



Universität Bielefeld

Technische  
Fakultät

Diplomarbeit

# Sonifikationsbasierte Korrelationsanalyse gekoppelter FitzHugh-Nagumo-Systeme

Angelika Dierker

18. Dezember 2006

Betreuer: Prof. Dr. Helge Ritter  
Dr. Thomas Hermann  
Dr. Elena Carbone

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig bearbeitet, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und Zitate kenntlich gemacht habe.

Bielefeld, den 18. Dezember 2006

Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Neben Helge Ritter, in dessen Neuroinformatik-Arbeitsgruppe ich diese Arbeit schreiben durfte möchte ich mich besonders bei meinen beiden Haupt-Ansprechpartnern für diese Arbeit bedanken: Thomas Hermann und Elena Carbone. Sie haben mir geholfen, ein interessantes Thema zu finden und haben in jeder Phase der Diplomarbeit Fragen beantwortet und hatten Zeit für mich. Gerold Baier hat mich mit vielen Literaturtipps und aufmunternden Worten unterstützt.

Bei meiner Familie möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir dieses Studium ermöglicht haben und mich (wenn es nicht lief) ermuntert haben, bei Holger Weiss für all die fachliche Unterstützung, das Korrekturlesen und dafür, dass er da war, wenn ich ihn brauchte.

Bei meinen Freunden möchte ich mich dafür bedanken, dass sie den Kontakt zu mir aufrecht erhalten haben und mir nicht übel nahmen, dass ich mich in den letzten Wochen viel zu selten gemeldet habe. Jan Stallkamp und Ulf Schiller möchte ich außerdem für die kompetente Beantwortung von Fragen (auch zu seltsamen Uhrzeiten) danken.

Schließlich danke ich Till Bovermann, Oliver Lieske und den Sekretärinnen Elke, Anke und Petra für schnelle Problemlösungen und Hilfe.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Simulation von neuronalen Spikes und Neuronen . . . . .	3
2.1.1. Simulation von neuronalen Spikes mit Hilfe von Differential- gleichungen . . . . .	4
2.2. Kreuz-Korrelationen . . . . .	5
2.2.1. Korrelationen im Gehirn . . . . .	5
2.2.2. Korrelationen in FHN-Systemen . . . . .	6
2.2.2.1. Diffusive Kopplung der FHN-Systeme . . . . .	6
2.2.2.2. Aktivierend lineare Kopplung der FHN-Systeme . . . . .	7
2.2.3. Korrelationen in künstlichen Neuronalen Netzen . . . . .	7
2.3. Erkennung von Korrelationen in FHN-Systemen . . . . .	8
2.3.1. Statistische Erkennung von Korrelation in FHN-Systemen . . . . .	8
2.3.2. Explorativer Zugang über Displays . . . . .	8
2.3.2.1. Auditive Displays und Sonifikation . . . . .	9
2.3.2.2. Visuelle Displays . . . . .	11
2.4. Psychophysische Versuche . . . . .	12
2.4.1. Experiment . . . . .	12
2.4.2. Abhängige und unabhängige Variablen . . . . .	12
2.4.3. Störvariablen . . . . .	12
2.4.4. Hypothesen und Operationalisierung . . . . .	13
2.4.5. Stichproben und Ablauf . . . . .	13
2.4.6. Verfahren zur Hypothesenverifikation . . . . .	14
<b>3. Entwicklung der Fragestellung und Versuchsmethodik</b>	<b>15</b>
3.1. Entwicklung der Fragestellung . . . . .	15
3.1.1. Diskutierte Fragestellungen . . . . .	15
3.1.2. Operationalisierung . . . . .	19
3.1.3. Hypothesen . . . . .	21

3.1.3.1.	Display-Art . . . . .	21
3.1.3.2.	Lerneffekt . . . . .	21
3.1.3.3.	Interaktion (Korrelationsstärke) . . . . .	22
3.2.	Versuchsmethodik . . . . .	22
3.2.1.	Apparatur und Stimuli . . . . .	23
3.2.1.1.	Evaluierungsobjekte . . . . .	23
3.2.1.2.	Visuelles Display . . . . .	23
3.2.1.3.	Auditives Display . . . . .	24
3.2.1.4.	Protokoll . . . . .	24
3.2.2.	Versuchsplan/Design . . . . .	25
3.2.3.	Ablauf des Experimentes . . . . .	28
<b>4.</b>	<b>Datenerstellung</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1.	DGL-Lösungsalgorithmen/-methoden . . . . .	33
4.1.1.	Runge-Kutta . . . . .	33
4.1.2.	Lsode . . . . .	35
4.1.3.	Equilibrierung . . . . .	37
4.2.	Finden der Peaks . . . . .	37
4.3.	Berechnung der Korrelationsstärke . . . . .	38
4.4.	Anpassen der Peakdichte . . . . .	39
<b>5.</b>	<b>Software zur Versuchssteuerung</b> . . . . .	<b>41</b>
5.1.	Hauptklasse und Steuerung . . . . .	41
5.2.	Die Intro-Module . . . . .	43
5.2.1.	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	44
5.3.	Die Experiment-Module . . . . .	44
5.3.1.	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	45
5.3.2.	Die Abfolge der Durchgänge . . . . .	47
5.4.	Displays . . . . .	48
5.4.1.	Steuerung der Durchgänge für eine der Display-Bedingungen . . . . .	48
5.4.2.	Modul zur Steuerung der Visualisierung . . . . .	48
5.4.3.	Modul zur Steuerung der Sonifikation . . . . .	49
5.5.	Protokoll des Versuchs . . . . .	50
5.6.	Kommunikation mit Octave über die Schnittstellenklasse OctaveSC . . . . .	51
5.7.	Nutzen der Software für weitere Experimente . . . . .	51
5.7.1.	Generalisierbarkeit . . . . .	51
5.7.2.	Anwendungsfälle . . . . .	52

<b>6. Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>55</b>
6.1. Hypothese 1: Display-Art . . . . .	55
6.1.1. Distanzfehler . . . . .	55
6.1.2. Boolescher Fehler . . . . .	56
6.1.3. Diskussion . . . . .	56
6.1.3.1. Post-Hoc-Hypothese . . . . .	57
6.2. Hypothese 2: Lerneffekt . . . . .	58
6.2.1. Distanzfehler . . . . .	58
6.2.2. Boolescher Fehler . . . . .	59
6.2.3. Diskussion . . . . .	60
6.3. Hypothese 3: Interaktion (Kopplungsstärke) . . . . .	60
6.3.1. Distanzfehler . . . . .	60
6.3.2. Boolescher Fehler . . . . .	61
6.3.3. Diskussion . . . . .	63
6.4. Explorative Untersuchung . . . . .	64
6.4.1. Abweichungs-Richtung . . . . .	64
6.4.2. Betrachtung der einzelnen Wertepaare . . . . .	65
<b>7. Fazit</b>	<b>69</b>
<b>A. Installation und Benutzung der Software</b>	<b>71</b>
A.1. Benutzungshinweise . . . . .	71



# 1. Einleitung

Informationsübermittlung funktioniert in unserem Gehirn unter anderem mit Hilfe von Aktionspotentialen (Spikes). Allerdings ist nicht klar *wie* die Informationen in den Spikes kodiert sind. Eine Möglichkeit ist, dass die Information in der mittleren Spikeanzahl pro Zeiteinheit verschlüsselt ist oder in den Abständen zwischen den Spikes. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Information im Unterschied des Spike-Verhaltens mehrerer Neuronen steckt. Zum Beispiel könnten Änderungen der Synchronisation von Neuronen einen Einfluss auf die Informationsverarbeitung haben (z. B. [Sin99] und [GKES89]). Das hieße, dass es kurzzeitige Korrelationsänderungen gibt, die allerdings mit den herkömmlichen Methoden (wie zum Beispiel der statistischen Korrelationserkennung) nicht festgestellt werden können, weil man dafür eine große Anzahl an Spikes benötigt ([BHLM05]). Über eine große Anzahl an Spikes würden sich aber solche kurzzeitigen Korrelationsänderungen herausmitteln. Gesucht wird also eine Methode, mit der man auch kurzzeitige Korrelationsänderungen zwischen Neuronen feststellen kann um dann die Rolle der Korrelationen für die Informationsverarbeitung im Gehirn bewerten zu können.

