spitzenwerte anzeigen:** Zur Berechnung der Periodenlänge werden je zwei Maxima und Minima des gleitenden Mittels der Originaldatenkurve gesucht. Die gefundenen Werte können über diesen Eintrag dem Display als Linien hinzugefügt werden. Diese Funktion nutzt der Überwachung interner Programm-Abläufe.

3.9 Der Datenexport in AAS

Über den Verlauf einer Messung sammeln sich immense Datenmengen an. Für eine typische Messung über einen Zeitraum von 4 Stunden würden bei einem Meßintervall von 5 Sekunden ($4 \text{ Stunden} * 60 \text{ Minuten} * 12 \text{ Messungen pro Minute} =$) 2880 Einzelmessungen anfallen. Jede Einzelmessung beinhaltet unter anderem eine skalierte Rohdatenkurve von 600 y-Werten im Bereich von 0 bis 350 (Pixel). Diese skalierten Datensätze werden intern zur Berechnung von Amplitude, Periodenlänge, Durchschnittskurven, der Bewertung der aktuellen Rohdatenkurve bezogen auf die Durchschnittskurve, der Regressionsgeraden und noch mehrerer anderer Möglichkeiten, die der qualitativen Bewertung der Kurvendaten dienen, genutzt.

Diese Fülle an Daten würde mit konventionellen Tabellenkalkulationsprogrammen nur schwierig handhabbar sein. Deshalb habe ich die statistische Auswertung ebenfalls in AAS integriert. Zur Darstellung der Ergebnisse bot sich jedoch die Verwendung einer konventionellen Anwendung an, da die Daten auf diese Weise

3.10 Das Menü „GNUplot-konformer Datenexport“

als portable Graphik, wie sie für den schriftlichen Teil der Diplomarbeit benötigt wurden, abgespeichert werden konnten. In Betracht kamen zwei Programme, zum einen ein UNIX-Klassiker, GNUplot, als Alternative dazu StarOffice, ein Office-Paket, das dem Office-Paket von Microsoft sehr ähnlich ist. Die Darstellung der Ergebnisse mittels GNUplot ist einfach, anschaulich und automatisierbar. Die Verwendung von StarOffice-Calc (Tabellenkalkulation von StarOffice) hingegen bietet Kompatibilität zu Microsoft-Produkten. Außerdem konnten auf diese Weise die Ergebnisse der statistischen Datenaufbereitung verschiedener Programme miteinander verglichen werden, z. B. die in AAS integrierte Berechnung der Regressionsgeraden mit den Regressionsgeraden, die von Starcalc und Excel ermittelt wurden.

Im nächsten Abschnitt soll das Menü zum GNUplot-konformen Datenexport vorgestellt werden, der StarOffice-kompatible Datenexport umfaßt einige Funktionen weniger, er wird nicht extra erläutert.

3.10 Das Menü „GNUplot-konformer Datenexport“

Dieser Abschnitt behandelt Funktionen, die der „GNUplot-konforme Datenexport“ bereitstellt, siehe dazu Abb. 3.16 auf Seite 44.

- **Durchschnittskurve der Rohdaten:** Die Durchschnittskurve der (relevanten) Einzelmessungen bis zum ersten Zusatz wird in ein Datenfile exportiert.
- **Durchschnittskurve der Rohdaten im Bereich des aktuellen Zusatzes:** Die Durchschnittskurve der (relevanten) Einzelmessungen im aktuellen Zusatzbereich (falls ungleich null) wird in ein Datenfile exportiert.
- **Differenz obiger Datensätze:** Die Differenz der Rohdaten-Durchschnittskurve im Bereich vor dem ersten Zusatz und der Rohdaten-Durchschnittskurve im Bereich des aktuellen Zusatzes (falls ungleich null) wird in ein Datenfile exportiert.

3.10 Das Menü „GNUplot-konformer Datenexport“

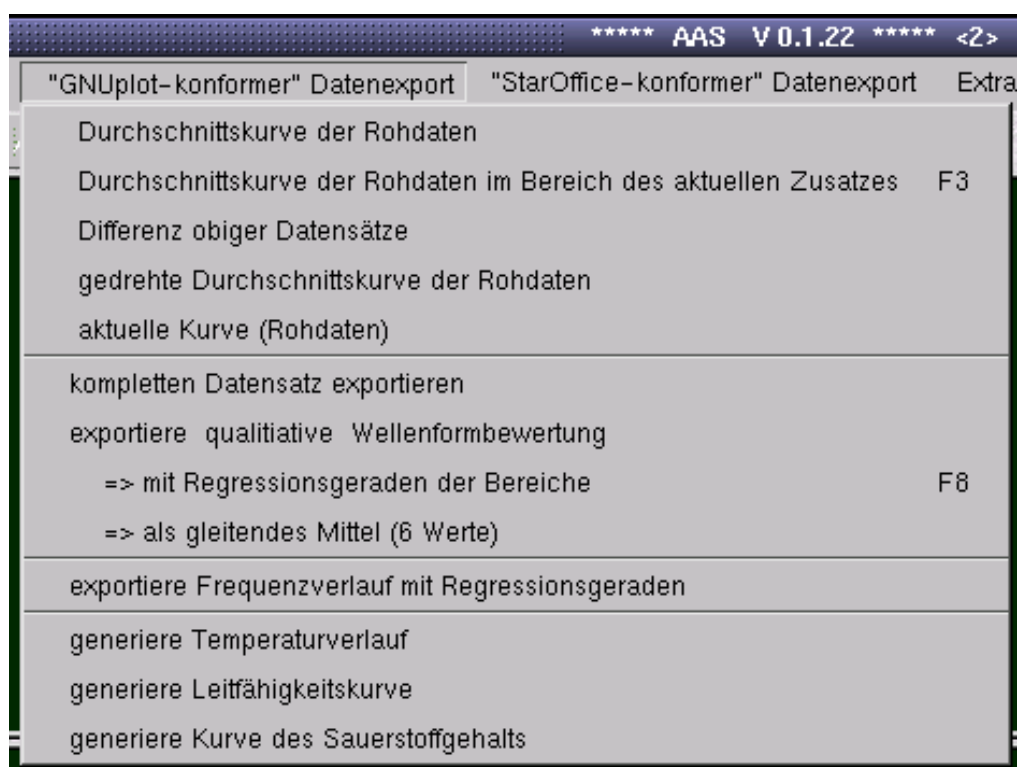


Abbildung 3.16: Der **GNUplot-konforme Datenexport** bietet eine Vielzahl an Fileexporten. So können Rohdaten, bearbeitete Daten und Ergebnisse statistischer Berechnungen exportiert werden.

3.10 Das Menü „GNUplot-konformer Datenexport“

- **Menüpunkt kompletten Datensatz exportieren:** Die Rohdatendurchschnittskurven aller Bereiche („ohne Zusatz“, „1.Zusatz“, „2.Zusatz“, . . . , „n.Zusatz“) werden in Dateien gespeichert. Zusätzlich wird ein Startscript für GNUplot erstellt, welches bei Aufruf automatisch für die Beschriftung des Diagramms sorgt. Die Ausgabe des Diagramms erfolgt auf den Monitor und in eine Graphikdatei.
- **Menüpunkt exportiere qualitative Wellenformbewertung:** Die qualitative Bewertung der Wellenform der Einzelmessungen wird zusammen mit Beschriftung, Referenzlinie für die Durchschnittskurve („0“) und einer Kennlinie exportiert, welche je nach Zusatzänderung zwischen den Werten „-20“ und „-25“ hin- und herspringt. Außerdem wird zusätzlich ein Startscript für GNUplot erzeugt, welches für die richtige Beschriftung des Diagramms sorgt.
 - **mit Regressionsgerade der Zusatzbereiche:** Wie Punkt „exportiere qualitative Wellenformbewertung“, aber mit Regressionsgeraden zu den jeweiligen Zusatzbereichen. Auch hier wird ein GNUplotsript erzeugt, welches bei Aufruf die Ausgabe des Diagramms auf den Monitor und in eine Bilddatei lenkt.
 - **als gleitendes Mittel:** Die qualitative Wellenformbewertung wird als gleitendes Mittel (aus 6 Werten) ausgegeben.
- **Exportiere Frequenzverlauf mit Regressionsgeraden:** Der Frequenzverlauf (absolute Werte in [Hz]) über die gesamte Messung wird in eine Datei ausgegeben, dazu eine Datei mit den Regressionsgeraden des Frequenzverlaufs. Zusätzlich wird noch ein Startscript für GNUplot erstellt.
- **Generiere Temperaturverlauf:** Mittels eines Eingabefeldes kann die Wassertemperatur zu Beginn der Messung und am Ende des jeweiligen Bereiches eingegeben werden. Daraufhin wird der Temperaturverlauf für die entsprechenden Bereiche generiert und in eine Datei geschrieben.
- **Generiere Leitfähigkeitskurve:** Wie „Generiere Temperaturverlauf“, jedoch für die Leitfähigkeit.

3.11 Das Menü „Extras“

- **Generiere Kurve des Sauerstoffgehalts:** Wie „Generiere Temperaturverlauf“, jedoch für den Sauerstoffgehalt.

Unterschiede des „StarOffice-konformen Datenexports“: Die Pulldown-Menüs des Dialogs zum StarOffice-konformen Datenexport unterscheiden sich vom Funktionsumfang und den Bezeichnungen kaum von dem des GNUplot-konformen Datenexports. Der Hauptunterschied besteht darin, daß Daten, die für die Weiterverarbeitung mit StarOffice-Calc vorbereitet werden, nicht in Datenfiles abgespeichert, sondern ins clipboard kopiert werden. Von dort können sie mit der „Einfügen“-Funktion in Texteditoren oder Tabellenkalkulationsprogrammen eingefügt werden.

3.11 Das Menü „Extras“

Screenshots sind „Schnappschüsse“

des (aktuellen) Bildschirms, diese werden dann als Bilddatei abgespeichert. Sie erlauben es, von einem beliebigen Ort aus per Internet eine Messung zu verfolgen. Diese Option ist bei z. B. bei Messungen, die über 24 Stunden oder länger gehen, nützlich.



Abbildung 3.17: Das **Extras-Menü** bietet einige Sonderfunktionen.

3.11 Das Menü „Extras“

- **Screenshot — Timer Einstellungen:** Wird der Menüpunkt „Timer Einstellungen“ gewählt, so erscheint das „Screenshot — Optionen“-Fenster. Hier kann das Aufnahmeintervall in Minuten bestimmt werden — die Zeitspanne also, die verstreichen soll, bevor erneut ein Bild aufgenommen wird. Unter „Pfad“ kann das Verzeichnis eingestellt werden, in dem die Bilddateien abgespeichert werden sollen. Im „Extras“-Menü kann, wenn alle Parameter nach Wunsch eingestellt wurden, die Aufnahme der Screenshots gestartet werden. Dies geschieht durch Auswahl des Eintrags „Timer starten“. Mit „Timer stoppen“ kann die Screenshot-Aufnahme wieder beendet werden.
- **Oszilloskopeinstellungen:** Hinter der Option „Displayintensität“ verbirgt sich ein Schalter, mit dessen Hilfe die Displayintensität des Oszilloskopmonitors zwischen 20% und 100% gewechselt werden kann. Nachdem alle zur Messung notwendigen Geräte justiert sind, kann der Oszilloskopmonitor auf 20% Intensität eingestellt werden, dadurch wird die Bildröhre geschont.
- **Datenkontrolle:** Durch Auswahl des Eintrags „verwerfe 1% der schlechtesten Kurven“ wird programmintern für jeden Zusatzbereich eine Tabelle aller (relevanten) Einzelmessungen angelegt und nach der qualitativen Wellenformbewertung sortiert. Anschließend wird pro Zusatzbereich das schlechteste 1% der Einzelmessungen verworfen und die Durchschnittskurven, Farbskalen sowie Regressionsgeraden neu berechnet. Die verworfenen Kurven sind zukünftig als „nicht relevant“ markiert und werden nicht mehr berücksichtigt. Dieser Punkt kann mehrmals angewählt werden.
- **Fertige GNUplot-script an:** Noch nicht belegt, bei Bedarf frei für weitere statistische Auswertungen.

Kapitel 4

Ergebnisse

4.1 Vorgehensweise

Es ist nicht bekannt ob, und wenn ja, wie Tiere der Art *Apteronotus albifrons* die Wellenformcharakteristik ihrer Entladungen aufgrund äußerer Einflüsse verändern. In den Versuchen soll dies herausgefunden werden, dabei wird vorsichtig vorgegangen, damit die Tiere keine irreversiblen Schäden erleiden und somit für weitere Versuche nicht mehr verwendet werden könnten.

Eine Gliederung der geplanten Versuchsabfolge:

- In einer die Versuche einleitenden Phase sollte herausgefunden werden, ob die Tiere ihre Entladungen über den Tagesverlauf hinweg verändern. Dazu wurden 24 Stunden dauernde Messungen durchgeführt, während derer die Tiere die vom Klimaraum gewohnten Bedingungen vorfanden (allerdings im Versuchsaquarium).
- Testen der Reaktion auf verschiedene Reize wie Fütterung, schwacher Lichtreiz (Neonröhren) und starker Lichtreiz (Tauchlampe).
- Verändern physikalischer Wasserparameter wie Temperatur, Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt.

Jeweils vor der ersten Versuchsdurchführung wurde das System mit einem vom Signalgenerator stammenden Signal getestet. Traten hierbei Effekte wie Änderung von Amplitude, Wellenform oder Frequenz auf, so wurden diese bei den

4.2 Die Wellenform der Entladungen

Die Wellenform des elektrischen Signals

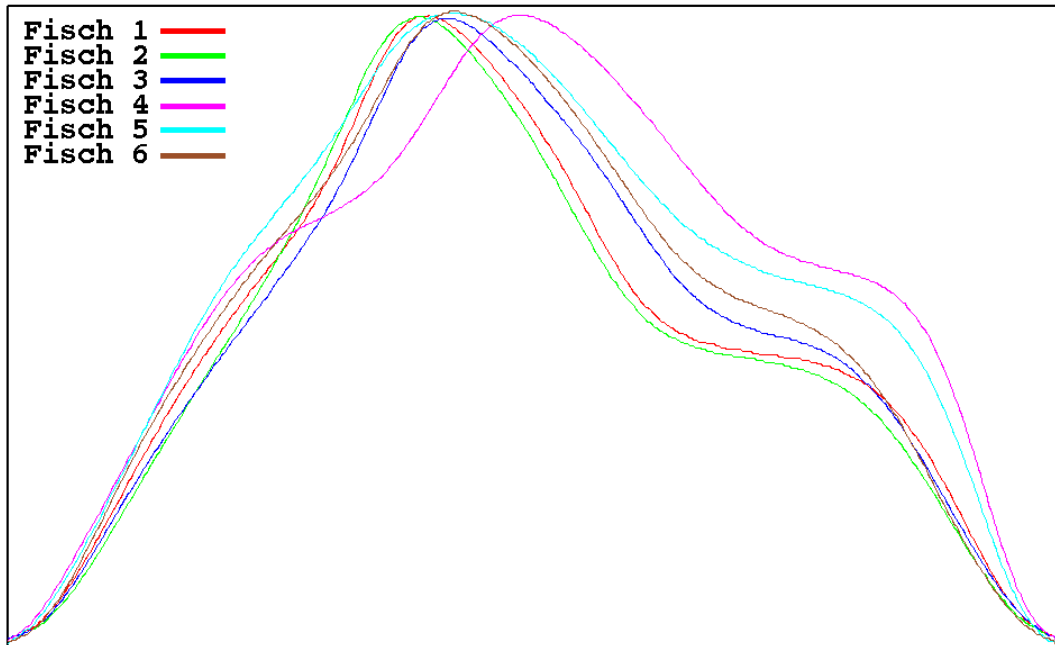


Abbildung 4.1: Übersicht über die Kurvenform der elektrischen Entladungen aller 6 Fische.

Versuchen mit den Fischen berücksichtigt und mit der Präsentation des entsprechenden Ergebnisses diskutiert.

4.2 Die Wellenform der Entladungen — Variation des Signals der Tiere untereinander

In Abb. 4.1, S. 49 sind die Wellenformen der elektrischen Entladungen der Fische (W1 bis W6) dargestellt. Es handelt sich dabei jeweils um die letzte Messung (Stand: 04.12.2001).

W1 und W2 liegen nahe beieinander. Die Kurven W3 und W6 weisen Ähnlichkeit untereinander und zu W1 und W2 auf. Komplette von den anderen Kurven abgesetzt ist W4. W5 nimmt einen Platz dazwischen ein.

Die Bedingungen zur jeweiligen Messung waren dabei vergleichbar. So lag die Temperatur zu Beginn der Messungen zwischen 24.1°C und 25.0°C , die Leitfähigkeit zwischen $179\ \mu\text{S}/\text{cm}$ und $208\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Der pH war im Bereich zwi-

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

schen 6.2 und 6.6, die Messungen lagen zeitlich nicht weit auseinander (12.10.2001 – 22.11.2001), so daß es keinen großen Altersunterschied der Fische gab. Jedoch hatten sich die Tiere unterschiedlich entwickelt. Die Fische 1 und 2 sind deutlich kleiner als die anderen vier, die wiederum vergleichbar groß sind. Die Wellenform des Signals von Fisch 4 zeigt eine andere Charakteristik als die der Tiere 1, 2, 3 und 6. Vermutlich handelt es sich bei Fisch 4 um ein Weibchen, anhand äußerer Merkmale kann das Geschlecht nicht bestimmt werden. KRAMER schreibt in einer seiner Publikationen (1988), daß bei männlichen Tieren der Gattung *Eigenmannia* die Intensität der Oberwellen größer ist als bei den Weibchen. (Je mehr Oberwellen vorhanden sind und je intensiver diese ausgeprägt sind, desto mehr weicht die Kurve von einem Sinussignal ab.) Jedoch gibt es nicht nur Wellenformunterschiede zwischen den einzelnen Tieren, wie der nächste Abschnitt zeigen wird, sondern, an verschiedenen Tagen aufgenommen, auch beim selben Tier.

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

In den Abbildungen 4.2 bis 4.7 auf den Seiten 51 bis 54 ist auf der y-Achse die Amplitude des Signals gegen die Periodenlänge auf der x-Achse aufgetragen. Da es sich um skalierte Werte handelt, sind auf den Achsen keine Zahlenwerte eingetragen.

Fisch 1 (vgl. Abb. 4.2, S. 51): Die Wellenform vom 13.08.2001 ist fast deckungsgleich mit der Wellenform, die am 12.11.2001 — also drei Monate später — aufgezeichnet wurde.

Fisch 2 (vgl. Abb. 4.3, S. 51): Die Wellenform an zwei aufeinanderfolgenden Tagen ist beinahe identisch.

Fisch 3 (vgl. Abb. 4.4, S. 52): Man sieht, daß sich im Laufe der Zeit die Wellenform des Signals ändert. Ähnlich sind sich die Kurven vom 25.07.2001 und 18.09.2001. Davon hebt sich die Kurve vom 31.10.2001 ab, es vollzieht sich eine sprunghafte Veränderung, die nachfolgenden Kurven vom 20.11.2001 und 22.11.2001 weisen ebenso auf eine tendenzielle Veränderung der Kurvenform hin.

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

Wellenformunterschiede bei Fisch 1

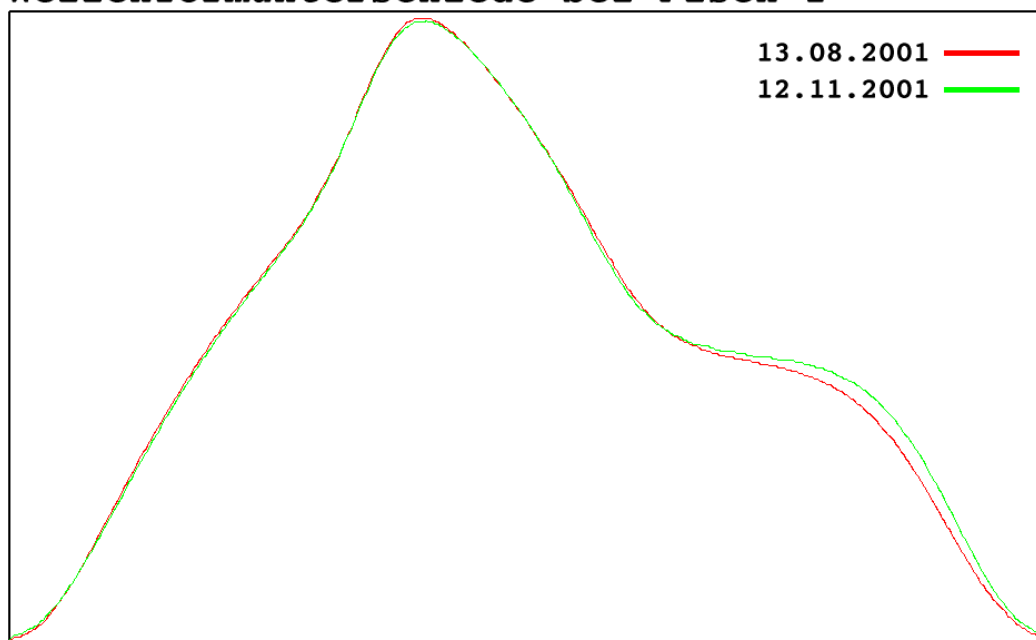


Abbildung 4.2: Kurvenformvariation bei Fisch 1.

Wellenformunterschiede bei Fisch 2

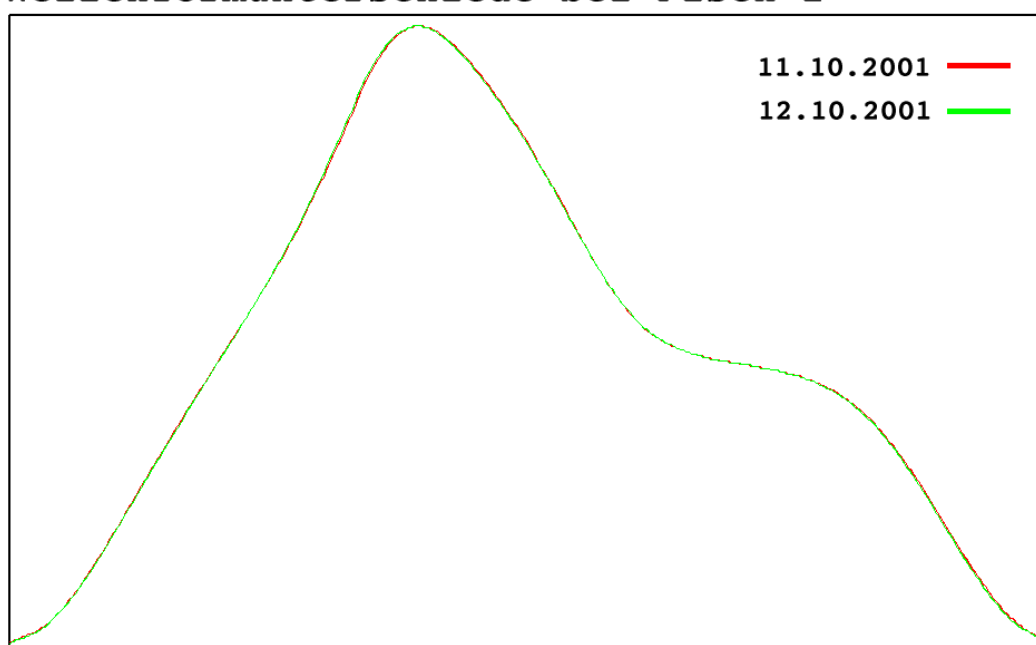


Abbildung 4.3: Kurvenformvariation bei Fisch 2.

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

Wellenformunterschiede bei Fisch 3

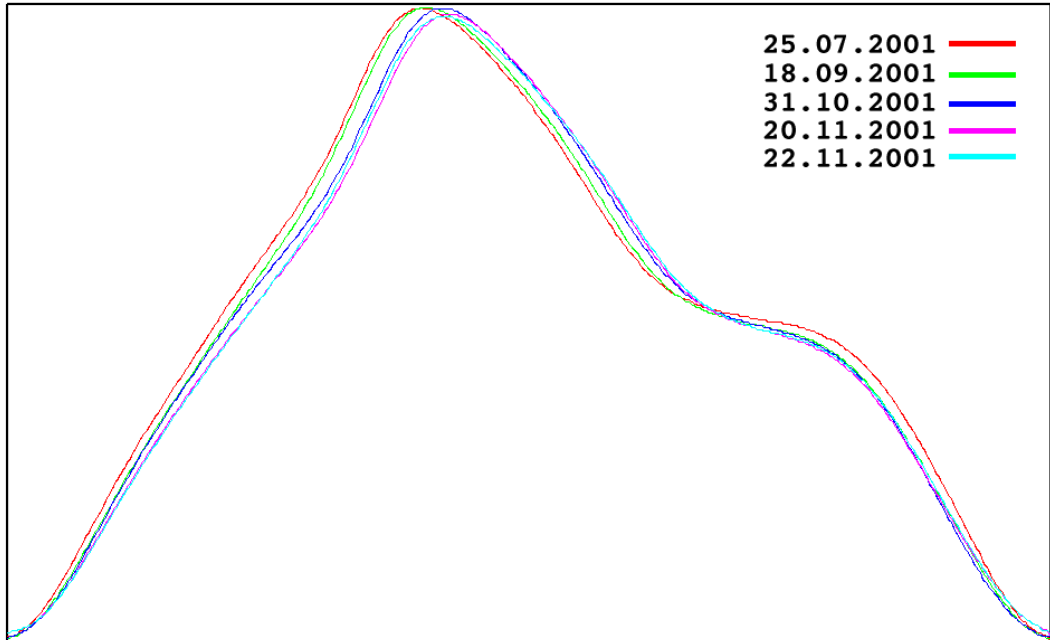


Abbildung 4.4: Kurvenformvariation bei Fisch 3.

Wellenformunterschiede bei Fisch 4

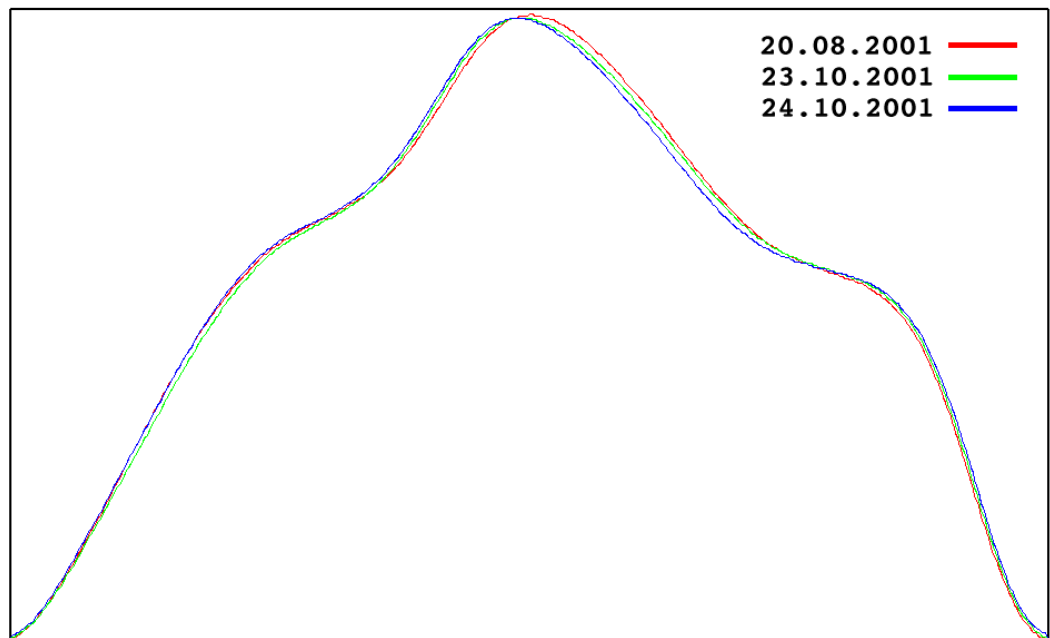


Abbildung 4.5: Kurvenformvariation bei Fisch 4.

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

Wellenformunterschiede bei Fisch 5

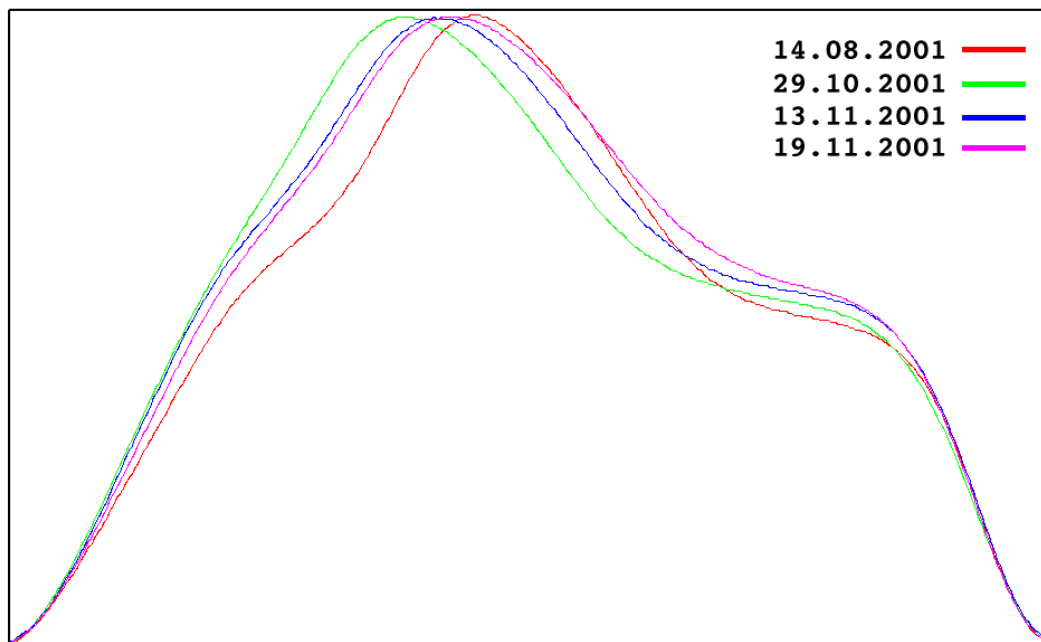


Abbildung 4.6: Kurvenformvariation bei Fisch 5.

Fisch 4 (vgl. Abb. 4.5, S. 52): Die Wellenform vom 20.08.2001 unterscheidet sich von den am 23. und 24.10.2001 aufgenommenen Wellenformen nur geringfügig.

Fisch 5 (vgl. Abb. 4.6, S. 53): Die Entladungen von Fisch 5 zeigen die stärksten Variationen. Die am 14.08.2001 aufgezeichnete Wellenform deutet auf ein Weibchen hin, die nachfolgenden Aufnahmen entsprechen eher der Entladungskarakteristik eines Männchens. Die Wassertemperatur während der Aufzeichnung der Kurven vom 14.08., 29.10. und 19.11. lag zwischen 24.8°C und 25.0°C . Diese drei Kurven unterscheiden sich mehr voneinander, als die Kurven vom 13.11. und 19.11.2001. Die Wassertemperatur war am 13.11. bei 23.7°C , also 1.1°C niedriger als am 19.11. mit 24.8°C . Und doch sind sich diese beiden Kurven ähnlicher als alle anderen Kurven. Ein Anzeichen dafür, daß sich die Temperatur nicht auf die Wellenform auswirkt.

Fisch 6 (vgl. Abb. 4.7, S. 54): Der Kurvenformunterschied zwischen den Messungen vom 30.08. und 16.11.2001 ist gering gegenüber dem Unterschied zur Messung vom 26.10.2001. Diese Abweichung erscheint, wie später gezeigt wird, immer wieder während der Versuche — jedoch weit weniger intensiv. Die Dauer

4.3 Wellenformvariation beim gleichen Tier

Wellenformunterschiede bei Fisch 6

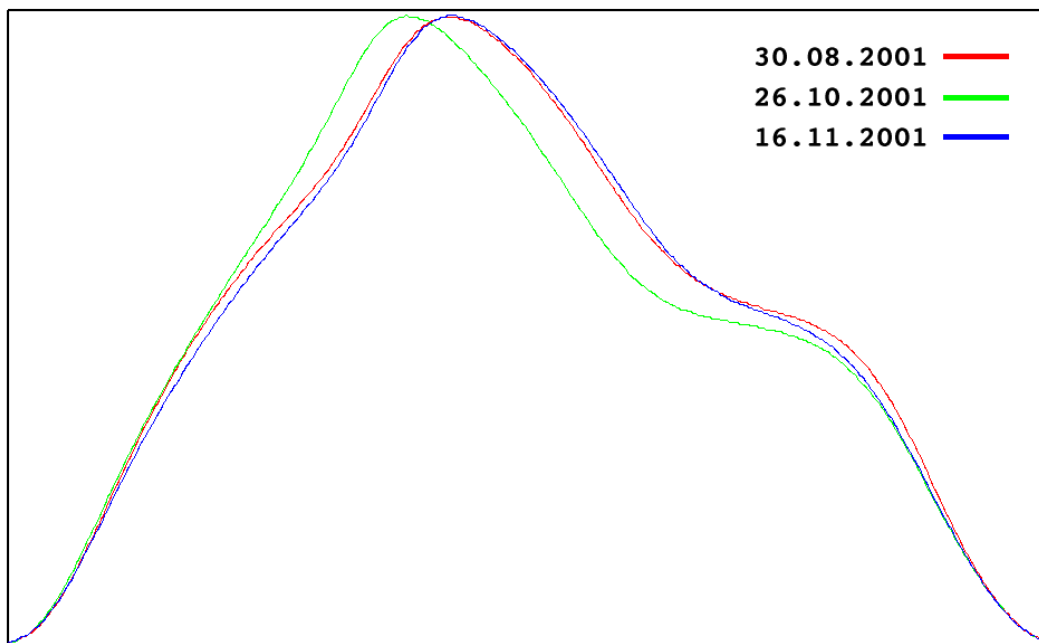


Abbildung 4.7: Kurvenformvariation bei Fisch 6.

der Versuche war mit 4 bis 7 Stunden gering gegenüber den Zeiträumen, die zwischen den Messungen für diese Übersicht lagen. Da es vorübergehend zu erhöhten Nitratwerten ($[\text{NO}_3^-]$: ca. 50 mg/l) in den Hälterungsbecken gekommen war, kann der Kurvenformunterschied vom 26.10. gegenüber den Kurven vom 30.08. und 16.11. darauf zurückgeführt werden.