Sonifikation ist eine neuartige Technik, mit der das menschliche Gehör für Datenanalyse nutzbar gemacht wird. Die Daten können dabei mit verschiedenen Techniken auf dem auditiven Display dargestellt werden ([Her02]). Die Autoren von [BHLM05] schlugen vor, Korrelationen mit Hilfe von auditiven Displays zu analysieren. Hier setzt diese Diplomarbeit an und untersucht empirisch, inwiefern sich das Gehör zur Beurteilung von korrelierten Zeitserien eignet. Neben dem auditiven Display wird zusätzlich das visuelle Display untersucht, da Sehen und Hören die wichtigsten Kommunikationskanäle des Menschen sind.

Die Aufgabenstellung für diese Arbeit bestand aus vier Teilen:

- (a) Simulation kreuzkorrelierter Nervenzellen. Diese sollte in GNU Octave<sup>1</sup> implementiert werden und an Supercollider<sup>2</sup> angebunden werden.
- (b) Darstellung der simulierten Daten mit Hilfe von Sonifikations- und Visualisierungstechniken auf dem auditiven bzw. visuellen Display.

---

<sup>1</sup>Programmiersprache, besonders für numerische Berechnungen

<sup>2</sup>Programmiersprache zur Echtzeit-Audiosynthese

- (c) Entwicklung einer Software zur Steuerung von Versuchen. In diese sollten die Sonifikationen und Visualisierungen eingebunden werden. Dabei sollte besonders darauf geachtet werden, dass die Programme zur Versuchssteuerung auch für weitere Versuche verwendet werden können.
- (d) Durchführung eines Experimentes. In dem Experiment sollte nachgewiesen werden, dass Korrelationen zwischen den simulierten Nervenzellen mit Hilfe des auditiven und visuellen Displays erkannt werden können. Es sollte ein Vergleich der beiden Displays anhand der Fehleranzahl hergestellt werden und Informationen über die subjektive Korrelationsstärke gesammelt werden.

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. In Kapitel 2 wird zunächst auf die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen eingegangen. Es werden Verfahren zur Simulation von Korrelation zwischen Neuronen beschrieben und unterschiedliche Möglichkeiten zur Erkennung von Korrelation diskutiert. Außerdem wird eine Einführung in die Grundlagen von psychophysischen Experimenten gegeben. Eine detaillierte Entwicklung der Fragestellung für das Experiment (Punkt d in der Aufgabenstellung) erfolgt in Kapitel 3. Dort wird außerdem die Versuchsmethodik für den durchgeführten Versuch erläutert. Die Art und Weise der Erstellung der den Stimuli zugrunde liegenden Daten (Aufgabe a) wird in Kapitel 4 beschrieben. Die Implementation der gekoppelten FHN-Systeme wird erläutert und die Maßnahmen, die zu den für die Versuche verwendeten Peaksequenzen führen. In Kapitel 5 wird die für diese Arbeit entwickelte Versuchssteuerungs-Software (Aufgabe c) beschrieben, die auch die Protokollfunktion der Versuchsergebnisse übernimmt. Außerdem wird in diesem Kapitel auf die Darstellung der Daten auf den Displays (Aufgabe b) und auf weitere Einsatzmöglichkeiten der Versuchssoftware eingegangen. Die Ergebnisse des durchgeführten Experimentes (Aufgabe d) werden in Kapitel 6 dargestellt und interpretiert. Dort erfolgt außerdem eine detaillierte Diskussion dieser Ergebnisse. Abschließend werden in Kapitel 7 die Ergebnisse kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche weitere Versuche gegeben, die mit der erstellten Software durchgeführt werden können.

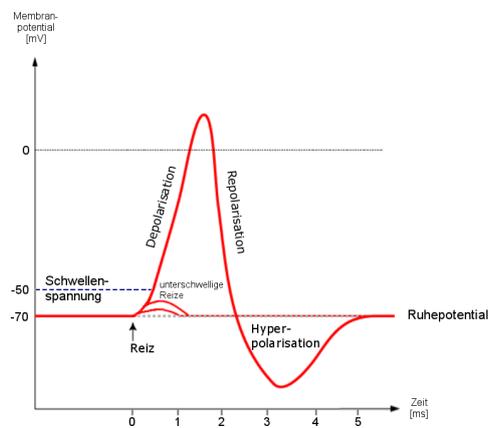
## 2. Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt zunächst neurobiologische Grundlagen zum Thema Neuronen und Kreuzkorrelationen. Dabei wird in Abschnitt 2.1 mit dem FitzHugh-Nagumo-Modell eine Möglichkeit besprochen, Neuronen und neuronale Spikes zu simulieren. In Abschnitt 2.2 werden erweiterte FitzHugh-Nagumo-Systeme erklärt, mit deren Hilfe Korrelationen in Neuronen simuliert werden können. Abschnitt 2.3 befasst sich mit Erkennung von Korrelationen mit Hilfe von statistischen und explorativen Methoden. Zum Abschluss werden in Abschnitt 2.4 Grundlagen zur Durchführung psychophysischer Experimente beschrieben, sofern sie als Basis für die folgenden Kapitel notwendig sind.

### 2.1. Simulation von neuronalen Spikes und Neuronen

Unser Gehirn besteht aus mehr als 100 Milliarden einzelner *Nervenzellen*, die hauptsächlich über *Aktionspotentiale (Spikes)* kommunizieren. Spikes sind sogenannte Alles-oder-Nichts-Impulse, die in kürzester Zeit die Ladungsverteilungen (Potentiale) der umliegenden Membranen höchst stereotyp ändern. Durch den speziellen Aufbau von Nervenzellen werden die Spikes in hoher Geschwindigkeit von bis zu 120 Metern pro Sekunde weitergeleitet ([Sch05]). In Abbildung 2.1 ist ein Spike schematisch dargestellt. Die Potentialänderungen, die ein solches Aktionspotential verursacht, sind in Extra-Zellulär-Ableitungen mit Hilfe von Elektroden messbar ([KuTMJ96]). Je weiter die Elektrode vom Neuron entfernt ist, desto mehr misst sie die durchschnittliche Aktivität aller benachbarten Neuronenpotentiale.

Die Summe aus den Potentialänderungen einer Population von Nervenzellen nennt man *Summenpotential*. Diese können mit Hilfe von Makroelektroden an bestimmten Stellen der Haut gemessen werden. Eine spezielle Methode, bei der eine bestimmte Anzahl Elektroden an standardisierten Stellen der Kopfhaut angebracht werden und die dort messbaren Potentialunterschiede aufgezeichnet werden, nennt man *Elektroenzephalogramm (EEG)*. Diese Methode wird unter anderem zur Diagnostik von Epilepsie eingesetzt und hat den Vorteil eines hohen zeitlichen Auflösungsvermögens ([KuTMJ96]) von bis zu einer zwanzigtausendstel Sekunde. Durch die Summenpotentiale ist das räumliche Auflösungsvermögen allerdings gering.



**Abbildung 2.1.:** Schematische Darstellung eines Aktionspotentials (Quelle: [Wik06]).

So misst  $1\text{mm}^2$  Elektrode das Summenpotential von ca. einer Million Neuronen ([Sch05]).

### 2.1.1. Simulation von neuronalen Spikes mit Hilfe von Differentialgleichungen

Prozesse wie das Spiken von Neuronen können über Differentialgleichungen beschrieben und modelliert werden. Schon 1952 haben A.L. Hodgkin und A.F. Huxley ein Modell zur Simulation von Aktionspotentialen entwickelt, in dem die spannungsabhängigen Membrankanäle durch variable Widerstände und die Membrankapazität durch einen Kondensator repräsentiert wird (Hodgkin-Huxley-Modell siehe [KuTMJ96]).

Da dieses Modell jedoch sehr aufwändig ist, wurde von R. FitzHugh und J. Nagumo 1961/62 ein vereinfachtes Modell zur Simulation von Aktionspotentialen entwickelt ([TS86], S.86). Diese Erweiterung des Van-der-Pol-Oszillators wird *FitzHugh-Nagumo-Modell* genannt. Die FHN-Dynamik lautet:

$$\dot{x} = \alpha(y + q) - F(x) \quad (2.1a)$$

$$\dot{y} = -(x - a + by)/\alpha \quad (2.1b)$$

Dabei sind  $a$  und  $b$  konstante Parameter und  $q$  die Stimulus-Intensität.  $F$  ist typischerweise ein Polynom dritten Grades und  $(x, y)$  der Zustandsvektor.

## 2.2. Kreuz-Korrelationen

*Korrelation*, angewendet auf zwei diskrete oder kontinuierliche Funktionen ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Funktionen. Korrelation wird mathematisch durch das Korrelationsintegral beschrieben:

$$\rho(\tau) = K \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot m(t + \tau) dt$$

$x(t)$  ist die zu analysierende Funktion und  $m(t)$  die Musterfunktion. Für *Kreuzkorrelation* wird die Musterfunktion mit  $m(t) = y(t)$  beschrieben. Man betrachtet die Ähnlichkeit von  $x(t)$  mit dem zeitverschobenen Signal  $y(t+\tau)$ . Dadurch wird die Korrelation auch dann erkannt, wenn die Funktionen gegeneinander zeitverschoben sind. Es gibt auch andere Arten der Korrelation, wie zum Beispiel Autokorrelation mit  $m(t) = x(t)$ . In dieser Arbeit werden die Begriffe *Korrelation* und *Kopplung* synonym zu *Kreuzkorrelation* benutzt.

### 2.2.1. Korrelationen im Gehirn

Die Mechanismen, die zu epileptischen Anfällen führen sind immer noch nicht vollständig verstanden. Mittlerweile ist aber bekannt, dass solche Anfälle mit einer anormalen Synchronisation von Neuronen einhergehen ([MKA<sup>+</sup>03]). Diese Synchronisationen können mit Hilfe von EEGs gemessen werden. Je nach Erscheinungsform der Epilepsie treten die Synchronisationen dabei in mehr oder weniger großen Gehirnbereichen auf. Die Stärke der Ausdehnung kann dazu führen, dass die erkrankte Person auch das Bewusstsein verliert ([SB01]). Minuten bis Stunden vor einem Anfall tritt eine charakteristische Desynchronisation auf ([MKA<sup>+</sup>03]). Diese wurde bei Fokaler Epilepsie festgestellt, bei der nur bestimmte Gehirnbereiche betroffen sind. Die Desynchronisationen beschränken sich allerdings nicht nur auf den Epilepsie-Herd sondern auch auf weiter entfernte Hirnregionen.

Nicht nur im erkrankten Gehirn treten Synchronisationen von Neuronen und Neuronengruppen auf. Beispielsweise konnten EEG-Synchronisationen beim NREM-Schlaf und bei normalen kognitiven Aktivitäten nachgewiesen werden ([Sin99]).

### 2.2.2. Korrelationen in FHN-Systemen

Für diese Arbeit wird ein System aus zwei miteinander gekoppelten *FitzHugh-Nagumo*-Differentialgleichungen verwendet (im Folgenden als *FHN-System* bezeichnet). Dabei handelt es sich um Differentialgleichungen erster Ordnung, die eine Erweiterung der in Gleichung 2.1 beschriebenen FHN-Modelle darstellen. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, diese FHN-Systeme zu koppeln: diffusive und aktivierend lineare Kopplung.

#### 2.2.2.1. Diffusive Kopplung der FHN-Systeme

In [BHLM05] wird vorgeschlagen, das FHN-System diffusiv zu koppeln. Die Gleichungen lauten:

$$\dot{x}_1 = x_1(a - x_1)(x_1 - 1) - y_1 + I + d \cdot z_1 + \underbrace{D \cdot (x_2 - x_1)}_{\text{Kopplungsterm}} \quad (2.2a)$$

$$\dot{y}_1 = b(x_1 - y_1)$$

$$\dot{z}_1 = \frac{\epsilon - cx_1z_1}{(0.1 + z_1)}$$

$$\dot{x}_2 = x_2(a - x_2)(x_2 - 1) - y_2 + I + d \cdot z_2 + \underbrace{D \cdot (x_1 - x_2)}_{\text{Kopplungsterm}} \quad (2.2b)$$

$$\dot{y}_2 = b(x_2 - y_2)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{\epsilon - cx_2z_2}{(0.1 + z_2)}$$

Die diffusive Kopplung entsteht durch den letzten Summanden der Gleichungen 2.2a und 2.2b. Durch die Kopplungskonstante  $D$  wird die Stärke der Kopplung eingestellt. Die anderen Parameter sind konstant. Geeignete Werte für sie sind:  $a = 0.1$ ,  $b = 0.01$ ,  $c = 1.2$ ,  $d = 0.16$ ,  $\epsilon = 0.0001$ ,  $I = 0.064$ . Die Gleichungen und Parameter wurden aus [BHLM05] übernommen.

Diffusive Kopplung der FHN-Systeme hat den Nachteil, dass die Spikedichte von der Kopplungsstärke abhängt. Für den Versuch werden aber Daten mit gleicher Spikedichte benötigt. Dieses Problem wird genauer in Kapitel 4.4 besprochen.

Die Ergebnisse  $x_1[n]$ ,  $y_1[n]$  aus den beiden Differentialgleichungen werden im Folgenden als *Zeitreihen* bezeichnet, da es sich um eine zeitabhängige Folge diskreter

Datenpunkte handelt. Von den Zeitserien werden für den für diese Arbeit durchgeführten Versuch nur die Zeitpunkte der Spike-Maxima verwendet. Das Verfahren zur Berechnung dieser *Peaks* wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

### 2.2.2.2. Aktivierend lineare Kopplung der FHN-Systeme

Eine andere Möglichkeit ist, die FHN-Differentialgleichungen nicht diffusiv sondern aktivierend linear zu koppeln. Dadurch verändert sich die Gleichung im letzten Summanden (durch Klammer hervorgehoben) und lautet dann wie folgt (Vergleiche mit Gleichung 2.2):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1(a - x_1)(x_1 - 1) - y_1 + I + d \cdot z_1 + \underbrace{D \cdot x_2}_{\text{Kopplungsterm}} \\ \dot{y}_1 &= b(x_1 - y_1) \\ \dot{z}_1 &= \frac{\epsilon - cx_1z_1}{(0.1 + z_1)} \\ \dot{x}_2 &= x_2(a - x_2)(x_2 - 1) - y_2 + I + d \cdot z_2 + \underbrace{D \cdot x_1}_{\text{Kopplungsterm}} \\ \dot{y}_2 &= b(x_2 - y_2) \\ \dot{z}_2 &= \frac{\epsilon - cx_2z_2}{(0.1 + z_2)} \end{aligned}$$

Die aktivierende Kopplung hat den Vorteil, dass die Spikedichte nicht von der Kopplungsstärke abhängt und die Dichte somit nicht angepasst werden müsste. Allerdings hat der diffusive Ansatz größere Nähe zum Ansatz aus [BHLM05] und experimentell ein günstigeres Setting, deshalb wird für diese Arbeit diffusive Kopplung verwendet.

### 2.2.3. Korrelationen in künstlichen Neuronalen Netzen

Während in [BHLM05] zunächst die Korrelation zwischen einzelnen Neuronen modellieren, sind gekoppelte Neuronensysteme als *rekurrente neuronale Netze* für Anwendungen des Lernens von großem Interesse. Die Korrelationen solcher Neuronensysteme sind ein weiteres Beispiel für die Phänomene, die in dieser Arbeit mit Explorationstechniken untersucht werden.