Auch bei Fisch 5 findet eine derartige Kurvenformänderung im selben Zeitraum statt (vgl. Fisch 5, Messung 29.10.2001 in Abb. 4.6, S. 53).

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Kurvenform der elektrischen Entladungen der Tiere untereinander große Unterschiede aufweist. Dieser Umstand erschwert die einheitliche Auswertung der Ergebnisse, da die Kurvenformen nicht zwischen den Versuchen der verschiedenen Tiere verglichen werden können. Desweiteren können auch die Kurvenformen, die zwar vom gleichen Tier stammen, jedoch an unterschiedlichen Tagen aufgezeichnet wurden, nur mit Vorsicht miteinander verglichen werden. Es bleibt der Vergleich von Kurvenformen, die innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes von einem Tier erfaßt wurden (etwa 2 bis 3 Wochen).

4.4 Variation der Frequenz

Tabelle 4.1: Große Temperaturstreuung (1.20° C) — Fisch 3.

Temperatur [° C]	Frequenz [Hz]	Versuch	Datum
24.70	861	NaCl	18.09.2001
24.73	861	NaCl	20.11.2001
24.75	864	KNO ₃	22.11.2001
25.80	875	Referenz	25.07.2001
25.90	930	Futter/Lichtreiz	31.10.2001

Die Versuche sind so gestaltet, daß die Durchschnittskurve, die als Referenz verwendet wird, aus ca. 600 Einzelkurven berechnet wird. Diese Einzelkurven entstammen alle der Zeitspanne zwischen Versuchsbeginn und der ersten Veränderung wie Leitfähigkeitsänderung, Änderung des Sauerstoffgehalts oder Temperaturunterschiede.

4.4 Variation der Frequenz

Die Variation der Frequenz soll am Beispiel dreier Tabellen gezeigt werden. Sie fassen die Werte aus verschiedenen Messungen zusammen. Die in Tabelle 4.1, S. 55 aufgeführten Messungen weisen eine große Streuung der Wassertemperatur an verschiedenen Versuchstagen auf, Tabelle 4.2, S. 56 enthält Messungen mit mittlerer Temperaturdifferenz und schließlich Tabelle 4.3, S. 56, deren Messungen nur geringe Wassertemperaturunterschiede vorweisen. Da die Entladungsfrequenz der Tiere verschieden ist, können nur die Versuche jeweils eines Tieres verglichen werden. Zusätzlich wurden Versuche ausgewählt, bei denen die Wassertemperatur im Versuchsbecken während der Messung konstant blieb.

Aus den Tabellen 4.1 bis 4.3 läßt sich nur ein Parameter entnehmen, der proportional zur Frequenz ist: Die Wassertemperatur während des Versuchs. Das Verhältnis zwischen Wassertemperatur und Frequenz soll in den nächsten Versuchen dargestellt werden.

4.5 Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Frequenz

Tabelle 4.2: Mittlere Temperaturstreuung (0.90°C) — Fisch 4.

Temperatur [$^\circ\text{C}$]	Frequenz [Hz]	Versuch	Datum
24.50	808	NaCl	23.10.2001
24.52	802	KNO ₃	24.10.2001
25.20	835	NaCl	20.08.2001
25.40	846	Futter/Lichtreiz	20.08.2001

Tabelle 4.3: Geringe Temperaturstreuung (0.30°C) — Fisch 6.

Temperatur [$^\circ\text{C}$]	Frequenz [Hz]	Versuch	Datum
24.70	865	Referenz	30.08.2001
24.80	867	KNO ₃	30.08.2001
24.95	881	O ₂	16.11.2001
25.00	881	O ₂	26.10.2001
25.00	881	Referenz	16.11.2001

4.5 Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Frequenz der Entladungen

Die Versuche zum Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und der Frequenz der Entladungen wurden zeitlich in mehrere Bereiche eingeteilt. Innerhalb der einzelnen Bereiche wurde die Temperatur konstant gehalten, erhöht oder abgesenkt. Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs und der Temperaturabsenkung kann variieren. Es werden zwei Versuche beschrieben — ein Versuch, bei dem die Wassertemperaturdifferenz 0.5°C beträgt und ein Versuch, bei dem diese Differenz 1.15°C beträgt. Sauerstoffkonzentration und Leitfähigkeit wurden während dieser Versuche nicht verändert.

4.5.1 Versuch 1 — Temperaturdifferenz 0.5°C — Fisch 1

Das Diagramm 4.8, S. 57 beinhaltet zwei y-Achsen, auf denen die Frequenz und die Temperatur gegen die Zeit auf der x-Achse aufgetragen ist (Der Temperaturverlauf ist als Funktion aus mehreren Geraden eingezeichnet). Die unteren

4.5 Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Frequenz

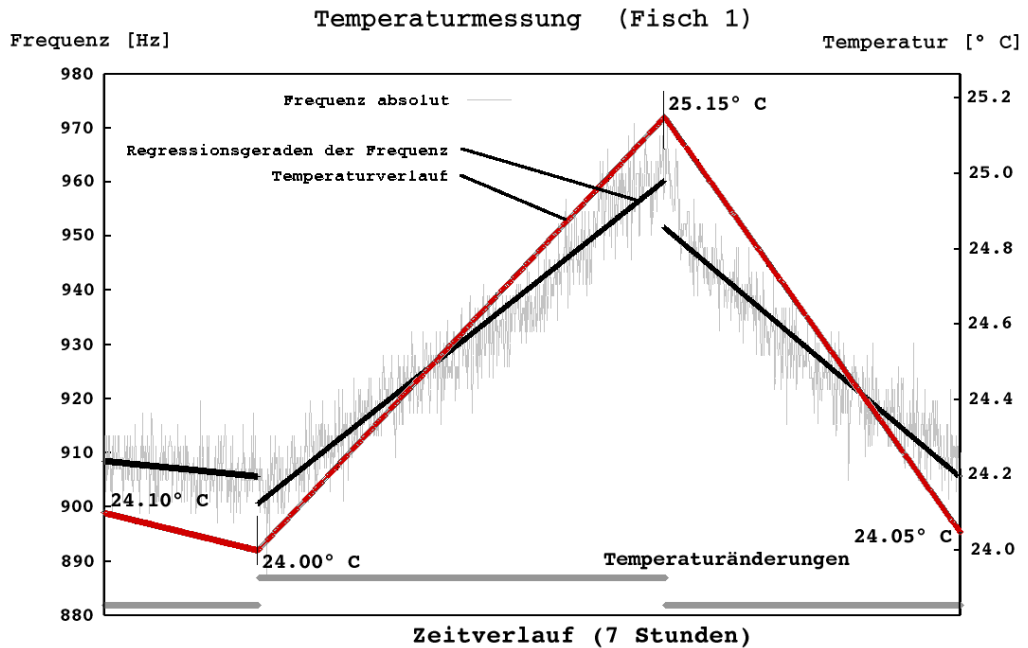


Abbildung 4.8: Der Frequenzverlauf mit Regressionsgeraden in Abhängigkeit von der Temperatur, getestet wurde Fisch 1.

Diagrammbalken geben Temperaturänderungen durch einen Sprung wieder, sie dienen der Übersicht. Der rote Balken zeigt den Temperaturverlauf als Gerade über deren Steigung. Die schwarzen Balken sind Regressionsgeraden der Frequenz. Die Darstellung der Frequenz setzt sich aus 3488 Einzelmessungen zusammen.

4.5.2 Versuch 2 — Temperaturdifferenz 1.15° C — Fisch 5

Die Diagrammelemente entsprechen denen von Versuch 1. Versuch 2 dauerte etwas länger, die Temperaturdifferenz war größer (1.15° C gegenüber 0.5° C). Die Aussage der beiden Diagramme ist dieselbe: Für die gemessenen Temperaturbereiche steigt und fällt die Frequenz mit der Temperatur.

Weitere Versuche folgten. So wurde in 17 Versuchen die Abhängigkeit der Frequenz von der Leitfähigkeit (Versuche mit NaCl und KNO₃), in 5 Versuchen die von der Sauerstoffkonzentration überprüft. In keinem dieser Versuche konnten weitere Beziehungen mit der Entladungsfrequenz erkannt werden, sie werden

4.5 Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Frequenz

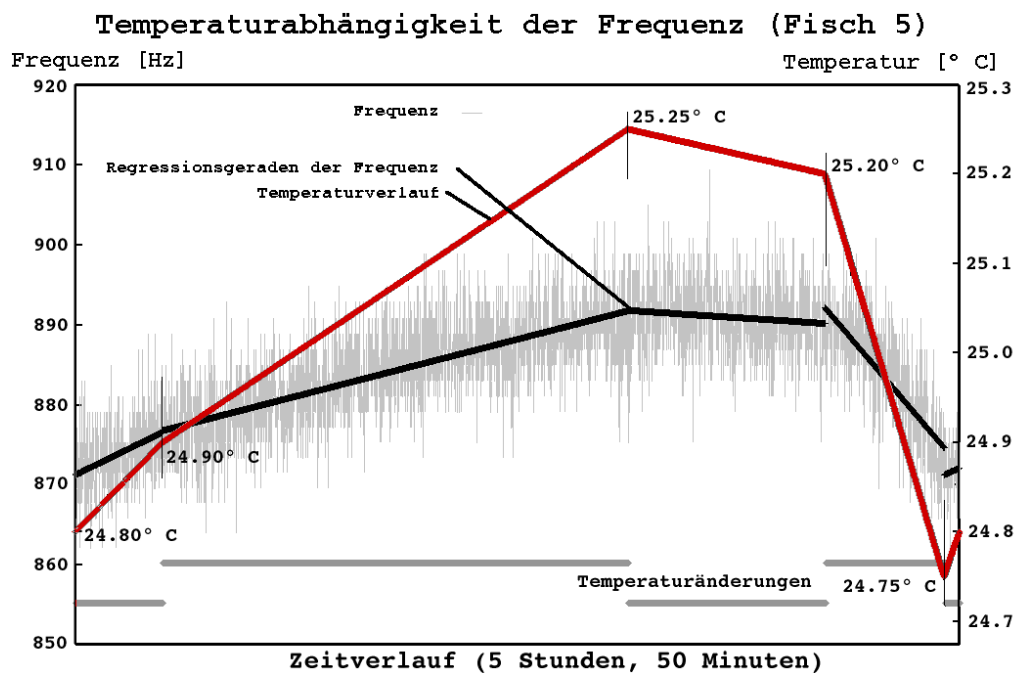


Abbildung 4.9: Der Frequenzverlauf mit Regressionsgeraden in Abhängigkeit von der Temperatur, getestet wurde Fisch 5.

deshalb nicht in Diagrammen dargestellt.

In einer anderen Arbeit (BULLOCK et al., 1972) befaßte man sich mit dem Einfluß der Zugabe von MS-222 oder CO₂, beide verlangsamten den Stoffwechsel, auf die Frequenz der elektrischen Entladungen von *A. albifrons*. Man fand, daß bei Zugabe von MS-222 die Frequenz der Entladungen verringert wird. Bei der Absenkung des pH durch CO₂ konnte ebenfalls Frequenzverringering beobachtet werden.

Einfluß auf die Frequenz nehmen nur Veränderungen, die sich auf den Stoffwechsel auswirken. Es wurde bisher kein Reiz gefunden, der Einfluß auf die Entladungsfrequenz hat, sich aber nicht auf den Stoffwechsel auswirkt. Man kann also davon ausgehen, daß mit einer Verringerung der Stoffwechselfunktion das Absenken der Entladungsfrequenz einhergeht, mit einer Erhöhung der Stoffwechselfunktion das Ansteigen der Entladungsfrequenz.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform der Entladungen

4.6.1 24 Stunden Messung

Die Elemente des Diagramms 4.10, S. 60: Auf der linken y-Achse ist die qualitative Wellenformbewertung in Prozent Abweichung zur Referenzkurve aufgetragen, auf der rechten y-Achse ist die Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ aufgetragen. Die x-Achse ist die Zeitachse.

Die dunkelgraue Linie markiert die Zugabe von NaCl zur Veränderung der Leitfähigkeit. Die in grau gezeichnete Funktion ist die qualitative Bewertung der Wellenform in Prozent. Der Wert kommt wie folgt zustande: Aus allen (verwertbaren) Einzelmessungen bis zum ersten Zusatz wird die Kurvenform zur Berechnung einer Durchschnittskurvenform herangezogen, die weiter als Referenz verwendet wird. Nun kann die Kurve ermittelt werden, die am wenigsten Abweichung zur Referenzkurve zeigt. Dann wird die Kurve ermittelt, welche die größte Abweichung aufweist. Die Differenz dieser beiden Werte bildet den Wertebereich, in dem alle anderen Kurvenformdifferenzen liegen. Demnach werden alle diese Kurven, je nach Deckung mit der Referenzkurve, mit einem Wert (in Prozent) versehen, der „Kurvenformbewertung“ oder „qualitativen Wellenformbewertung“. Die Werte können wie folgt interpretiert werden:

Negatives Vorzeichen: Eine negative Abweichung bedeutet, daß die Kurve überdurchschnittlich gut mit der Referenzkurve übereinstimmt.

Null: Die Kurve weicht um den gleichen Betrag von der Referenzkurve ab wie der durchschnittliche Anteil aller verwertbaren Einzelmessungen.

Positives Vorzeichen: Die Abweichung der Einzelmessung von der Referenzkurve ist größer als beim Durchschnitt aller Einzelmessungen.

Regressionsgeraden (hellgrau) erleichtern die Interpretation der qualitativen Wellenformbewertung: Fällt die Regressionsgerade (RG), so nähern sich die Einzelmessungen der Referenzkurve an, steigt die RG, so entfernt sich die Kurvenform von der Referenzkurve.

Anmerkung: Finden durch die Veränderung der Parameter nur sehr geringe Veränderungen der Kurvenform statt, so erscheinen geringe Kurvenformunterschiede

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

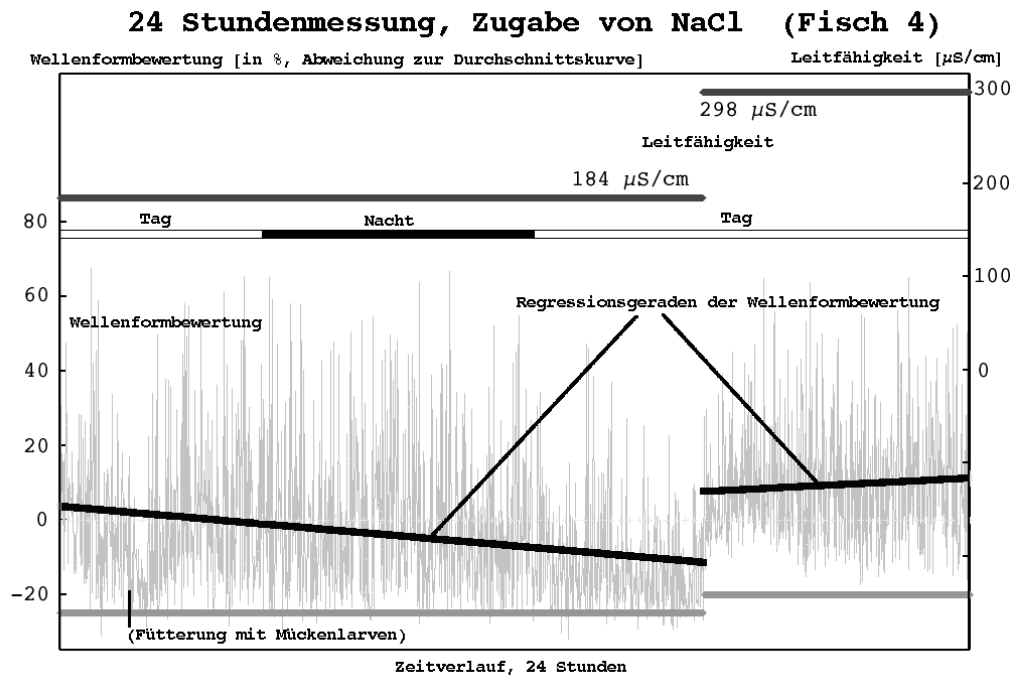


Abbildung 4.10: Die qualitative Wellenformbewertung mit Regressionsgeraden im Verlauf eines Tages, Fisch 4.

(z. B. durch hohe Aktivität des Fisches) als deutlichste Abweichungen. Dies liegt an der Skalierung der Daten.

Tag/Nacht-Balken: Dieser Balken markiert die Lichtverhältnisse während des Versuchs.

Die Leitfähigkeit ist schwarz gezeichnet. Sie beträgt zu Beginn des Versuchs $184 \mu\text{S}/\text{cm}$, nach Zugabe von NaCl $298 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Beobachtungen

Nach der Fütterung mit lebenden Mückenlarven näherte sich die Kurvenform der Einzelmessungen der Referenzkurvenform. Dies deckt sich mit der Beobachtung, daß der Fisch nach der Nahrungsaufnahme etwas ruhiger wurde und in seinem Versteck blieb.