## 2.3. Erkennung von Korrelationen in FHN-Systemen

Die Erkennung von Korrelation ist eine Mustererkennungsaufgabe. Dabei ist das Muster im Falle der spikenden Neuronen die Gleichzeitigkeit der Spikes der Zeitserien. Sind die Zeitserien stark korreliert, dann findet ein großer Teil der Peaks der zwei Zeitserien gleichzeitig statt. Sind die Zeitserien schwach korreliert, gibt es nur wenige gleichzeitig auftretende Spikes.

### 2.3.1. Statistische Erkennung von Korrelation in FHN-Systemen

Ansätze, die Korrelationen mit Hilfe von statistischen Analysen zu messen, werden in [BHLM05] erörtert. Die dort simulierten Korrelationen werden zunächst statistisch analysiert. Zwei unterschiedliche Korrelationsstärken werden untersucht:  $D = 0$  für ungekoppelte Zeitserien und  $D = 0.00125$  für schwache Kopplung (weniger als 10% des Wertes für vollständige Kopplung, der bei  $D = 0.017$  liegt).

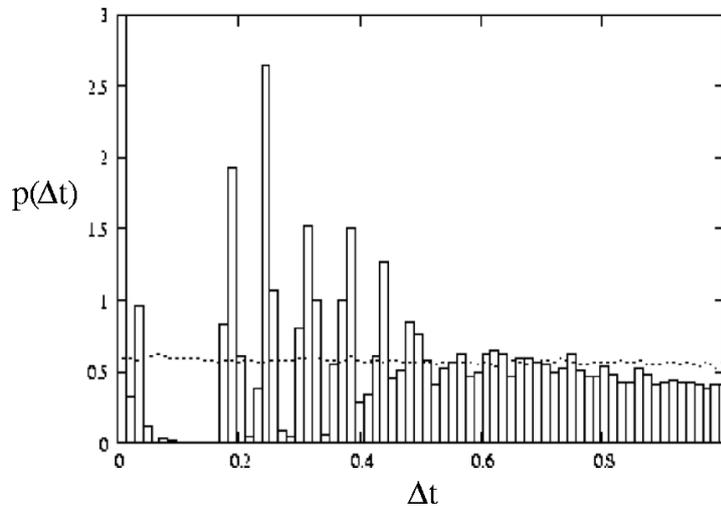
Die Autoren erläutern, dass die normierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Zeitintervalle zwischen aufeinanderfolgenden Spikes der gleichen Zeitserie keine Unterscheidung zwischen den beiden Kopplungsstärken ermöglicht, solange die gemittelte Spikefrequenz für beide  $D$ -Werte gleich bleibt.

Stattdessen werden die Inter-Spike-Intervalle betrachtet, also der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spikes unterschiedlicher Zeitserien. Dies gelingt bei Zeitserien, die aus 130000 Peaks bestehen, zuverlässig. Man erhält für eine nicht vorhandene Kopplung ( $D = 0$ ) eine homogene Verteilung der Inter-Spike-Intervalle (gepunktete Linie in Abbildung 2.2). Für schwache Kopplung erhält man hingegen eine charakteristische Verteilung, wie in Abbildung 2.2 (aus [BHLM05]) zu sehen.

Die Evaluation von kurzen Zeitserien führt allerdings zum Verwischen der Verteilungen und es wird schwierig, zwischen den beiden untersuchten Kopplungsstärken (keine Kopplung und schwache Kopplung) zu unterscheiden. Sowohl die homogene Verteilung für  $D = 0$  als auch die charakteristische Verteilung für  $D = 0.00125$  sind verwischt. Also benötigt man für die Statistik relativ große Datenmengen (z.B. 130000 Peaks). Die Autoren schlagen deshalb einen Zugang zu den Daten über Displays vor und geben einige Sonifikationsbeispiele.

### 2.3.2. Explorativer Zugang über Displays

Unter *explorativer Analyse* versteht man eine interaktive, ungerichtete Suche nach Mustern oder Eigenschaften mit dem Ziel, eine Hypothese über die Daten zu formulieren. Zu Daten, die mittels *explorativer Analyse* untersucht werden, existiert



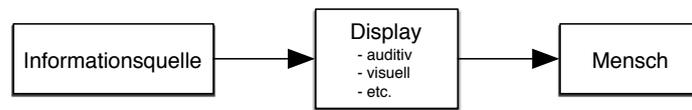
**Abbildung 2.2.:** Verteilung der Inter-Spike-Intervalle (Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spikes **unterschiedlicher** Zeitserien für  $D = 0$  (gepunktete Linie) und  $D = 0.00125$  (Histogramm)). Auf der x-Achse ist der mittlere Abstand zwischen zwei benachbarten Spikes der beiden Einheiten aufgetragen. Es wurden 130000 Spikes ausgewertet (aus [BHLM05] entnommen.).

also im Allgemeinen (und im Gegensatz zur konfirmativen Analyse) bisher keine Hypothese ([SM00]).

Bei der explorativen Erkennung von Korrelationen über *Displays* ist somit der Mensch der Mustererkenner. Die Daten werden über ein Display (hier visuell und auditiv) aufbereitet und dem Menschen präsentiert, der die Daten bewertet oder klassifiziert. Das Display ist dabei die Darstellungsart für die Information (wie in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt). Neben dem visuellen und dem auditiven Display, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind auch weitere Displays denkbar, wie zum Beispiel olfaktorische oder taktile (siehe z.B. [Sjo01]).

### 2.3.2.1. Auditive Displays und Sonifikation

Für den Begriff der Sonifikation gibt es bisher keine allgemeingültige Definition. Nach Hermann ([Her02]) müssen die beiden folgenden Bedingungen zutreffen:



**Abbildung 2.3.:** Schema der Datenaufbereitung.

- *“the sound is synthesized depending upon the data of the domain under study, and*
- *the intention for generating the sound is to learn something about the data by listening to it. The sound is only regarded as the medium of communication.”*

Diese Definition beruht auf einer älteren Definition von Carla Scaletti, die besonders auf das in dieser Arbeit verwendete Verfahren der *Parameter-Mapping-Sonifikation* (siehe unten) zutrifft:

*“Sonification is a mapping of numerically represented relations in some domain under study to relations in an acoustic domain for the purposes of interpreting, understanding, oder communicating relations in the domain under study.”*([Sca94])

Scaletti betont in der gleichen Arbeit, dass die Sonifikation sowohl die Technik, Daten zu verklanglichen, als auch die Absicht, über diese Verklanglichung etwas zu verstehen oder zu übermitteln, umfasst. Das unterscheidet Sonifikation von anderen Gebieten, die Klänge erstellen (wie zum Beispiel Musik).

Zu den Vorteilen auditiver Displays gehört die Parallelisierbarkeit der u.U. hochdimensionalen Informationen und die hohe zeitliche Auflösung des Gehörs. Für Daten, die die Aufmerksamkeit des Hörers nur bei Bedarf erregen sollen, können eine oder mehrere Sonifikationen im Hintergrund laufen, während der Hörer mit anderen Dingen beschäftigt ist. Dies ist gerade im Vergleich zu visuellen Displays ein großer Vorteil.

Zu den Nachteilen von auditiven Displays gehören die geringe Auflösbarkeit einiger Parameter (z.B. Attack Times) und das Fehlen von absoluten Werten (für die Tonhöhe gilt dies zumindest für die Menschen, die kein absolutes Gehör haben). Bei sprachlicher Kommunikation könnte eine im Hintergrund laufende Sonifikation stören und sie könnte dem Hörer (je nach Art und Dauer der Sonifikation oder Geschmack des Hörers) „auf die Nerven gehen“. Ausführliche Informationen zu

Vor- und Nachteilen von auditiven Displays gegenüber visuellen Displays findet man in [Kra94].