Bis zum Morgen veränderte sich die Kurve der qualitativen Wellenformbewertung kaum. Nach Sonnenaufgang blieben die Vergleichswerte überdurchschnitt-

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

lich gut. Dies kann auf das Einsetzen der Ruhephase des Tieres zurückgeführt werden, während der das Tier sein Versteck nur selten verläßt. Anmerkung: Der Umstand, daß die Wellenform der Entladungen schlechter bewertet wird, wenn das Tier sein Versteck verläßt, wurde nur bei Messungen deutlich, bei denen es sonst kaum eine oder keine Veränderungen der Kurvenform gab.

Nach Zugabe von 16 ml 1.58 M NaCl Stammlösung erhöhte sich die Leitfähigkeit von $184 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf $298 \mu\text{S}/\text{cm}$. In der Darstellung der Kurvenbewertung sieht man einen Shift, danach eine geringe Steigung der Regressionsgeraden. Der Shift kommt durch die Erhöhung der Leitfähigkeit zustande, er ist nicht auf den Fisch zurückzuführen. Im Vorversuch mit dem Signalgenerator konnte ebenfalls ein solcher Shift beobachtet werden. Es hat sich gezeigt, daß sich die Amplitude des künstlichen Signals mit steigender Leitfähigkeit verringert, gleiches trifft auch für das durch den Fisch verursachte Signal zu.

Nach Zugabe der NaCl-Lösung entfernt sich die Kurvenform von der Referenzkurve bis sie sich anschließend in einem abgegrenzten Wertebereich bewegt. Diese Reaktion ist auf den Fisch zurückzuführen, da sie nicht sofort nach der Zugabe von NaCl abgeschlossen war. (Die durch die Leitfähigkeitserhöhung bedingte Verringerung der Amplitude ist sofort nach der Durchmischung des im Testaquarium befindlichen Wassers abgeschlossen.)

In weiteren Versuchen wurde beobachtet, wie sich die durch Zugabe von NaCl bedingte Leitfähigkeitsänderung auswirkt. Um die Reaktion des Fisches deutlicher erkennen zu können, wurde die Dauer des Versuchs auf ca. sechs Stunden reduziert. Im Diagramm vervierfacht sich damit der pro Zeiteinheit auf der x-Achse zur Verfügung stehende Platz.

4.6.2 6 Stunden Messung

Die Elemente des Diagramms 4.11, S. 63 sind identisch mit denen der 24 Stunden-Messung.

Bereich 1 ($174 \mu\text{S}/\text{cm}$): Die Wellenformbewertung bleibt annähernd gleich, einige Ausreißer zu Beginn der Messung führen dazu, daß die Regressionsgerade einen negativen Trend zeigt.

Bereich 2 ($174 - 273 \mu\text{S}/\text{cm}$): Der anfängliche Shift der Wellenformbewertung ist auf die plötzliche Änderung der Leitfähigkeit zurückzuführen, dadurch wird,

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

wie schon erwähnt, die Amplitude der Entladungen verringert. Anschließend entfernt sich die Kurvenform kontinuierlich von der Durchschnittskurve bis sie sich nach ca. 2/3 kaum mehr verändert. Die Regressionsgerade zeigt eine deutliche Steigung.

Bereich 3 (273 – 367 $\mu\text{S}/\text{cm}$): Der technisch bedingte Shift ist wieder erkennbar, anschließend verändert sich bezüglich der Wellenformbewertung nichts mehr.

Nach dem ersten NaCl-Zusatz findet eine Wellenformveränderung statt, deren Verlauf sich schlecht darstellen läßt, da es sich um mehrere hundert Kurven handelt. Stattdessen folgt eine Übersicht über die Durchschnittskurven der Bereiche 1 bis 3 und ein Vergleich der Durchschnittskurven der Bereiche 1 und 3.

In Leitfähigkeitsbereich 2 (174 – 273 $\mu\text{S}/\text{cm}$) findet nach 2/3 eine Stagnation der Kurvenveränderung statt, bis auf die Verringerung der Amplitude erfährt die Wellenform der Entladungen keine Veränderung mehr. Sie verändert sich bis zum Erreichen einer Leitfähigkeit von etwa 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$, darüber findet keine Modulation des Signals mehr statt. Nachfolgende Messungen werden deshalb nur noch bis ca. 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Leitfähigkeit, dafür in kleineren Schritten, durchgeführt.

Übersicht über die Durchschnittskurven der Leitfähigkeitsbereiche 1 bis 3

In der Abbildung 4.12, S. 64 sind die Durchschnittskurven der Bereiche 1 bis 3 der in Abbildung 4.11, S. 63 aufgezeigten Messung dargestellt. Amplitude und Frequenz wurden skaliert. Man kann den Unterschied der Wellenformen für die Bereiche 1 und 3 erkennen, dazwischen liegt die Wellenform des Leitfähigkeitsbereichs 2.

Um den Unterschied besser erfassen zu können, wird in Abbildung 4.13, S. 65 die Differenz zwischen der Referenzdurchschnittskurve und der Durchschnittskurve des letzten Zusatzbereichs dargestellt.

Im Diagramm Abb. 4.13, S. 65 ist die Referenzdurchschnittskurve (= Durchschnittskurve „ohne Zusatz“) und die Durchschnittskurve des letzten Zusatzbereichs eingezeichnet, die Durchschnittskurve des 1. Zusatzbereichs wurde der Übersicht wegen weggelassen. In grüner Farbe eingezeichnet ist die Differenz der beiden Durchschnittskurven. Die Differenz wurde verdoppelt eingezeichnet, damit die Unterschiede leichter zu erkennen sind. Darunter liegt die Nulllinie in blauer Farbe.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

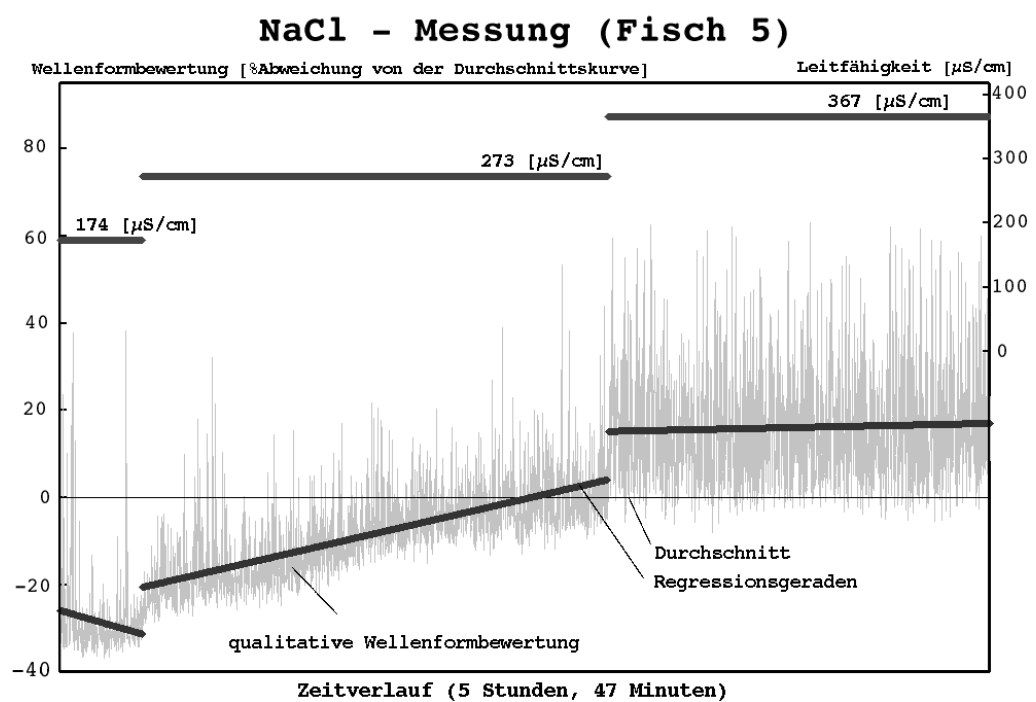


Abbildung 4.11: Der Anstieg der qualitativen Wellenformbewertung nach der ersten Zugabe von NaCl ist deutlich zu erkennen, ab einer Leitfähigkeit von ca. $280 \mu\text{S}/\text{cm}$ verändert sich die Kurvenformbewertung nicht mehr.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

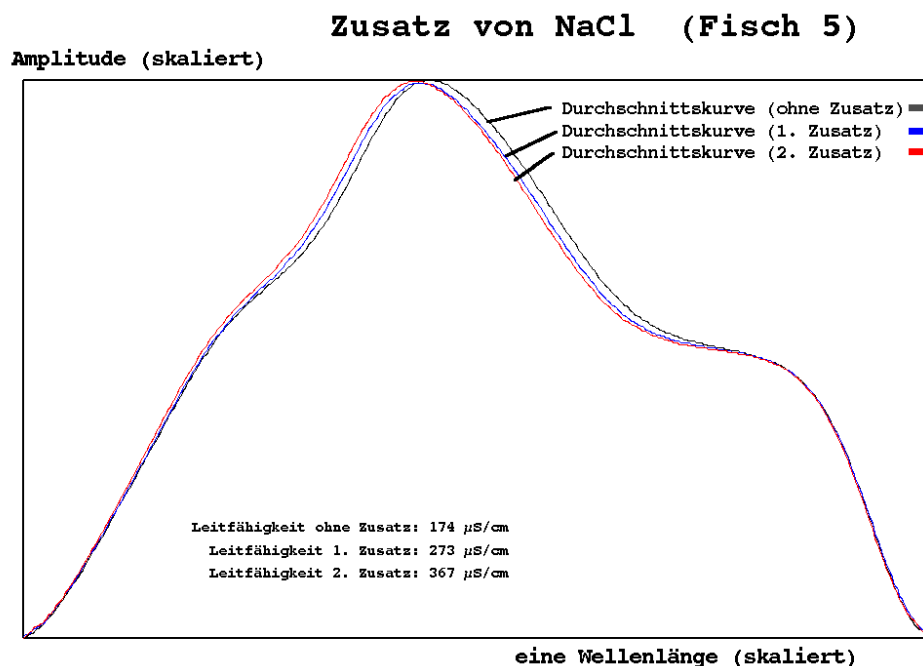


Abbildung 4.12: Referenzkurve und die Durchschnittskurven der Zusatzbereiche.

Der Unterschied der Durchschnittskurven scheint von einer Verschiebung des Hauptpeaks herzurühren, Anfang und Ende der Kurven sind deckungsgleich. In vier weiteren Versuchen wurde dieser Zusammenhang bestätigt und gleiche Differenzkurvenformen gefunden.

4.6.3 KNO_3 Messung

In Abbildung 4.14 auf Seite 65 ist das Ergebnis einer Messung dargestellt, bei der die Leitfähigkeit mittels Zugabe von KNO_3 auf 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und damit einhergehend, die Nitratkonzentration von 50 auf 100 mg/Liter angehoben wurde.

Im oberen Diagrammabschnitt sind der Nitratgehalt und die Leitfähigkeit gegen den Zeitverlauf aufgetragen. Amplitude und Frequenz der Durchschnittskurven sind skaliert dargestellt, eingezeichnet ist die Referenzdurchschnittskurve und die Durchschnittskurve des letzten Zusatzbereichs mit 100 mg KNO_3 pro Liter und 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Leitfähigkeit. Die Differenz der Durchschnittskurven ist wieder in grün eingezeichnet.

Vergleicht man die Differenz der Durchschnittskurven dieser Messung mit der

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

NaCl - Differenz der Durchschnittskurven (Fisch 5)

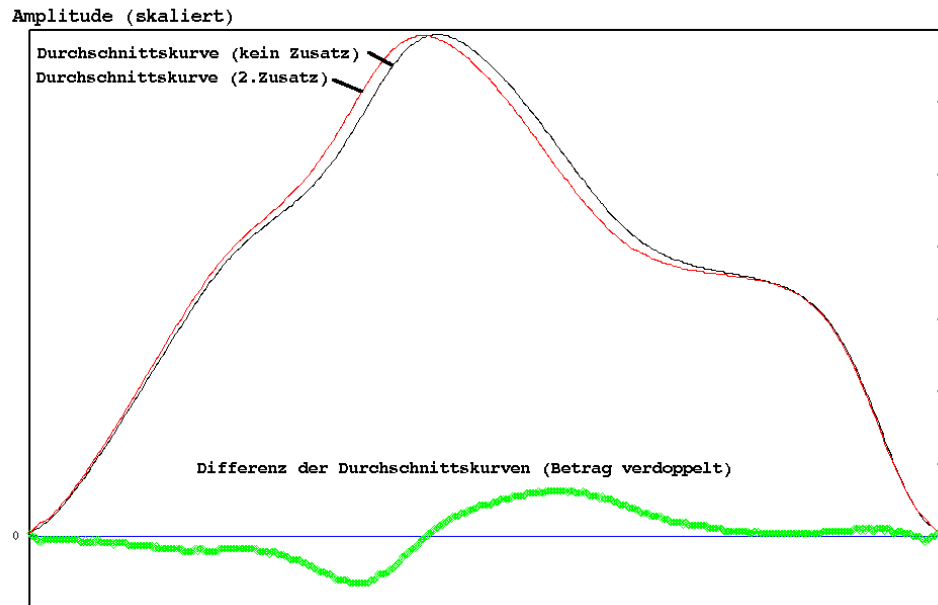


Abbildung 4.13: Die grüne Differenzkurve läßt den Unterschied der Durchschnittskurven erkennen.

Differenz der skalierten Durchschnittskurven (Fisch 6)

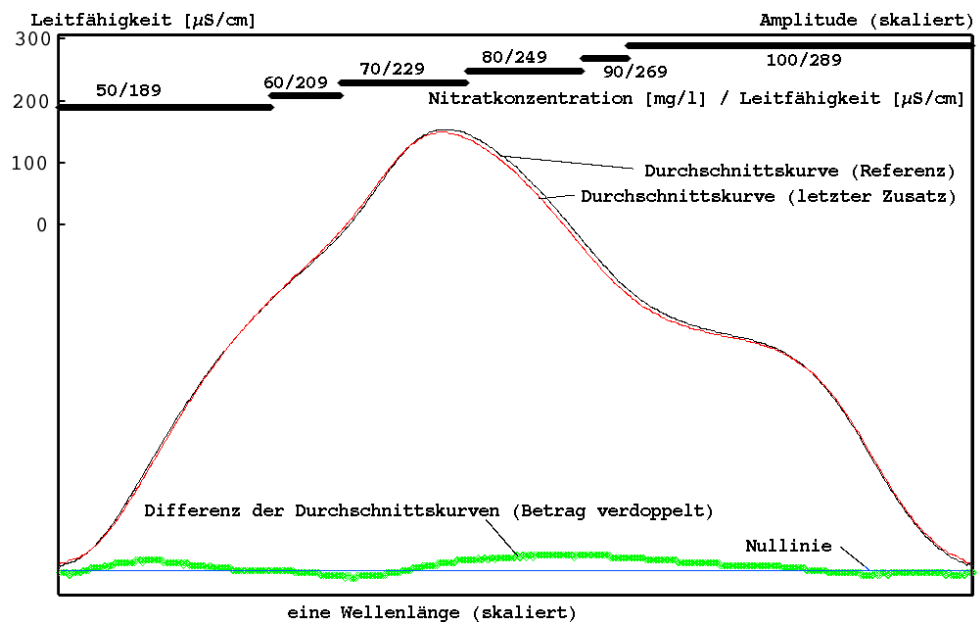


Abbildung 4.14: Die Differenz der Durchschnittskurven unterscheidet sich zu der in Abb. 4.13 gefundenen deutlich.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Durchschnittskurvendifferenz der NaCl-Messung, so kann man folgendes feststellen: Die Differenzkurve der KNO₃-Messung befindet sich anfangs im positiven, die der NaCl-Messung schon im negativen Bereich. Der weitere Verlauf der beiden Differenzkurven ist bei beiden Versuchen etwa gleich, wenn auch die Intensität bei der NaCl-Messung höher ist. Beim Erreichen der rechten Seite des Diagramms unterscheiden sich die Differenzkurven wieder, die Kurve der KNO₃-Messung befindet sich im negativen, die Differenzkurve der NaCl-Messung im positiven Wertebereich.

Die Aussage dieses Ergebnisses relativiert sich wenn man bedenkt, daß mit verschiedenen Fischen gemessen wurde und die Endleitfähigkeit der beiden Versuche unterschiedlich war (NaCl: 367 $\mu\text{S}/\text{cm}$, KNO₃: 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$). In einer weiteren Versuchsreihe sollen deshalb an aufeinander folgenden Tagen mit dem selben Fisch erst eine NaCl-Messung, dann eine KNO₃-Messung durchgeführt werden. Die Leitfähigkeit soll dabei in gleichen Schritten bis zur Endleitfähigkeit von 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ angehoben werden.

4.6.4 Vergleich zweier Versuche mit NaCl- und KNO₃-Zugabe

Versuch 1 — Fisch 4

Die Messungen erfolgten zunächst unter Zugabe von NaCl, am folgenden Tag unter Zugabe von KNO₃. Für die Versuche wurde der gleiche Fische verwendet, die Leitfähigkeit wurde in vergleichbaren Schritten auf dieselbe Endleitfähigkeit angehoben, einziger Unterschied war die Art der Ionen, die die Leitfähigkeitsänderung hergerufen haben.

Die qualitative Wellenformbewertung verläuft für die in Abb. 4.15, S. 67 und Abb. 4.16, S. 67 dargestellten Versuche ähnlich. Die Regressionsgerade für den Referenzbereich (kein Zusatz) zeigt bei beiden Versuchen eine geringe Steigung. Die Steigung der Regressionsgeraden ist bei beiden Versuchen nach Zugabe des ersten Zusatzes am höchsten, für die weiteren Zusätze nimmt die Steigung der Regressionsgeraden ebenfalls bei beiden Versuchen wieder ab.

Es scheint sich zu bestätigen, daß nach Erreichen einer bestimmten Leitfähigkeit — bis auf die technisch bedingte Verringerung der Amplitude („Shift“) — keine Veränderung der Kurvenform mehr stattfindet. Anmerkung: Ein quantitati-

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

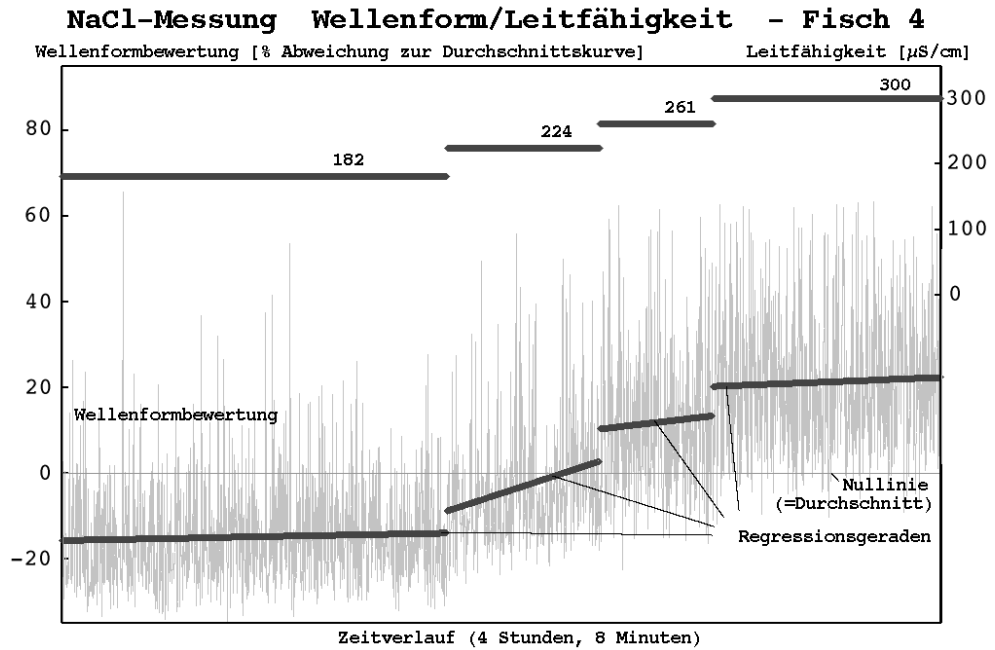


Abbildung 4.15: Die Veränderung der Wellenformbewertung bei Zugabe von NaCl.

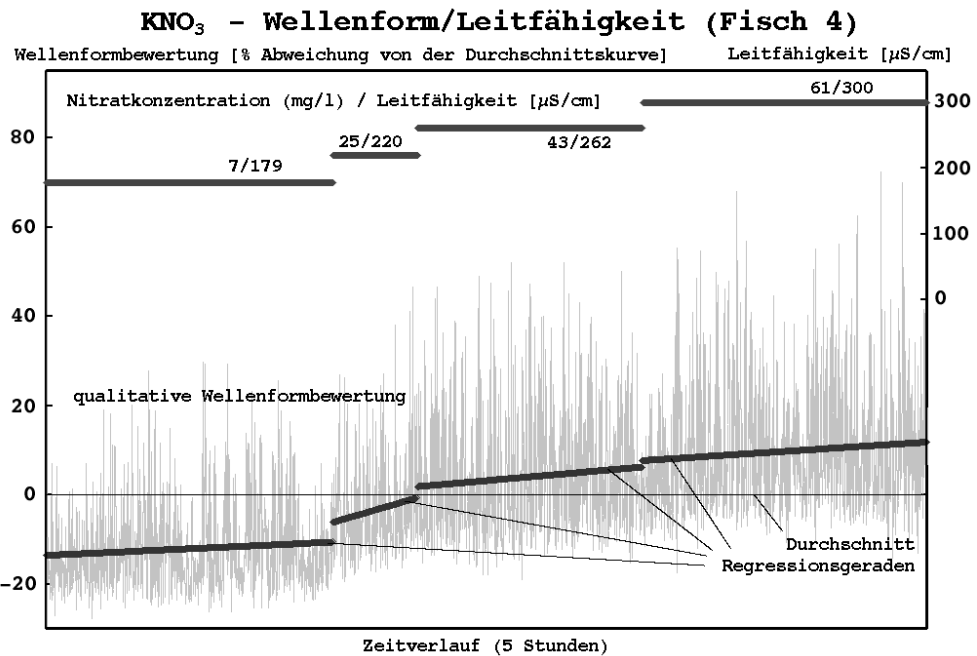


Abbildung 4.16: Die Veränderung der Wellenformbewertung bei Zugabe von KNO₃.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

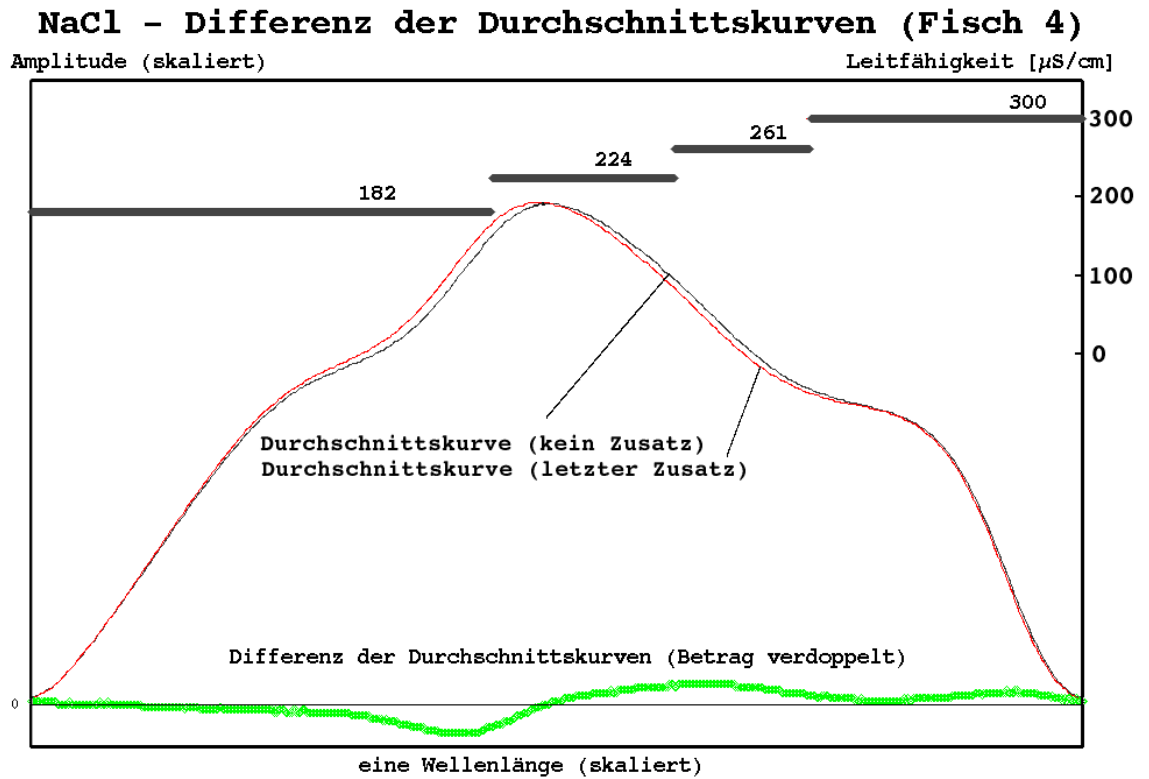


Abbildung 4.17: Die Differenz der Durchschnittskurve des letzten Zusatzbereichs zur Referenzkurve bei Zugabe von NaCl.

Der Vergleich der Wellenformbewertung der Diagramme 4.15 und 4.16 ist nicht möglich, da es sich hierbei um skalierte Daten handelt, vgl. Abschnitt 4.6.1 auf Seite 59 und folgende. Eine quantitative Aussage kann erst durch den Vergleich der Kurvenformdifferenzen (vgl. 4.19, S. 69) erfolgen.

In den Diagrammen 4.17, S. 68 und 4.18, S. 69 ist jeweils die Referenzdurchschnittskurve und die Durchschnittskurve des letzten Zusatzbereichs dargestellt. Die Balken mit der Angabe zum Leitfähigkeitsverlauf während des Versuchs sind der Vollständigkeit halber enthalten, sie geben die Leitfähigkeit über den Verlauf der Messung wieder. Ihnen kann im Fall der NaCl-Messung die Leitfähigkeit, im Fall der KNO_3 -Messung zusätzlich die Nitratkonzentration der Bereiche entnommen werden. Die Durchschnittskurvendifferenz ist grün eingezeichnet. Beim Vergleich der beiden Differenzkurven sieht man, daß der Unterschied zwischen der Differenzkurve des NaCl-Versuchs (Leitfähigkeitsänderung $118 \mu\text{S}/\text{cm}$) und

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

KNO₃ - Differenz der Durchschnittskurven (Fisch4)

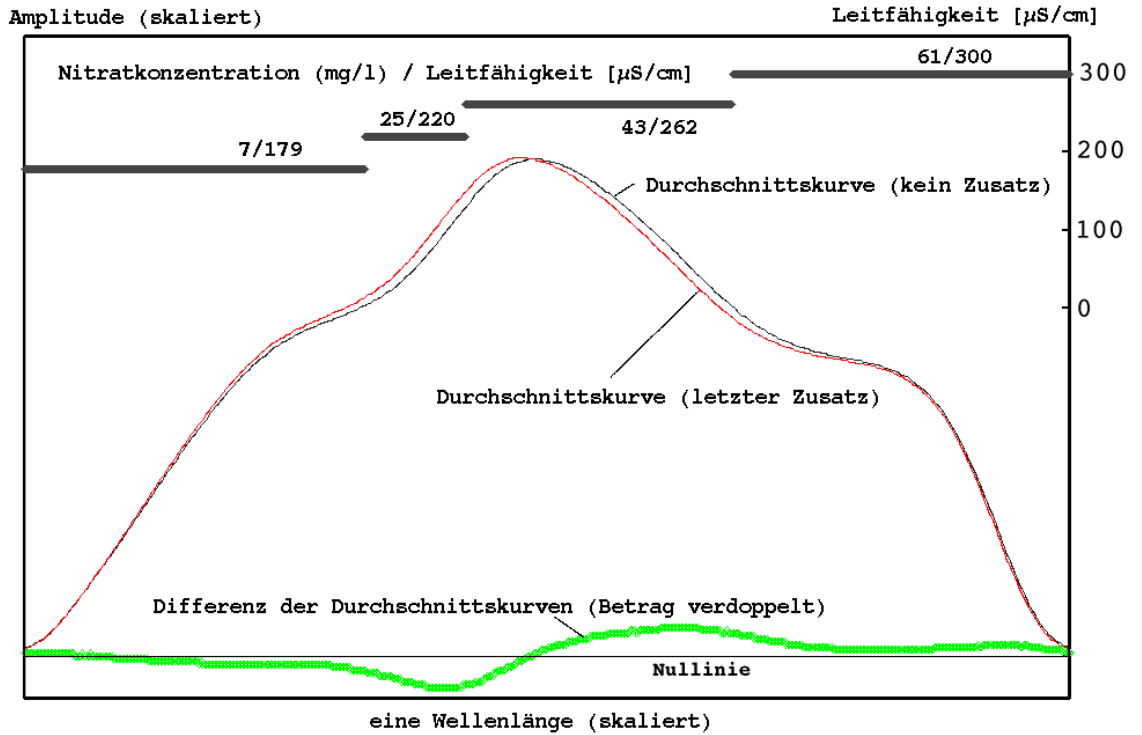


Abbildung 4.18: Durch Zugabe von KNO₃ verursachte Kurvenformdifferenz (grün).

Durchschnittskurvendifferenzvariation - Fisch 4

Leitfähigkeitsänderung durch unterschiedliche Ionen

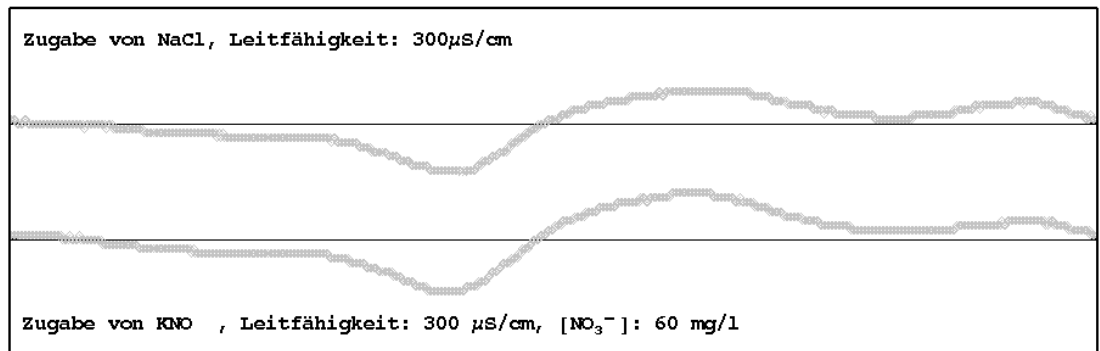


Abbildung 4.19: Die Kurvenformdifferenzen aus Abb. 4.17, S. 68 und Abb. 4.18, S. 69.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Durchschnittskurvendifferenzvariation - Fisch 3

Leitfähigkeitsänderung durch unterschiedliche Ionen

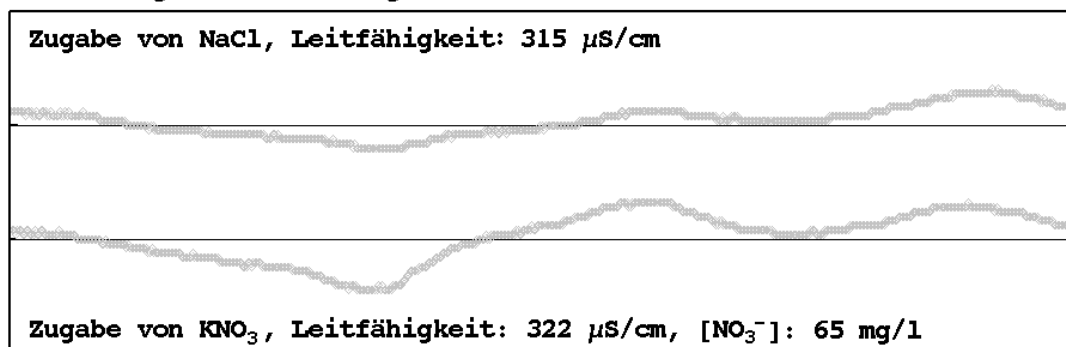


Abbildung 4.20: Die Kurvenformdifferenzen aus Versuch 2 in der Übersicht.

der des KNO_3 -Versuchs (Leitfähigkeitsänderung 121 $\mu\text{S}/\text{cm}$) minimal ist. Die beiden Kurven sind in der Abbildung 4.19 auf Seite 69 noch einmal aufgetragen, damit sie direkt miteinander verglichen werden können. Das Tier zeigt keine Kurvenformdifferenz zwischen einer durch NaCl- oder KNO_3 -Zugabe verursachten Leitfähigkeitsänderung. Es kann aber eine höhere Intensität der unter KNO_3 -Zugabe gemessenen Kurvenformdifferenz erkannt werden. Bei der Zugabe von KNO_3 bis zu einer Leitfähigkeit von 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ wurden 54 mg NO_3^- pro Liter zugegeben.

Versuch 2 — Fisch 3

Die Diagramme der qualitativen Kurvenformbewertung (nicht aufgeführt) sind beinahe identisch mit denen aus Versuch 1 (Fisch 4), vgl. Abschnitt 4.6.4, S. 66. Die Ermittlung der Durchschnittskurvendifferenz wurde in Versuch 1 gezeigt (siehe Vergleich der Durchschnittskurven, Abb. 4.17 und Abb. 4.18 auf den Seiten 68 und 69). Die Ergebnisse aus Versuch zwei sind in Diagramm 4.20, S. 70 zu sehen, die Durchschnittskurvendifferenz der NaCl-Messung (Leitfähigkeitsänderung 131 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und der KNO_3 -Messung (Leitfähigkeitsänderung 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sind darin abgebildet.

Die beiden Kurven unterscheiden sich, wie in Versuch 1, hauptsächlich in der

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Intensität der Differenz. Die Intensität ist jedoch bei beiden Versuchen jeweils bei der KNO_3 -Messung höher. Die Kurvenformveränderungen, die durch die Versuche verursacht wurden, sind bei beiden Tieren ähnlich (vgl. Abb. 4.19, S. 69), obwohl die „Ausgangs“-Kurvenform der Tiere verschieden ist (vgl. Abb. 4.1, S. 49). Jedoch scheinen die Tiere nicht spezifisch auf Veränderungen zu reagieren, sondern mit einer, für jedes Tier eigenen, „Standard“-Antwort auf alle Reize. Die Intensität der Reaktion ist jedoch verschieden.