Es gibt unterschiedliche Verfahren für die Sonifikation:

*Auditory Icons* ordnen einzelnen Ereignissen individuelle Klänge (im visuellen Display würde man von Symbol sprechen) zu, die Aufschluss über deren Eigenschaften geben können. Dabei steht die Assoziation über eine Metapher im Vordergrund. Die Soundsymbole müssen entweder intuitiv verständlich sein oder vom Benutzer erlernt werden. *Earcons* stellen eine Kombination von musikalischen Motiven dar, die sich beispielsweise in Rhythmus, Klangfarbe (Timbre) und Intervall unterscheiden. Auch hier muss das Verständnis der in den Earcons enthaltenen Daten mühsam erlernt werden. Zwei weitere Methoden sind *Audification* und *Model-based-Sonifikation*, die in [HR99] beschrieben werden.

*Parameter Mapping* ist die am weitesten verbreitete Sonifikationstechnik. Visuell ist ein Streudiagramm (Scatterplot) mit den Sonifikationen dieses Verfahrens vergleichbar. In Streudiagrammen werden grafische Elemente durch die Überlagerung vieler einzelner datengetriebener Merkmale (x- und y-Wert, Form, Farbe und Größe der Elemente) darstellt. Beim Parameter Mapping wird für jeden Datenpunkt ein oder mehrere Klänge generiert, wobei Abspielbeginn (Onset), Tondauer, Tonhöhe, Lautstärke, Klangfarbe, etc. durch die Datenmerkmale gesteuert werden. Für die Sonifikationen dieser Arbeit wird eventbasiertes Parameter Mapping verwendet. Dazu werden aus den Datenströmen Ereignisse (Events) extrahiert und sonifiziert.

### 2.3.2.2. Visuelle Displays

Unter *Visualisierung* versteht man eine grafische Repräsentation von Daten oder Konzepten, die die Entscheidungsfindung unterstützt ([War00]). Ihr Ziel ist es, dem Anwender mit Hilfe der Visualisierung die Informationen zur Verfügung zu stellen, die er benötigt, um die zugrunde liegenden Daten zu verstehen und zu bewerten ([SM00]). Ein Vorteil gegenüber der Sonifikation ist, dass man Visualisierungen im Allgemeinen auf Papier darstellen kann. Sonifikationen kann man zwar in Form ihrer Partitur darstellen (falls sie musikalischer Struktur sind) aber nicht direkt als akustisches Material.

Für diese Diplomarbeit werden die Daten in sogenannten Zeitdiagrammen abgebildet. In diesen werden Daten entlang einer Zeitachse dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass sich die Daten nicht *durch* die Zeit verändern, sondern ihre Veränderungen nur anhand der Zeitachse *sichtbar gemacht* werden.

## 2.4. Psychophysische Versuche

Im Folgenden sollen kurz die psychologischen Fachbegriffe erläutert werden, die in dieser Arbeit verwendet werden. Ausführliche Informationen dazu finden sich in [ZGHG99], [Hub95] oder [BD03].

### 2.4.1. Experiment

Man spricht von einem *Experiment*, wenn ein Versuchsleiter systematisch alle Ausprägungen einer oder mehrerer *unabhängiger Variablen* variiert und deren Effekt auf die *abhängigen Variablen* registriert, wobei ausgeschlossen werden muss, dass dieser Effekt auf die Wirkung von *Störvariablen* zurückzuführen ist. Ziel eines Experimentes ist es, einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zu untersuchen ([Hub95]).

### 2.4.2. Abhängige und unabhängige Variablen

Die *unabhängige Variable* bezeichnet diejenige Variable, die vom Versuchsleiter variiert wird. Jede unabhängige Variable hat mindestens zwei Ausprägungen. Bei Experimenten mit nur einer unabhängigen Variablen spricht man von einfaktoriellen, bei mehreren unabhängigen Variablen spricht man von mehrfaktoriellen Versuchsplänen. Die Ausprägungen der unabhängigen Variablen bezeichnet man auch als *Bedingungen*. Bei vollständig kombinierten mehrfaktoriellen Versuchsplänen (*Designs*) wird jede Ausprägung jeder Variablen mit jeder Ausprägung aller anderen Variablen kombiniert. Der Vorteil von mehrfaktoriellen Designs ist, dass der Versuchsleiter nicht nur die Wirkungen jeder der unabhängigen Variablen prüfen kann (man spricht von einem *Haupteffekt*) sondern zusätzlich auch den Einfluss der Kombination (man spricht von einem Interaktionseffekt) beobachten kann ([ZGHG99]).

Demgegenüber stellen *abhängige Variablen* die Merkmale dar, an denen man die Wirkung der Variation der unabhängigen Variablen misst. Auch hier sind univariate (nur eine abhängige Variable) und multivariate (mehrere abhängige Variablen) Experimente möglich.

### 2.4.3. Störvariablen

Als *Störvariable* werden all diejenigen Variablen bezeichnet, die die abhängigen Variablen (möglicherweise) mit beeinflussen können und daher kontrolliert werden müssen. Diese Kontrolle kann vor allem durch eine zufällige Zuweisung der

Versuchspersonen zu den Versuchsbedingungen (*Randomisierung*) erreicht werden ([ZGHG99]).

Man geht davon aus, dass sich durch die Zufallszuweisung alle Versuchspersonenspezifischen Störvariablen (wie z.B. Geschlecht oder Intelligenz) gleichmäßig auf die Bedingungen verteilen. Durch die Randomisierung sollen die Versuchspersonengruppen einander so ähnlich wie möglich gemacht werden. Durch die zusätzliche zufällige Abfolge der Bedingungen (bzw. Bedingungskombinationen) wird die Möglichkeit von Reihenfolge-Effekten ausgeschlossen. So soll z.B. vermieden werden, dass alle Versuchspersonen bei den gleichen Bedingungen schlechtere Ergebnisse erzielen, weil sie bereits müde sind.

Eine weitere Methode zur Kontrolle von Störvariablen ist die Standardisierung des Versuchsablaufs. Mit *Standardisierung* ist gemeint, dass möglichst von der Begrüßung bis zur Verabschiedung der Versuchsperson alle Probanden gleich behandelt werden. Dazu gehört beispielsweise ein einheitlicher Ablauf des Experiments und die Konstanzhaltung von Variablen wie Helligkeit oder Lärm sowie eine normierte Instruktion, die am besten schriftlich stattfindet, damit alle Versuchspersonen die gleichen Informationen haben.

#### 2.4.4. Hypothesen und Operationalisierung

Eine *Hypothese* wird auf der Grundlage von bisherigen Forschungsergebnissen (z.B. aus der Literatur), theoretischen Überlegungen und empirischen Beobachtungen formuliert. Sie stellt die vermutete Antwort auf eine Frage dar. Mit Hilfe des Experiments (und der statistischen Auswertung des Experiments) soll die Hypothese verifiziert oder falsifiziert werden.

*Operationalisierung* bezeichnet die Maßnahmen, die getroffen werden, um die Hypothese empirisch überprüfbar zu machen. Dazu werden den theoretischen Begriffen der Hypothese beobachtbare Phänomene zugeordnet. Sowohl die unabhängigen als auch die abhängigen Variablen müssen operationalisiert werden. Außerdem muss eine Methode zur Datenerhebung (z.B. Fragebogen) ausgewählt werden, um die Phänomene zu beobachten.

#### 2.4.5. Stichproben und Ablauf

Für jedes Experiment muss eine *Stichprobe* (die Versuchspersonen) ausgewählt werden. Diese Stichprobe muss eine Untermenge der Population sein, für die die Hypothesen nachgewiesen werden sollen und sollte möglichst repräsentativ für die Gesamtpopulation sein.

In einer *Übungsphase*, die dem eigentlichen Test vorgelagert wird, können die Versuchspersonen ausprobieren, ob sie die Aufgabe richtig verstanden haben und sich mit den Gegebenheiten der Materialien (z.B. Computerprogrammen) vertraut machen.

### 2.4.6. Verfahren zur Hypothesenverifikation

Zur Hypothesenverifikation wurden *t-Tests* und *Varianzanalysen* eingesetzt. Diese Verfahren werden hier nicht näher erläutert, interessierte Leser mögen in Dataming- oder Statistik-Büchern (wie zum Beispiel in [Bor05]) nachschlagen.

## 3. Entwicklung der Fragestellung und Versuchsmethodik

In diesem Kapitel werden zunächst mögliche Fragen für ein Experiment erörtert und dargelegt, aus welchen Gründen die Entscheidung für dieses Experiment gefallen ist. Dann wird aufgezeigt, welche Fragestellungen und unterschiedliche Designparameter dafür gewählt wurden. Zum Schluss wird die ausgewählte Versuchsmethodik dargestellt.

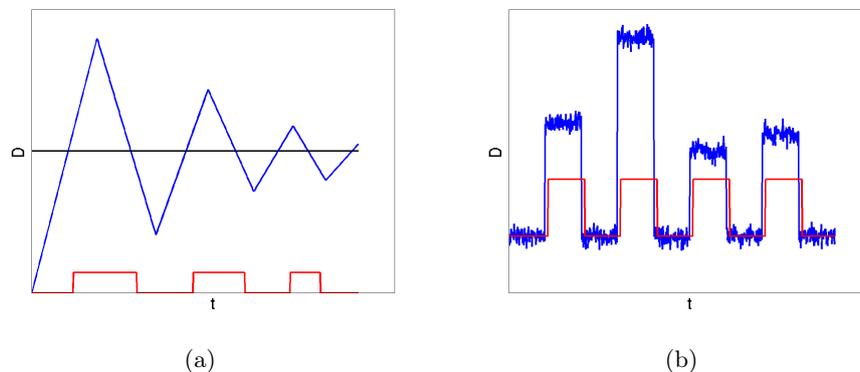
### 3.1. Entwicklung der Fragestellung

In [BHLM05] wurde ein System aus zwei diffusiv gekoppelten FHN-Differentialgleichungen simuliert. Die resultierenden Spikes der beiden Zeitserien wurden dann mit Hilfe von statistischen Methoden und mit Hilfe von Sonifikationen untersucht. Es wurde vermutet, dass Menschen Korrelationen gut und schnell (es werden nur kurze Zeitserien benötigt) mit dem Gehör wahrnehmen können. Die Autoren meinen, dass das Ohr besonders dafür geeignet sei, Rhythmen und rhythmische Änderungen in akustischen Signalen zu erkennen.

Sie nutzten den Zeitstempel als Sonifikations-Zeitpunkt und verwendeten mehrere Sonifikations-Verfahren, unter anderem auch das in dieser Arbeit verwendete *Parameter Mapping*. Dabei wurden von den Zeitserien nur diejenigen Maxima der Spikes (Peaks) verwendet, die einen bestimmten Schwellwert überschritten und aus diesen Peaks akustische Events generiert, die dem Peakzeitpunkt entsprechend abgespielt wurden. Um die Unterscheidung der beiden Zeitserien zu erleichtern, wurden sie mit unterschiedlicher Tonhöhe und auf unterschiedlichen Audiokanälen (links/rechts) abgespielt.

#### 3.1.1. Diskutierte Fragestellungen

Auf der Basis der o.g. Arbeit wurde in mehreren Planungstreffen mit T. Hermann und E. Carbone und in E-Mail-Austausch mit G. Baier nach möglichen Experimenten gesucht. Es wurden die folgenden Ideen für Fragestellungen besprochen:



**Abbildung 3.1.:** Skizze zweier möglicher Versuchsmuster.

- Welche Kompressionsstärke (Abspielgeschwindigkeit) ist optimal, um Kopplungen möglichst schnell erkennen zu können? (wurde nicht näher betrachtet)
- Ab welchem Schwellwert wird überhaupt die Kopplung erkannt?  
Ablauf: Die Versuchsperson erhält einen Taster, den sie drücken soll wenn sie eine Kopplung der beiden Zeitserien in der Testsonifikation erkennt und loslassen soll, wenn sie keine Kopplung mehr erkennen kann. Die Kopplungsstärke im Versuchsmuster sinkt dabei bei gedrückter Taste allmählich bzw. steigt bei ungedrückter Taste. In Abbildung 3.1(a) ist ein möglicher Stimulus skizziert (blaue Kurve), der durch den Tastendruck der Versuchsperson (rotes Rechteckmuster) dynamisch verändert wird. Ziel des Versuchs ist im Idealfall ein Intervall, in dem die spezifische Hörschwelle für Kopplungen für die betreffende Versuchsperson liegt (in der Skizze wird die individuelle Hörschwelle als schwarze Gerade dargestellt).  
Problem: Vielleicht gibt es dieses Intervall gar nicht, weil auch bei gekoppelten Signalen zwischendurch zufällig Teilstücke der Sonifikation unkorreliert klingen und umgekehrt bei nicht-gekoppelten Signalen Teilstücke vorkommen, die gekoppelt klingen. Man bekommt in dem Fall noch nicht einmal ein Versuchspersonen-spezifisches Intervall.
- Welchen Einfluss haben zusätzliche Anhaltspunkte, wie die *brilliance* (Schärfe) der Töne in der Sonifikation auf die Beurteilung der Kopplungsstärke durch Versuchspersonen?  
Ablauf: Die Versuchspersonen hören eine kurze Sonifikation der Zeitserien

einer bestimmten Kopplungsstärke und sollen danach einschätzen, welche Kopplungsstärke dem Hörbeispiel zugrunde liegt. Dabei gibt es Hörbeispiele, in denen die Schärfe der Klänge ein Maß für den zeitlichen Abstand zwischen zwei Signalen darstellt und Hörbeispiele, in denen die Schärfe konstant ist. Problem: Vielleicht können Versuchspersonen diesen zusätzlichen Parameter nicht ohne viele Vorübungen auswerten.

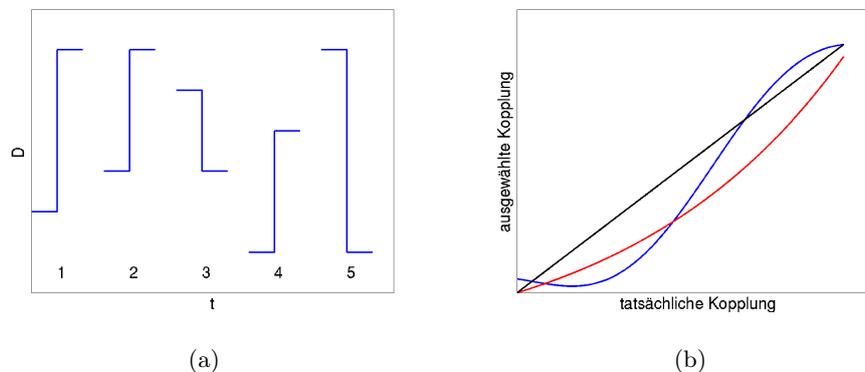
- Änderungssensitivität: Um welchen Prozentwert muss sich die Kopplungsstärke ändern, damit Versuchspersonen eine Änderung erkennen? Dafür wurden zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten besprochen:

1. Möglichkeit: Die Versuchsperson bekommt einen Taster, den sie drücken soll, wenn sie Kopplungen in der Sonifikation erkennt und loslassen soll, wenn sie glaubt, dass die beiden Signale unkorreliert sind. Das Versuchsmuster besteht aus einer festen Sequenz von abwechselnd unkorrelierten und unterschiedlich stark gekoppelten Signalen in Form eines Rechteck-Musters. Eine Skizze eines möglichen Rechteckmusters ist in Abbildung 3.1(b) zu sehen (blaue Kurve). Im Idealfall entsteht ein Personen-spezifisches Rechteck-Muster, an dem man die Hörschwelle für Kopplungserkennung und eine Reaktionszeit ablesen kann. Ein mögliches Antwortmuster ist in der roten Kurve skizziert.

Problem: Durch die Zufälligkeit der Testmuster gibt es vielleicht nicht-beabsichtigte kopplungsartige Abschnitte in den Testmustern, die die Versuchspersonen verwirren. Das Ergebnis ist somit nicht abschätzbar und außerdem sehr schwierig auszuwerten.