In den bisherigen Versuchen wurde gezeigt, daß die Tiere auf eine Leitfähigkeitsveränderung des Aquarienwassers mit einer Änderung der Kurvenform ihrer elektrischen Signale reagieren. Jedoch konnten die Tiere scheinbar nicht zwischen den getesteten Salzen (NaCl , KNO_3) unterscheiden. Außerdem war die Durchschnittskurvendifferenzvariation der Tiere untereinander zwar ähnlich, aber nicht gleich (vgl. Durchschnittskurvenvariation Fisch 4, Abb. 4.19, S. 69 und Fisch 3, Abb. 4.20, S. 70).

4.6.5 Versuche mit $[\text{O}_2]$ -Variation als Reiz

In dieser Versuchsreihe wurde herausgefunden, wie die Tiere auf Veränderung des Sauerstoffgehalts reagieren. Dazu wurde der Sauerstoffgehalt zu Beginn des Versuchs konstant gehalten um, wie immer zu Versuchsbeginn, die Referenzkurve zu ermitteln. Danach wurde der Sauerstoffgehalt auf eine bestimmte, für den Fisch bedrohliche Konzentration abgesenkt. Die Absenkung des Sauerstoffgehalts erfolgte über Zufuhr von Stickstoff über den Ausströmer. Als Vergleichswerte dienten Erfahrungswerte aus der Fischzucht nach denen 5 mg O_2 pro Liter als Minimum für die Fischzucht angesehen werden. 3 mg O_2 pro Liter gelten über längere Zeiträume als bedenklich, bei 1 mg Sauerstoffgehalt und darunter sterben Welse und Karpfen.

Um den Sauerstoffgehalt wieder zu erhöhen, wurde in das Testaquarium statt des Stickstoffs wieder Luft eingeblasen.

Fisch 6, 1. Messung

Auf der linken y-Achse des Diagramms 4.21, S. 72 ist wieder die qualitative Wellenformbewertung in Prozent, auf der rechten y-Achse die Sauerstoffkonzentra-

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

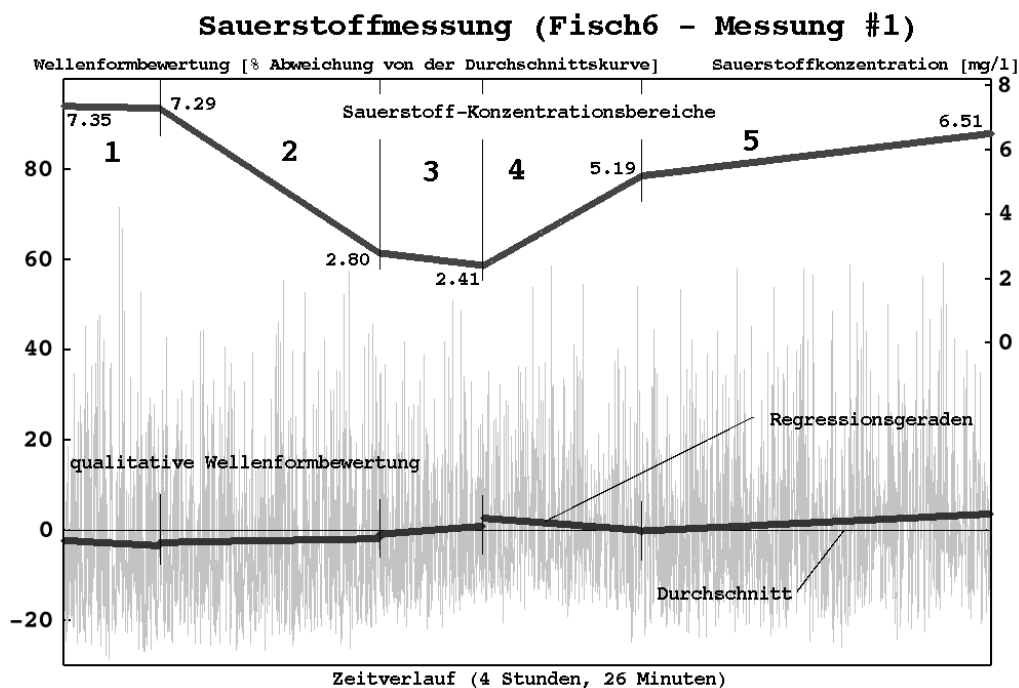


Abbildung 4.21: Die Reaktion von Fisch 6 auf Absenkung der Sauerstoffkonzentration bei der ersten Messung.

tion in mg/Liter aufgetragen. Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration ist in der oberen Hälfte des Diagramms eingezeichnet. Mittels der Zahlen 1 bis 5 sind die Konzentrationsbereiche markiert. Bereich 1 schließt somit den Konzentrationsverlauf von 7.35 bis 7.29 mg O₂ pro Liter ein, Bereich 2 den Konzentrationsverlauf von 7.29 bis 2.80 mg O₂ pro Liter usw. Diese Einteilung ist für das Verständnis des Diagramms 4.21, S. 72 wichtig. Der Sauerstoffkonzentrationsverlauf ist als Gerade für den jeweiligen Bereich eingezeichnet, der wirkliche Verlauf entspricht jedoch einer Sättigungskurve.

Die mit „Durchschnitt“ bezeichnete Nulllinie markiert das Bewertungsniveau, auf dem sich der Durchschnitt aller gemessenen Kurven befindet.

Bereich 1 und 2: Die Steigung der Regressionsgeraden ist gering.

Bereich 3: Der Sauerstoffgehalt fällt nur noch schwach, befindet sich aber schon auf niedrigem Niveau. Die Steigung der Regressionsgeraden nimmt zu, die Kurvenbewertung fällt zunehmend schlechter aus.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

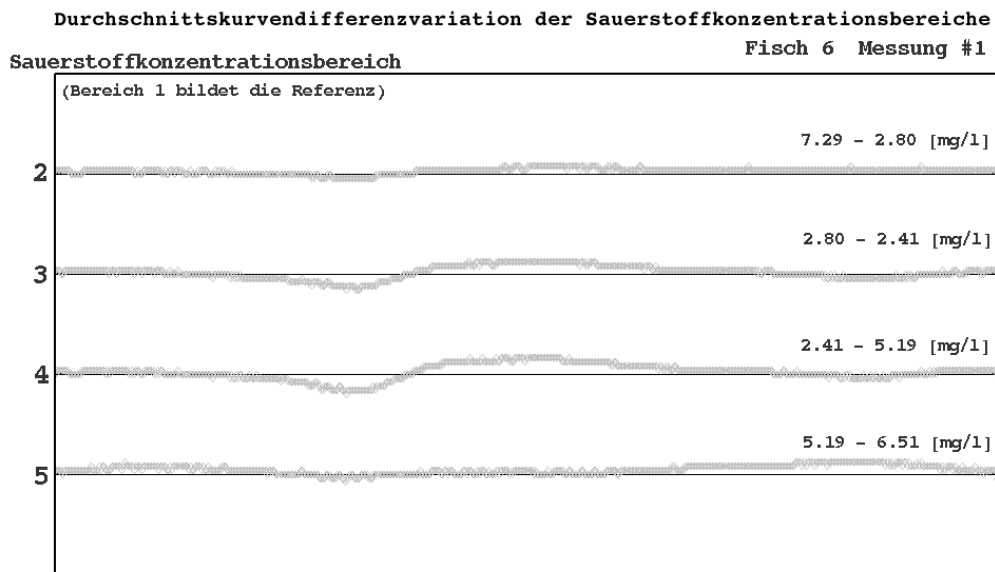


Abbildung 4.22: Die Durchschnittskurvenvariation während der Messung — Die Kurven der Bereiche 2 und 5 sowie 3 und 4 sind sich ähnlich. Die Differenzkurve aus Bereich 5 zeigt, daß sich die Kurvenform während der Sauerstoffzufuhr wieder der Referenzkurve annähert.

Bereich 4: Der Sauerstoffgehalt steigt stark an. Etwa gleiche Steigung der Regressionsgeraden wie in Bereich 3, aber fallend, d. h. die Kurven werden mit einem besseren Wert versehen, sie nähern sich der Referenzkurvenform wieder an.

Bereich 5: Der Sauerstoffgehalt erhöht sich nur noch langsam, die gemessenen Kurvenformen entfernen sich von der Referenzkurvenform.

In der Darstellung der Durchschnittskurvenformdifferenzvariation (Abb. 4.22, S. 73) ist die Differenz der Durchschnittskurve des jeweiligen Konzentrationsbereichs zur Referenzkurve eingezeichnet, die Differenz ist wieder verdoppelt. Die Bezeichnungen für die Bereiche finden sich auf der linken y-Achse (2 bis 5). Bereich 1 diente zur Ermittlung der Referenz und ist deshalb nicht eingetragen.

Es zeigt sich tendenziell, daß sich die Kurvenform bei Sauerstoffkonzentrationschwankungen reversibel verändert. Bei fallendem Sauerstoffgehalt entfernt sich die Kurvenform von der Referenzkurve, bei steigendem Sauerstoffgehalt nähert sie sich der Referenzkurvenform wieder an. In Bereich 5 verringert sich die Differenz zur Referenz, jedoch tritt auf der rechten Seite der x-Achse eine

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

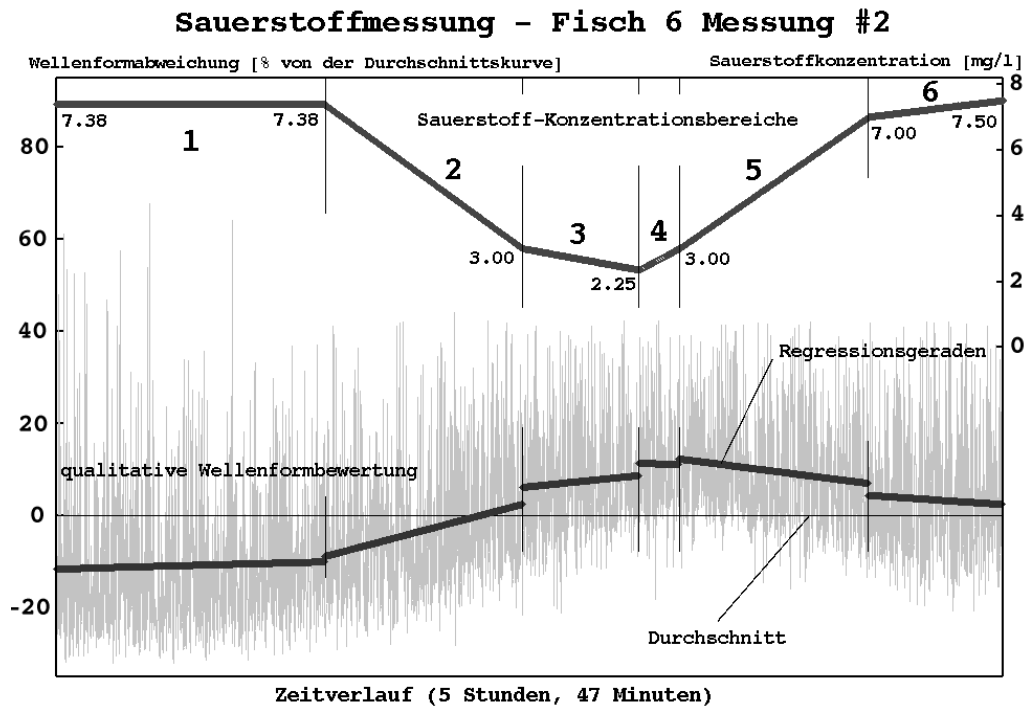


Abbildung 4.23: Die Reaktion von Fisch 6 auf Absenkung der Sauerstoffkonzentration bei der zweiten Messung.

Veränderung auf, deren Ursache nicht nachvollziehbar ist und in dieser Intensität auch nicht mehr beobachtet werden konnte.

Fisch 6, 2. Messung

Die Diagrammelemente der Abbildung 4.23, S. 74 entsprechen denen des Diagramms der qualitativen Wellenformbewertung der ersten Messung mit Fisch 6 (Abb. 4.21, S. 72). Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration ist hier in 6 Bereiche eingeteilt.

Bereich 1: Die Sauerstoffkonzentration bleibt konstant, die Steigung der Regressionsgeraden ist gering.

Bereich 2: Der Sauerstoffgehalt fällt rapide ab, die Regressionsgerade weist eine deutliche Steigung auf, die Kurvenform entfernt sich zunehmend von der Referenzkurve.

Bereich 3: Der Sauerstoffgehalt sinkt langsamer, befindet sich aber schon auf

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

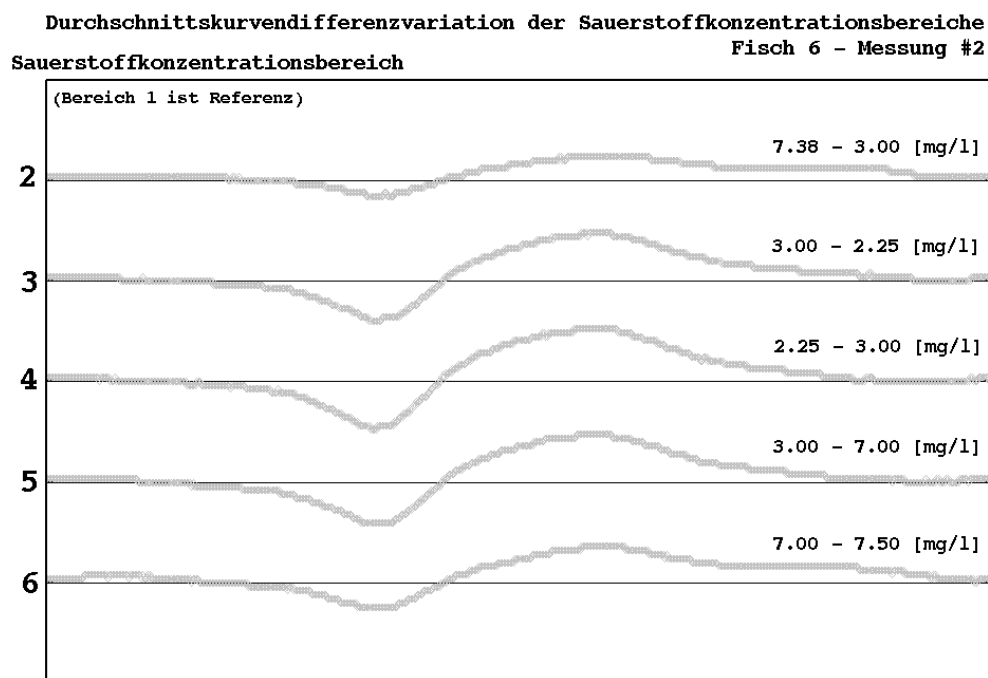


Abbildung 4.24: Während des Versuchs entfernt sich die Kurvenform bei Absenkung der $[O_2]$ von der Referenz. Erhöht man die $[O_2]$ wieder auf den Sauerstoffgehalt zu Versuchsbeginn, so nähert sich die Kurvenform wieder der Referenz an.

niedrigem Niveau. Die Kurvenform wird weiterhin zunehmend schlechter bewertet.

Bereich 4 + 5: Die Sauerstoffkonzentration steigt schnell, die Kurvenform nähert sich wieder der Referenzkurve an.

Bereich 6: Der Sauerstoffgehalt befindet sich wieder auf hohem Niveau und steigt nur noch langsam. Die Kurvenform nähert sich weiter der Referenzkurve an.

Vergleicht man diese Messung mit der ersten (vgl. Abb. 4.21, S. 72), so fällt die wesentlich stärker ausgeprägte Reaktion des Tieres auf die Veränderung des Sauerstoffgehalts auf.

Dem Diagramm (2. Messung mit Fisch 6, Abb. 4.24, S. 75) der Durchschnittskurvendifferenz der verschiedenen Sauerstoffkonzentrationsbereiche kann man entnehmen, daß sich die Kurvenform im Verlauf von Messung 2 wesentlich stärker verändert hat als bei Messung 1 (Abb. 4.22, S. 73). Man erkennt auch, daß die

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

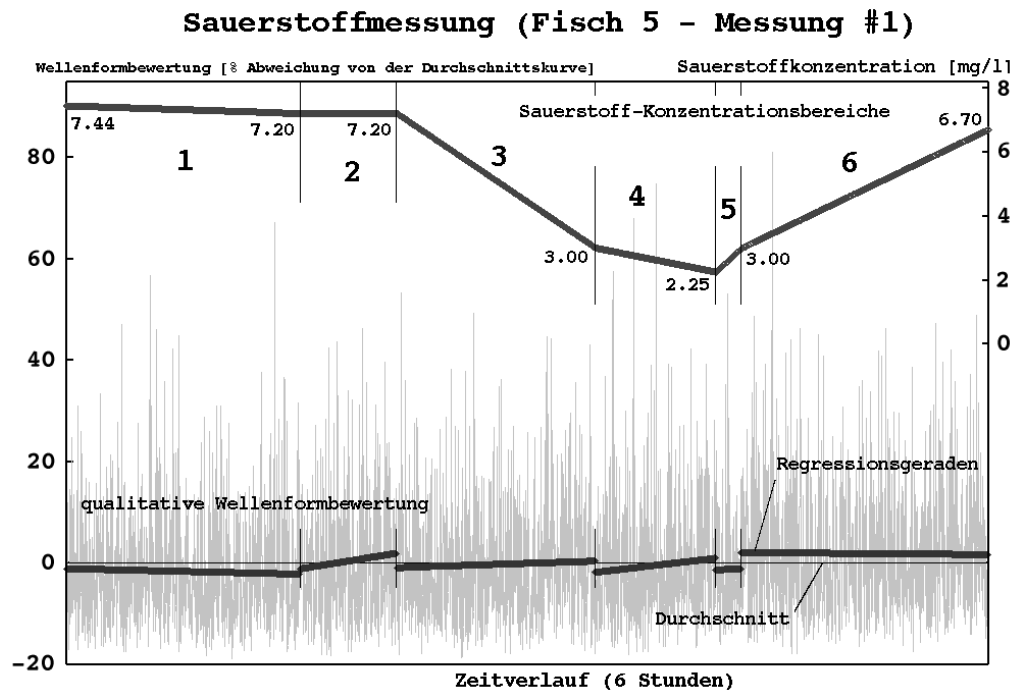


Abbildung 4.25: Die Reaktion von Fisch 5 auf Absenkung der Sauerstoffkonzentration, erste Messung. Es ist keine Tendenz der Kurvenformentwicklung erkennbar.