2. Möglichkeit: Das Versuchsmuster besteht aus kurzen, fixen Sequenzen, in der maximal eine Kopplungsstärken-Änderung stattfindet (siehe blaue Kurve der Skizze in Abbildung 3.2(a)). Dabei kann die Änderung in der Kopplungsstärke entweder sprunghaft stattfinden oder über einen bestimmten Zeitraum ansteigen. Die Versuchsperson soll beurteilen, ob sich die Kopplungsstärke geändert hat oder nicht. Im Idealfall kann man dadurch eine Schwelle für die Änderungsstärke feststellen. So könnte es zum Beispiel bei dem skizzierten Versuchsmuster sein, dass eine Versuchsperson die Kopplungsstärken-Änderungen der Stimuli a,b,d und e erkennt, die von Stimulus c jedoch nicht. Das o.g. Problem mit der Zufälligkeit der Testmuster mittelt sich hier bei vielen Versuchen hoffentlich heraus.

Problem: Gegen den sprunghaften Anstieg des Testmusters spricht, dass



**Abbildung 3.2.:** Skizze zweier möglicher Versuchsmuster.

dann die Versuchsperson eventuell nur den Bruch der Kopplungsstärken-Änderung erkennt. Für den sprunghaften Anstieg spricht, dass ein gradueller Anstieg schwierig erkennbar sein könnte weil der Anstieg zum Beispiel so langsam stattfindet, dass das Ohr von einer Erhöhung der Kopplungsstärke zur nächsten keinen Unterschied feststellen kann. Also müsste der Anstieg schnell-graduell sein. Eventuell ist es aber sinnvoller, das Testmuster plötzlich ansteigen zu lassen anstatt es graduell ansteigen zu lassen, weil das System ohnehin einige Zeit braucht um die Kopplungsänderung zu vollziehen. Demnach wäre es sowieso ein leicht gradueller Anstieg.

- Wie hängt die subjektive Kopplungsstärke mit der tatsächlichen (objektiven) Kopplungsstärke zusammen?  
Ablauf: Die Versuchspersonen hören kurze Sonifikationen zweier Zeitserien unterschiedlicher Kopplungsstärke an und sollen danach einschätzen, wie stark die Testsequenz gekoppelt war. Mögliche Ziele: Man erhält durch die Mittelung über alle Versuchspersonen und Versuche eine Kurve, die mehr oder weniger stark um eine (idealerweise) lineare Funktion streut. Ein mögliches Ergebnis wird in Abbildung 3.2(b) skizziert. Die schwarze Diagonale stellt dabei das optimale Ergebnis, die fehlerlose Erkennung der Kopplungsstärke, dar. Außerdem ist interessant, ob die Versuchspersonen die Extremwerte (0% bzw. 100%) tatsächlich mit Extremwerten bewerten. Welche Kopplungsstärken können überhaupt unterschieden werden und gibt es eine

Erkennungsschwelle für Kopplung? Werden die Versuchspersonen auf Dauer besser?

- Wie gut ist die Erkennung der Kopplungsstärke bezüglich der Sonifikation im Vergleich zur Visualisierung derselben Daten?

Ablauf: Die Versuchspersonen bekommen kurze Testsequenzen als Visualisierung auf dem Bildschirm dargeboten. Dabei werden die gleichen Daten als Grundlage verwendet, wie oben bei der Sonifikation. Die Versuchsperson soll anhand dieser Abbildung entscheiden, wie stark die beiden Signale ihrer Meinung nach gekoppelt sind. Mögliche Ziele: Es ergibt sich hier im Vergleich zum Sonifikationsansatz ein Unterschied in der Verteilung und dem Mittelwert über die Versuche und Versuchspersonen. Vorstellbar wäre zum Beispiel, dass für geringere Kopplungsstärken das eine Display „besser“ geeignet ist und für höhere Kopplungsstärken das andere Display.

Von den oben diskutierten möglichen Fragestellungen wurden für das durchzuführende Experiment die letzten beiden Punkte ausgewählt, weil sie zu einem Experiment kombiniert werden können. Es sollte also geklärt werden, ob die Sonifikation besser als die Visualisierung abschneidet, ob man im Laufe der Zeit die Performanz in der Sonifikation steigert und ob die Sonifikation für die Beurteilung geringer Kopplungsstärken besser geeignet ist als die Visualisierung.

Daraus ergeben sich die unabhängigen Variablen *Kopplungsstärke*, *Phase* und *Display-Art*, deren Operationalisierung nun besprochen wird.

### 3.1.2. Operationalisierung

Zunächst wurde für die Variable Kopplungsstärke die Anzahl der Stufen diskutiert. Einerseits sollten genügend Stufen vorhanden sein, um Aussagen über den Verlauf der in Abbildung 3.2(b) skizzierten Funktion machen zu können. Andererseits sollten nicht zu viele unterschiedliche Kopplungsstärken verwendet werden, da die Aufgabe, Kopplung zu erkennen für Versuchspersonen ohnehin neu und ungewohnt ist. Aus diesem Grund wurden fünf, sechs oder sieben unterschiedliche Stufen der Kopplungsstärke in Betracht gezogen. Eine ungerade Anzahl an Kopplungsstärken könnte jedoch dazu führen, dass unsichere Versuchspersonen häufig auf die neutrale Mittelkategorie ausweichen ([BD03]). Um dies zu vermeiden wurde eine gerade Anzahl an Auswahlmöglichkeiten (sechs) gewählt, um die Versuchspersonen zu zwingen, zumindest eine tendenzielle Richtung (wenig Kopplung/viel Kopplung) anzugeben.

Die Variable Display-Art hat zwei Stufen. Hier wurde für jede der beiden Displays diskutiert, welche Darstellungsoptionen gewählt werden. Die Sonifikation orientierte sich an der in [BHLM05] verwendeten Methode. Übernommen wurde das *panning* (Abspielen des Signals auf dem linken bzw. rechten Kanal je nach Zeitserie), die Dauer der einzelnen Klangereignisse und die Lautstärke. Für die beiden verwendeten Tonhöhen wurde zunächst ein Intervall einer Oktave diskutiert. Dies stellte sich jedoch schon im Selbsttest als sehr schwierig unterscheidbar heraus. Stattdessen wurde die Quinte als Intervall für die beiden Zeitserien beibehalten. Die Dauer eines Durchgangs wurde auf 20 Sekunden festgelegt und als Klangfarbe – anders als in [BHLM05] – ein Klang verwendet, der als Anschlag einer Bongo-Trommel beschrieben werden kann (siehe Hörbeispiele auf der beiliegenden CD). Dies soll den perkussiven Charakter der Sonifikationsmethode hervorheben.

Um die Visualisierung möglichst vergleichbar zur Sonifikation zu gestalten aber trotzdem die Vorteile beider Displays zu erhalten, wurde zunächst die Darstellungsform der Peaks diskutiert. Hier wurde die Frage geklärt, ob alle Peaks gleichzeitig zu sehen sein sollen oder (wie in der Sonifikation) immer nur die gerade zur Zeit stattfindenden. Um die natürlichen Vorteile der Visualisierung zu erhalten ist hier die Entscheidung auf die gleichzeitige Anzeige aller Peaks gefallen. Ebenso, wie bei der Sonifikation, sollten als Parameter der Peaks ausschließlich der Peakzeitpunkt und das zugehörige Neuron dargestellt werden. Als intuitive Darstellungsform ist die Entscheidung daher auf die horizontale Zeitachse gefallen, von der Striche der gleichen Größe und Form nach oben (für die eine) bzw. nach unten (für die andere simulierte Nervenzelle) ausgehen. Die Breite der Striche sollte dabei weder zu schmal (schlecht sichtbar) noch zu breit (Striche schlecht voneinander unterscheidbar) sein. Die Farben dunkelgelb und blau auf weißem Grund wurden gewählt, um auch Menschen mit Rot-Grün-Sehschwäche die Möglichkeit zur kontraststarken Unterscheidung der beiden Zeitserien zu geben.