Veränderung reversibel ist und sich bei steigender Sauerstoffkonzentration teilweise wieder aufhebt. (Die Differenz wurde, wie immer, verdoppelt.)

Fisch 5, 1. Messung

Die qualitative Wellenformbewertung in Abb. 4.25, S. 76 verändert sich über den Verlauf des Versuchs kaum. Den Regressionsgeraden ist kein Trend zu entnehmen, der eine Verbindung zum Sauerstoffgehalt im Versuchsaquarium erkennen ließe. In der Abbildung der Durchschnittskurvendifferenzvariation zu diesem Versuch sieht man den Grund dafür: Es gibt keine erkennbare Abweichung der Kurvenform von der Referenz.

Fisch 5, 2. Messung

Siehe hierzu die Diagramme 4.27 und 4.28 auf den Seiten 78 und 79.

Bereich 1: Die Regressionsgerade bleibt weitgehend konstant.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

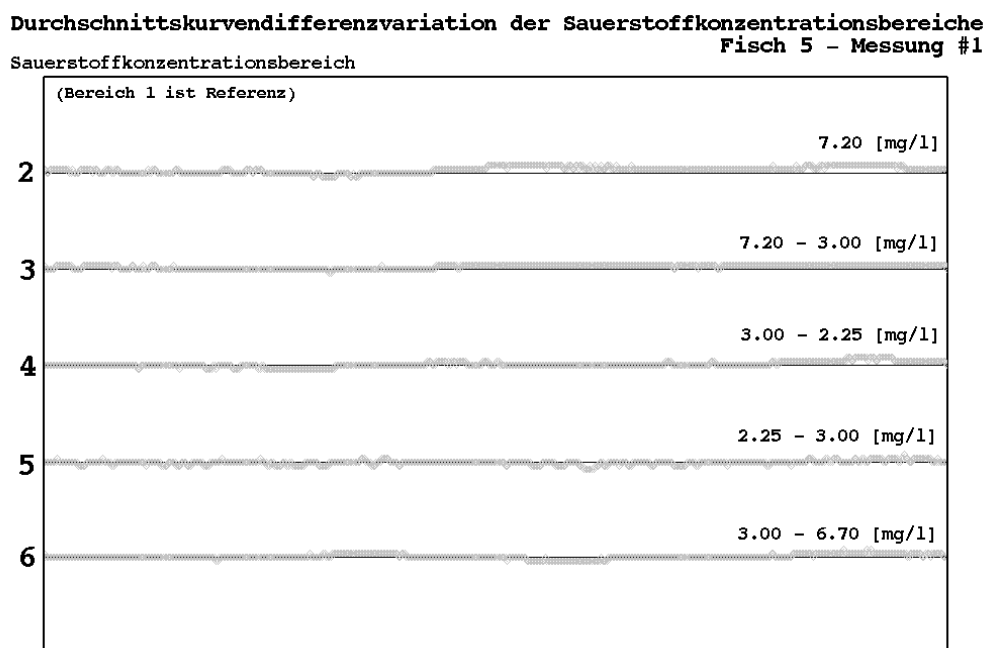


Abbildung 4.26: Die Kurvenform verändert sich kaum — dies erklärt das Ausbleiben jeglichen Trends in Abb. 4.25, S. 76.

Bereich 2: Steiler Anstieg der Regressionsgeraden.

Bereich 3 und 4: Geringer Anstieg der Regressionsgeraden, geringe Veränderung der Sauerstoffkonzentration.

Bereich 5: Steiler Anstieg der Regressionsgeraden, Anstieg des Sauerstoffgehalts von 2.25 mg/Liter auf 3.50 mg/Liter in kurzer Zeit.

Bereich 6, 1. Hälfte: Der Kernbereich der qualitativen Kurvenformbewertung nähert sich dem negativen Wertebereich und damit der Referenzkurvenform an.

Bereich 6, 2. Hälfte und Bereich 7: Der Wertebereich der qualitativen Wellenformbewertung ändert sich nur noch geringfügig, ebenso wie die Sauerstoffkonzentration. Die Kurvenform nähert sich weiter der Referenzkurve an.

Fisch 5 scheint auf schnelle Veränderungen des Sauerstoffgehalts, etwa am Anfang der Absenkung oder zu Beginn der Erhöhung, mit starker Kurvenformänderung zu reagieren (vgl. Abb. 4.27, S. 78 Bereich 2 und 5). Es bestätigt sich die bei Fisch 6 gefundene Tendenz (in Abb. 4.21, S. 72 und 4.23, S. 74), daß sich die Kurvenform bei fallender Sauerstoffkonzentration von der Referenzkurve ent-

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

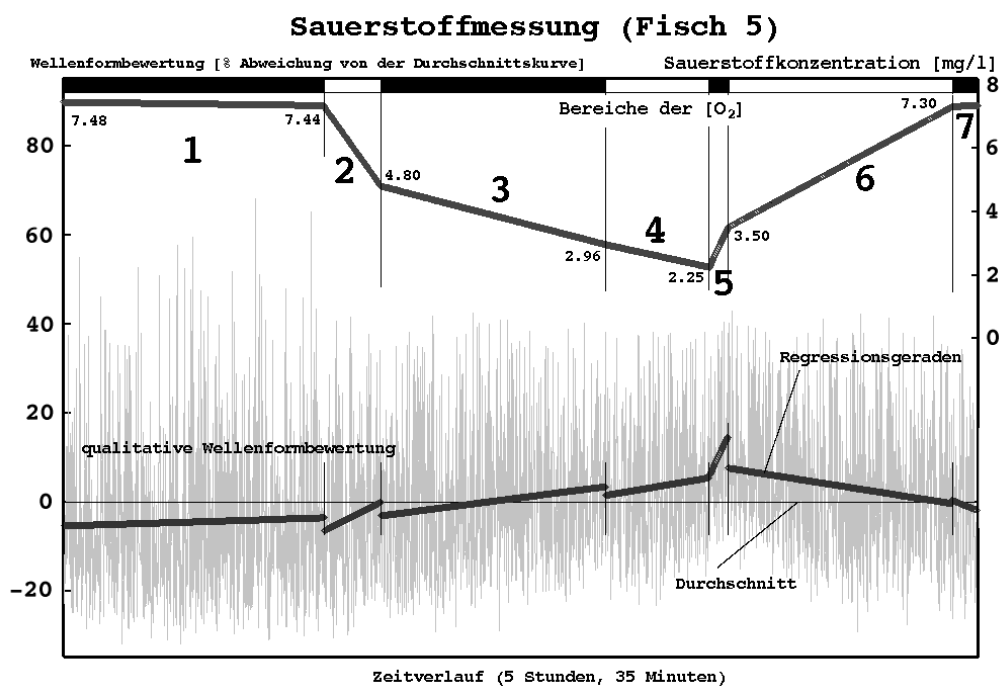


Abbildung 4.27: Die Reaktion von Fisch 5 auf Absenkung der Sauerstoffkonzentration, zweite Messung. Im Gegensatz zur ersten Messung (Abb. 4.25, S. 76) ist hier eine klare Tendenz der Kurvenformentwicklung erkennbar.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Durchschnittskurvenvariation der verschiedenen [O₂]-Bereiche (Fisch 5)

Sauerstoffkonzentrationsbereich

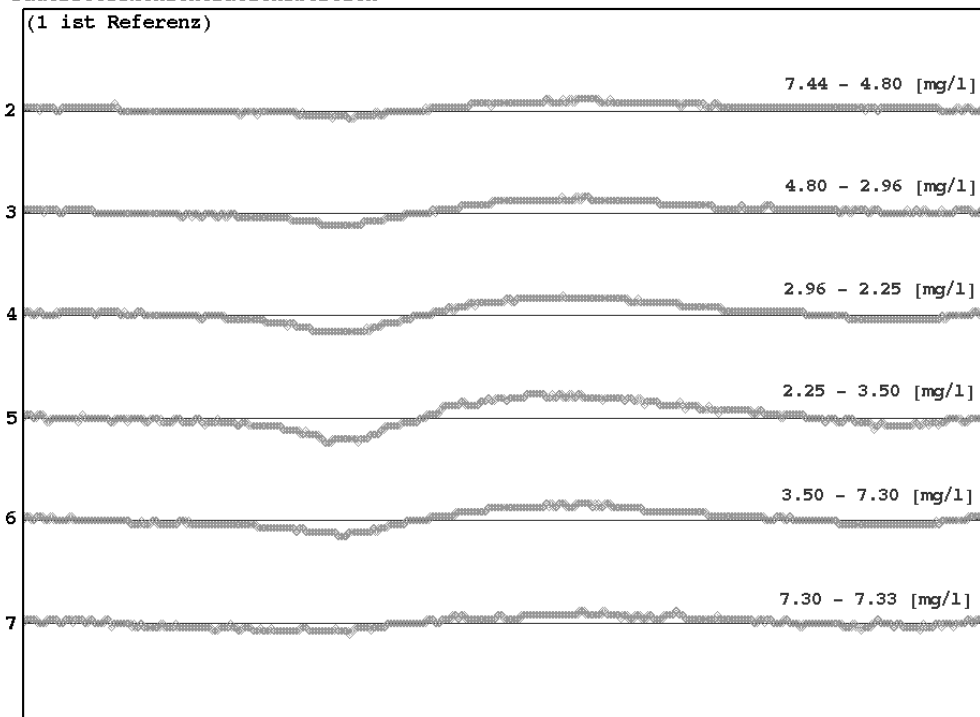


Abbildung 4.28: Bei der zweiten Messung verändert sich die Kurvenform eindeutig.

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Durchschnittskurvendifferenzvariation, Fisch 5

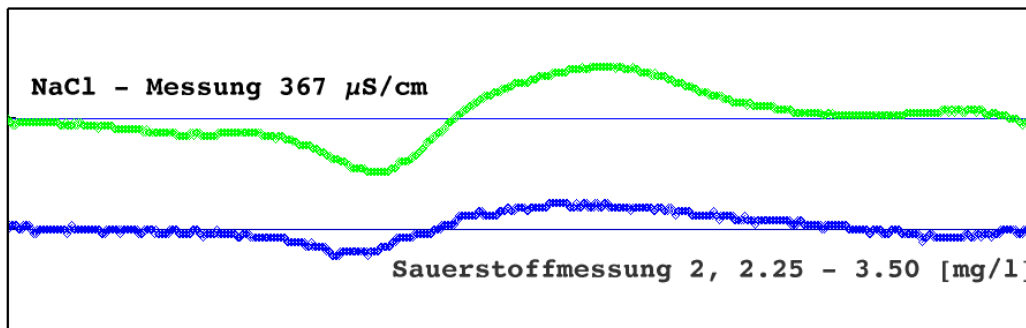


Abbildung 4.29: Abgesehen von der Intensität weist die Differenz der Kurvenform aus dem NaCl-Versuch und dem Sauerstoffversuch dieselbe Charakteristik auf.

fernt, bei steigender Sauerstoffkonzentration hingegen wieder der Referenzkurve annähert. Es hat sich auch gezeigt, daß die Tiere jeweils bei der 1. Messung kaum auf die $[O_2]$ -Veränderungen reagierten, während der 2. Messung jedoch deutlich. Dies könnte auf eine Sensibilisierung hinweisen. Bis zur ersten Messung haben die Tiere nie zuvor Sauerstoffmangel erfahren.

Bei beiden Fischen konnte, jeweils in der 2. Messung, die Reversibilität der Kurvenformveränderung beobachtet werden. So gleicht sich die Intensität der Durchschnittskurvendifferenzen zur Referenzkurve der Sauerstoffsättigungsbereiche während des Versuchs. Vgl. hierzu Fisch 6, Messung 1, Bereich 2 und 5, Bereich 3 und 4 in Abb. 4.22, S. 73 und Fisch 6, Messung 2, Bereich 2, 5 und 6, Bereich 3 und 4 in Abb. 4.24, S. 75 sowie Fisch 5, Messung 2, Bereich 2 und 7, Bereich 3 und 6, Bereich 4 und 5 in Abb. 4.28, S. 79.

4.6.6 Durchschnittskurvendifferenzvariation zwischen NaCl- und O_2 -Messung, Fisch 5

Im Diagramm 4.29, S. 80 ist die Durchschnittskurvendifferenz einer NaCl-Messung sowie die einer Sauerstoffmessung eingezeichnet. (Die Durchschnittskurvendifferenz ist der Deutlichkeit halber verdoppelt.) Vergleicht man die Kurvenformen ohne Berücksichtigung der Intensität, so fallen zwei kleine Unterschiede

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

Charakteristische Kurvenformdifferenzvariationen

Fisch

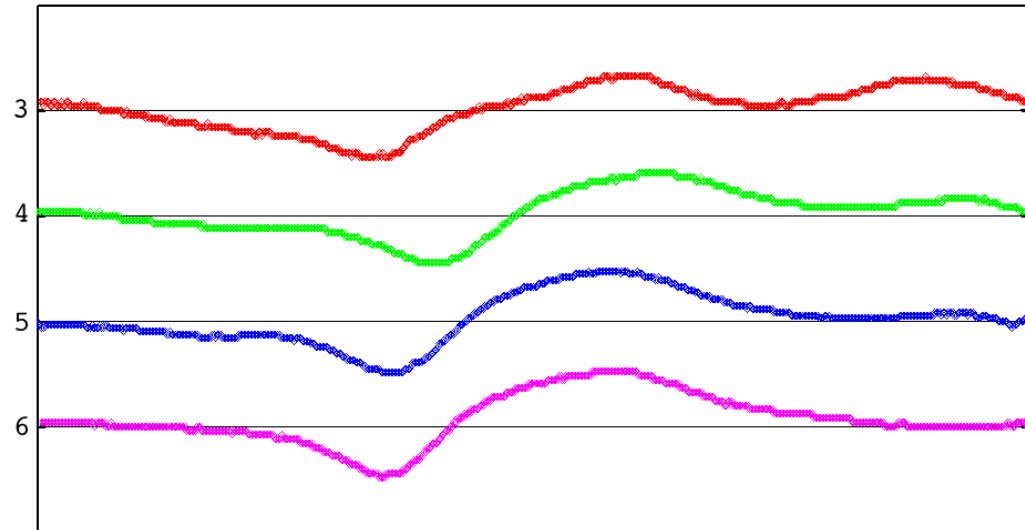


Abbildung 4.30: Die Kurvenformveränderung der Tiere untereinander ist nicht einheitlich.

auf: Auf der linken Seite des Diagramms fällt bei der NaCl-Messung die Kurve früher unter die Nulllinie als bei der O₂-Messung, auf der rechten Seite des Diagramms befindet sich die Kurve der NaCl-Messung oberhalb der Nulllinie, die Kurve der O₂-Messung unterhalb der Nulllinie. Berücksichtigt man jedoch die Tatsache, daß zwischen der NaCl-Messung (14. August 2001) und der O₂-Messung (19. November 2001) etwas mehr als 3 Monate liegen und Fisch 5 die größte Kurvenformvariation über den gesamten Zeitraum der Arbeit aufweist (vgl. Wellenformunterschiede Fisch 5, Abb. 4.6, S. 53), so verlieren derart kleine Unterschiede an Bedeutung.

4.6.7 Charakteristische Kurvenformdifferenzvariation der Tiere

In Abbildung 4.30, S. 81 ist die für jedes Tier gefundene, charakteristische Kurvenformdifferenz dargestellt. Sie kommt bei Versuchen, die Einfluß auf die Kurvenform des Signals ausüben, in unterschiedlicher Intensität vor. Eine unter den Tieren einheitliche Reaktion auf gleiche Reize scheint es nicht zu geben. Die Differenzen der Fische 4, 5 und 6 sind sich sehr ähnlich, obwohl sich die „Standard-

4.6 Einfluß verschiedener Parameter auf die Wellenform

kurvenform“ von Fisch 4 am meisten von den Standardkurvenformen der Fische 3, 5 und 6 absetzt. Weiter gleichen sich die Differenzen der Fisch 3 und 6 kaum, deren Standardkurvenformen sich wiederum sehr ähnlich sind (vgl. Abschnitt 4.2 auf Seite 49 „Die Wellenform der Entladungen — Variation des Signals der Tiere untereinander“ und Abb. 4.1, S. 49). Die Standardkurvenform scheint also keinen eindeutigen Einfluß auf eine mögliche Kurvenformdifferenzcharakteristik zu haben.

Anmerkung: Die Kurvenformdifferenzvariationen von Fisch 1 und 2 sind nicht aufgeführt, da mit diesen beiden Fischen nur zu Beginn der Arbeit Messungen durchgeführt wurden. Sie wurden für keine Messungen verwendet, bei denen die Bewertung der Wellenform wichtig war. Da beide Tiere deutlich kleiner waren als die anderen, hatten ihre Entladungen wesentlich kleinere Amplituden. Dieser Umstand bescherte während der Messungen einen, im Vergleich mit den anderen Fischen (3 – 6), großen Anteil an Störungen im gemessenen Signal (vgl. Abschnitt 2.5 „Vorbereitungen zum Versuch“, Seite 18).

Kapitel 5

Diskussion

Die unter Kapitel 4 aufgeführten Ergebnisse wurden bei den zu den Ergebnissen gehörenden Diagrammen diskutiert. Nachfolgend wird deshalb auf die Zusammenhänge zwischen den Versuchen eingegangen.

5.1 Erkenntnisse zur Frequenz der Entladungen

Während der Messungen wurden viele Daten erfaßt und festgehalten. So wurde bei allen Versuchen neben der Kurvenform auch die Frequenz automatisch gemessen und konnte so für die Auswertung herangezogen werden, auch wenn die aktuelle Messung, z. B. eine Sauerstoffmessung, primär nicht als „Frequenzversuch“ gedacht war.

Bei den „Frequenzversuchen“ wurde mit Temperaturschwankungen experimentiert. Ein Parameter also, der sich bei wechselwarmen Tieren auf den Stoffwechsel auswirkt. Bei Temperaturabsenkung verlangsamt sich der Stoffwechsel, bei Temperaturerhöhung wird er beschleunigt. In den Versuchen wurde dies bei Temperaturanstieg durch Erhöhung der Entladungsfrequenz, bei Temperatursenkung durch Verringerung der Entladungsfrequenz deutlich (vgl. „Variation der Frequenz“, Abschnitt 4.4, S. 55). Diese Tendenz konnte auch bei den Versuchen gefunden werden, bei denen sich die Temperatur nur geringfügig veränderte. Bei allen Messungen konnte kein anderer Parameter (Mückenlarven, Licht, [NaCl], [KNO₃] und [O₂]) gefunden werden, der Einfluß auf die Entladungsfrequenz der Tiere hatte. Dieses Ergebnis deckt sich mit einer Arbeit, in der mit MS-222 und

5.2 Erkenntnisse zur Wellenform der Entladungen

CO₂ experimentiert wurde (BULLOCK et al., 1972). Für MS-222 und CO₂ steht fest, daß sie beide den Stoffwechsel verlangsamen. Hätte ein Sauerstoffmangel Einfluß auf den Stoffwechsel, so müßte die Frequenz der Entladungen bei Absenken der Sauerstoffkonzentration ebenfalls absinken, bei steigendem Sauerstoffgehalt hätte die Entladungsfrequenz ebenfalls ansteigen müssen — dieser Zusammenhang konnte nicht beobachtet werden.

5.2 Erkenntnisse zur Wellenform der Entladungen

Bei den Frequenzversuchen wurde auch die Kurvenform der Entladungen gespeichert und ausgewertet. Dabei hat sich gezeigt, daß Temperaturschwankungen keinen Einfluß auf die Kurvenform des elektrischen Signals haben. Diese Beobachtung zeigt zum einen, daß sich unvermeidbare, minimale Temperaturschwankungen nicht auf die Kurvenform auswirken und weiter, daß auftretende Kurvenformdifferenzen wirklich durch die Anwendung eines Reizes zustande kommen.

Es konnte beobachtet werden, daß schwache Reize wie Futtergabe oder Ärgern des Tieres mit Licht keinen Einfluß auf die Kurvenform der Entladungen haben. Bei Messungen hingegen, während derer die Leitfähigkeit des Aquariengewässers variiert wurde, konnten durchweg Kurvenformveränderungen festgestellt werden. Die Kurvenformdifferenzen waren zu Versuchsbeginn (etwa 180 µS/cm Leitfähigkeit) groß, während der einzelnen Zugabebereiche nahm die Intensität der Veränderungen jedoch fortlaufend ab bis zu einer Leitfähigkeit von etwa 280 µS/cm, ab der keine Veränderungen mehr beobachtet werden konnten (vgl. alle Messungen, bei denen die Leitfähigkeit verändert wurde).

In weiteren Versuchen, bei denen die Leitfähigkeitsveränderung durch Zugabe von Kaliumnitrat erreicht worden war, wurde qualitativ die gleiche Kurvenformänderung festgestellt, wie sich auch durch Zugabe von NaCl hervorgerufen wurde (siehe „Vergleich zweier Versuche mit NaCl und KNO₃-Zugabe“, Abschnitt 4.6.4, S. 66). Es konnte jedoch beobachtet werden, daß die Intensität der Veränderung bei Zugabe von KNO₃ geringfügig größer war als die durch die Zugabe von NaCl verursachte Veränderung der Kurvenform.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluß des Sauerstoffgehalts auf die Kurvenform untersucht. Hierzu wurde die Messung in Sauerstoffkonzentra-

5.2 Erkenntnisse zur Wellenform der Entladungen

tionsbereiche eingeteilt, für die zur Ermittlung der Kurvenformdifferenz je eine Durchschnittskurve berechnet wurde. Die Versuche wurden mit drei Fischen durchgeführt, bei der jeweils ersten Messung konnten, falls überhaupt, nur sehr geringe Veränderungen der Kurvenform gegenüber der Referenzkurvenform festgestellt werden. Im Verlauf der jeweils zweiten Messung waren jedoch ausgeprägte Veränderungen gegenüber der Referenzkurve zu erkennen (vgl. „Versuche mit [O₂]-Variation als Reiz“, Abschnitt 4.6.5, S. 71). Die Beobachtung, daß die Tiere beim ersten Auftreten von Sauerstoffmangel nicht reagierten, läßt einigen Interpretationsspielraum. So wäre eine Sensibilisierung in Form von Rezeptoren, die getriggert durch den Sauerstoffmangel produziert oder aktiviert wurden, vorstellbar.

Bei den „Sauerstoffversuchen“ konnte erstmals beobachtet werden, daß die Veränderung der Kurvenform reversibel ist. In den „Leitfähigkeitsversuchen“ entfernte sich die Kurvenform stetig von der zu Beginn des jeweiligen Versuchs ermittelten Referenz(kurvenform). Eine Annäherung der Kurvenform an die Referenzkurve hingegen konnte nicht beobachtet werden, da für einen solchen Versuch ein Vollentsalzer nötig gewesen wäre, mit dem die zugegebenen Ionen hätten entfernt werden können.

Es wurde schon bei den „Frequenzversuchen“ festgestellt, daß die Kurvenform der Signale konstant bleiben kann, hatte sie sich doch in keinem der Versuche mit Temperaturschwankungen verändert. Die reversible Kurvenformänderung der „Sauerstoffversuche“ übertrifft diese Aussage jedoch gewaltig. Es konnten Veränderungen beobachtet werden, deren Auslöser systemneutral waren, d. h. der Sauerstoffgehalt hatte keinen Einfluß auf die Amplitude des Signals (die Änderung der Leitfähigkeit hingegen schon). Damit existierte bei diesem Versuchsansatz eine mögliche Fehlerquelle weniger. Desweiteren konnten bei den „Sauerstoffmessungen“ die Ausgangsbedingungen gegen Ende des Versuchs durch Luftzufuhr wieder hergestellt werden. Die Beobachtung der reversiblen Kurvenformänderung der Sauerstoffmessungen festigt zudem bisher gefundene Ergebnisse. Durch die Umkehrung der Veränderung konnte gezeigt werden, daß sich die bei den Leitfähigkeitsversuchen gemessenen Kurvenformveränderungen nicht einfach zufällig oder etwa tagesperiodisch bedingt ergeben haben sondern bewußt oder unbewußt durch den Fisch bewirkt werden. Bei allen Versuchen, bei denen

5.2 Erkenntnisse zur Wellenform der Entladungen

Kurvenformveränderungen gegenüber der jeweiligen Referenzkurve aufgetreten sind, konnte die kurze Reaktionszeit (zwischen 20 und 30 Minuten) bis zum Auftreten der Veränderung beobachtet werden. Bei den Sauerstoffversuchen konnte außerdem beobachtet werden, wie die Reaktion wieder aufgehoben wurde. Allerdings geschah die Aufhebung im Verlauf der Messung nie vollständig, bei den Leitfähigkeitsmessungen erst wieder im Hälterungsbecken.

Vergleicht man die „Standardkurvenform“ der elektrischen Entladungen der einzelnen Tiere untereinander, so fällt auf, daß es Unterschiede gibt (vgl. „Die Wellenform der Entladungen — Variation des Signals der Tiere untereinander“, Abschnitt 4.2, S. 49). Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, die Kurvenformdifferenzen verschiedener Messungen einzelner Tiere untereinander zu vergleichen. Vergleicht man die Kurvenformdifferenzen der mit einem Tier durchgeführten Messungen, so kann man erkennen, daß sich die in verschiedenen Versuchen gefundenen Kurvenformveränderungen hauptsächlich in ihrer Intensität unterscheiden (vgl. „Durchschnittskurvendifferenzvariation zwischen NaCl- und O₂-Messung, Fisch 5“ in Abschnitt 4.6.6, S. 80). Es scheint für jedes Tier eine charakteristische Kurvenformänderung zu geben (vgl. „charakteristische Kurvenformdifferenzvariation der Tiere“, Abschnitt 4.6.7, S. 81), die sich jedoch, je nach Art des Versuchs, hinsichtlich der Intensität unterscheidet. Bei manchen Tieren fällt die Reaktion auf Leitfähigkeitsänderung stärker aus als die Reaktion auf eine Änderung des Sauerstoffgehalts, bei einigen Tieren ist das Gegenteil der Fall. Hierzu kann keine klare Aussage getroffen werden, das verbietet die zu geringe Anzahl an Versuchen.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Die mit Hilfe spezialisierter, elektrischer Organe kommunizierenden Fische der Gattung *Apteronotus albifrons* waren Untersuchungsobjekt vorliegender Arbeit. Es wurde getestet, ob die Tiere die Entladungscharakteristik ihrer elektrischen Signale hinsichtlich der Frequenz oder Wellenform modulieren, wenn physikalische Wassereigenschaften verändert werden. Es zeigte sich, daß Veränderungen, die sich auf den Stoffwechsel auswirken auch auf die Entladungsfrequenz Einfluß nehmen. Parameter, die den Stoffwechsel bremsen, führen zu einer Senkung der Entladungsfrequenz, hingegen verursachen Parameter, die den Stoffwechsel beschleunigen, zu einer Erhöhung der Entladungsfrequenz. Stoffwechselbeeinflussende Parameter haben keinen Einfluß auf die Wellenform der Entladungen.

Kurvenformmodulationen konnten bei Änderung der Leitfähigkeit und beim Absenken des Sauerstoffgehalts beobachtet werden. Bei den Versuchen zur Änderung der Leitfähigkeit konnte gezeigt werden, daß die Intensität der Kurvenformänderung bei Zugabe von KNO_3 größer ist als bei der Zugabe von NaCl . Die Intensität der Kurvenformmodulation nimmt bei steigender Leitfähigkeit bis $280 \mu\text{S}/\text{cm}$ ab, darüber findet keine Modulation mehr statt. Auch beim Absenken des Sauerstoffgehalts im Versuchsbecken konnte eine Kurvenformveränderung beobachtet werden, bei Sauerstoffzufuhr näherte sich die Kurvenform wieder der Ausgangskurvenform an.

Es wurde festgestellt, daß die „Ursprungskurvenform“ der Tiere untereinander verschieden ist. Bei den Versuchen, die zu einer Veränderung der Kurvenform geführt hatten, konnte außerdem eine für jeden Fisch charakteristische Kurven-

formveränderung gefunden werden, die nicht aus der Ursprungskurvenform der Tiere ableitbar ist.

Es konnten keine Parameter gefunden werden, die sowohl auf die Kurvenform als auch auf die Frequenz der Entladungen Einfluß hatten.

Literaturverzeichnis

- BASTIAN, J. (1990): Electroreception. Comparative Perception. Complex Signals (ed. W. C. STEBBINS and M. H. BERKELEY). Vol. II, New York: John Wiley and Sons, 35-89.
- BELL, C. C. (1990): Mormyromast electroreceptor organs and their afferent fibres in Mormyrid fish III, Physiological differences between two morphological types of fibres. *J. Neurophysiol.* **63**, 319-332.
- BULLOCK, T. H. (1982): Electroreception. *A. Rev. Neurosci.* **5**, 121-170.
- BULLOCK, T. H. & HAMSTRA, R. H. & SCHEICH, H. (1972): The jamming avoidance response of high frequency electric fish part 1 general features. *Journal of Comparative Physiology A* **77**, 1-22.
- HARDER, W. (1972): Nachweis aktiver (elektrischer) Ortung bei Mormyridae (*Teleostei, Pisces*). *Z. Tierpsychol.* **30**, 94-102.
- HEILIGENBERG, W. (1977): Principles of electrolocation and jamming avoidance in electric fish. *Studies in Brain Function*. Vol. I (ed. BRAITENBERG), Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 575-578.
- KRAMER, B. (1988): Schwachelektrische Fische: Ausweichreaktionen auf Störsender. *Praxis der Naturwissenschaften* **7/37**, 1-10.
- KRAMER, B. & OTTO, B. (1991): Waveform discrimination in the electric fish *Eigenmannia*: Sensitivity for the Phase Differences Between the Spectral Components of A Stimulus Wave. *J. exp. Biol.* **159**, 1-22.

LITERATURVERZEICHNIS

- KRAMER, B. & TEUBL H. (1993): Spektral Phase Sensitivity in the Communication of a Wave-Type Electric Fish. *Naturwissenschaften* **80**, 575-578.
- LEWIS, J. W. & KAY A. N. & HANNA, N. S. (1992A): Responses of Electric fish *Gnathonemus tamandua* (family Mormyridae) to changes in pH. *Environmental Technology* **13**, 701-705.
- LEWIS, J. W. & KAY A. N. & HANNA, N. S. (1992B): Responses of Electric fish (family Mormyridae) to chemical changes in water quality: I. Cyanide. *Environmental Technology* **13**, 1169-1174.
- VON DER EMDE, G. (1990): Discrimination of objects through electrolocation in the weakly electric fish, *Gnathonemus petersii*. *J. compm. Physiol. A* **167**, 413-421.
- VON DER EMDE, G. & RINGER, T. (1992): Electrolocation of capacitive objects through electrolocation of pulse-type weakly electric fish. I. Discrimination performance. *Ethology* **91**, 326-338.
- VISCHER, H. A. & LANNOO, M. J. & HEILIGENBERG, W. (1989): Development of the Electrosensory Nervous System in *Eigenmannia* (Gymnotiformes): I. The Peripheral Nervous System. *The Journal of comparative Neurology* **290**, 16-40.
- ZÖFEL, P. (1988): Regressionsrechnung. In: *Statistik in der Praxis*, 2. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 236-237.
- ZUPANC, G. (1988): Temperatur und Verhalten: Physiologische Versuche an schwachelektrischen Fischen. In: *Praktische Verhaltensbiologie*, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 166-172.

Internetadressen (URLs)

Offline-Versionen befinden sich auf der CD zur gedruckten Ausgabe

- NELSON, M. E. (2001A), Nelson Lab Home Page,
http://soma.npa.uiuc.edu/labs/nelson/fish_geography.jpg, 26.12.2001.
Abbildung 1.1 auf Seite 8. Übersicht über das Verbreitungsgebiet elektrischer Fische, „fish_geography.jpg“
- NELSON, M. E. (2001B), Nelson Lab Home Page,
http://soma.npa.uiuc.edu/labs/nelson/albifrons_lowres_noura.jpg, 26.12.2001.
Abbildung 2.1 auf Seite 13. Foto von *A. albifrons*,
„albifrons_lowres_noures.jpg“
- HUNTER, R. (1996A), Electric Fish QuickTime Movies,
<http://www.bbb.caltech.edu/bowerlab/ElectricFish/albif.JPG>, 26.12.2001.
Abbildung 1.2 auf Seite 10. Wellenform und elektrisches Feld von
A. albifrons, „albif.JPG“
- HUNTER, R. (1996B), Electric Fish QuickTime Movies,
<http://www.bbb.caltech.edu/bowerlab/ElectricFish/Aalbif.MOV>, 26.12.2001.
Computeranimation des elektrischen Feldes von *A. albifrons*, „Aalbif.MOV“
- BUTT, J. (2000), Physikalische Chemie II,
<http://www.uni-siegen.de/dept/fb08/abteil/pcii/scripts/mz/pc2/pc20.pdf>,
26.12.2001.
Abschnitt „Elektrochemie — Grenzleitfähigkeit der Ionen“ auf Seite 19