Jede der 12 Bedingungen (6 Kopplungsstärken  $\times$  2 Displays) wurde jeder Versuchsperson 6 mal vorgegeben. Die Variable Display-Art wurde geblockt variiert. Die Hälfte der Versuchspersonen bearbeitete zuerst den visuellen und dann den auditiven Block, für die andere Hälfte war die Abfolge umgekehrt. Beide Blocks (visuelle Bedingung, auditive Bedingung) wurden in je drei zeitliche Phasen segmentiert, um die Untersuchung der Entwicklung der Performanz über die Zeit zu ermöglichen. Dabei wurde einerseits darauf geachtet, dass die präsentierten Korrelationsstärken uniform über alle Phasen verteilt sind und andererseits keine von den Versuchspersonen leicht erkennbare Regelmäßigkeit in der Abfolge der Korrelationsstärken zustande kam. Außerdem musste bedacht werden, dass jede Versuchsperson alle experimentellen Bedingungen bearbeitet, also insgesamt nicht zu

viele Messwiederholungen gemacht werden sollten.

Für die unabhängigen Variablen wurden zwei Fehlermaße diskutiert. Einerseits wurde ein absolutes Fehlermaß für aussagekräftiger gehalten, weil die Information über den Grad der Abweichung erhalten bleibt. Andererseits hat ein solches Distanzfehlermaß den Nachteil, dass man je nach tatsächlicher Kopplungsstärke einen unterschiedlich großen Fehlerwert erreichen kann. Deshalb wurde zusätzlich zum Distanzfehlermaß ein boolesches Fehlermaß betrachtet, wie in Abschnitt 3.2.2 näher erläutert.

### 3.1.3. Hypothesen

#### 3.1.3.1. Display-Art

Das menschliche Hörorgan ist von den Sinnesorganen, die Rhythmen wahrnehmen können (z.B. auch dem Auge) laut Baier ([Bai01]) am stärksten auf Vorgänge in der Zeit spezialisiert. Rhythmen haben für das Ohr eine unmittelbare Bedeutung. Feine Unterschiede in Rhythmen sind auditiv besser wahrnehmbar als visuell. Die Hörschwelle für Korrelationen in sonifizierten gekoppelten FHN-Systemen ist, wie in [BHLM05] festgestellt, relativ gering. Es liegt nahe zu vermuten, dass das auditive System dem visuellen in der Wahrnehmung von Korrelationen und der Einschätzung von Korrelationsstärken daher überlegen ist. Daher wird die folgende Hypothese formuliert:

**1. Hypothese:** Unter der auditiven Bedingung machen Versuchspersonen weniger Fehler bei der Erkennung von Korrelationen als in der visuellen Bedingung.

#### 3.1.3.2. Lerneffekt

Trotz des Gebrauchs von Sonifikationstechniken zum Beispiel für medizinische Überwachungsmaßnahmen, wie beim Stethoskop oder der Überwachung der Vitalfunktionen bei Operationen ist die Sonifikation eine weitgehend unvertraute Technik zur Datenanalyse. Erst in den letzten Jahren wurden erste Versuche unternommen, Sonifikationen auch für andere Bereiche zu nutzen (siehe [Kra94]). Der Nachteil dieser unüblichen Methode liegt vor allem in der geringen Übung potenzieller Versuchspersonen in der Nutzung auditiver Displays für analytische Untersuchungen. Durch Training sollte sich allerdings in diesem Fall ein Lerneffekt einstellen. Im Gegensatz dazu sind wir an den Gebrauch visueller Displays gewöhnt. Daher ist hier kein oder zumindest einen geringerer Lerneffekt zu erwarten. Dieser Lerneffekt soll in dieser Arbeit untersucht werden. Dazu wurde folgende Hypothese aufgestellt:

**2. Hypothese:** In der auditiven Bedingung sinkt die Fehleranzahl der Versuchspersonen im Laufe der Zeit (von Phase eins bis Phase drei) durch Lerneffekte. Für die auditive Bedingung ist dieser Effekt stärker zu erwarten als für die visuelle Bedingung.

### 3.1.3.3. Interaktion (Korrelationsstärke)

Die Geschwindigkeiten der Informationsverarbeitung vom menschlichen Gehör und des Sehapparates sind unterschiedlich. Laut Kurzweil ([Kur90], zit. nach [Lan05]) können die Augen 50 Millionen Bits pro Sekunde verarbeiten während die Ohren nur ungefähr 1 Million Bits pro Sekunde verarbeiten können. Andererseits ist das zeitliche Auflösungsvermögen der Augen sehr gering. Die Verschmelzungsfrequenz (also die Frequenz, ab der keine Einzelbilder mehr festgestellt werden können) liegt je nach Beleuchtungsstärke zwischen 20 und 60 Bildern (bzw. Lichtblitzen) in der Sekunde ([MK85]). Es ist deshalb zu vermuten, dass die Stärken der Displays in unterschiedlichen Bereichen liegen. Für den in dieser Arbeit besprochenen Versuch bedeutet das, dass für bestimmte Kopplungsstärken vermutlich das Gehör, für andere Kopplungsstärken vermutlich das visuelle System überlegen ist. Dahinter steht die Frage, für welche Kopplungsstärken welche Methode idealerweise anzuwenden ist. Aufgrund der dieser Untersuchung zugrunde liegenden Arbeit ([BHLM05]) wird hier davon ausgegangen, dass das menschliche Ohr für die Wahrnehmung schwacher Kopplungen besonders gut geeignet ist. Dies führt zu folgender Hypothese:

**3. Hypothese:** Es gibt eine Interaktion zwischen Bedingung und Kopplungsstärke bezüglich der Variablen Fehleranzahl, die darauf zurückzuführen ist, dass für die Erkennung niedriger Korrelationen die auditive Bedingung besonders geeignet ist.

## 3.2. Versuchsmethodik

In diesem Abschnitt werden alle Materialien beschrieben, die für die Durchführung des Experiments verwendet wurden. Ebenso erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Evaluierungsobjekte. Im zweiten Teil wird der genaue Versuchsplan mit den abhängigen und unabhängigen Variablen vorgestellt. Daran schließt sich eine Beschreibung des Versuchsablaufs an.

### 3.2.1. Apparatur und Stimuli

Alle Versuchspersonen trugen Kopfhörer von AKG<sup>1</sup> (K271 Studio). Bei 8 von 18 Versuchspersonen lief die Versuchssoftware auf einem Apple Powerbook G4, 1,5 GHz mit Zwölf-Zoll-Display. Die anderen 10 Versuche liefen auf einem Dual-G5, 2GHz mit 19-Zoll-Display. In beiden Fällen wurde die Soundkarte „Texas Instruments TAS3004“ verwendet. Für den Versuch wurden SuperCollider3 und GNU Octave (Version 2.1.72 auf dem Powerbook und Version 2.9.9 auf dem Dual-G5) unter dem Betriebssystem Mac OS 10.4.8 benutzt.

Die Versuchspersonen setzten für die Bearbeitung der Aufgaben ausschließlich die linke Taste der Computermaus ein. Für jeden Durchgang wählten sie eine der sechs Kopplungsstärken aus und starteten den nächsten Durchgang, indem sie die Schaltfläche „weiter“ betätigten. Die grafische Benutzeroberfläche wird im Kapitel 5.3.1 beschrieben.

#### 3.2.1.1. Evaluierungsobjekte

Um die den Stimuli zugrunde liegenden Daten zu erstellen, wurden vorab zwei Neuronen simuliert, die nacheinander mit sechs verschiedenen Kopplungsstärken gekoppelt waren (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%). Die Spikes, die einen bestimmten Schwellwert übertraten (in dieser Arbeit *Peaks* genannt) wurden als Grundlage für die Sonifikationen und Visualisierungen in Matrizen gespeichert. Es wurden sechs Matrizen (für jede Kopplungsstärke eine) erzeugt, in denen für jeden Peak das betreffende Neuron und der genaue Peakzeitpunkt, zu dem der Spike den maximalen Potentialwert erreicht hatte, zu finden ist. Weitere Informationen zur Erstellung der Peak-Matrizen sind in Kapitel 4 zu finden.

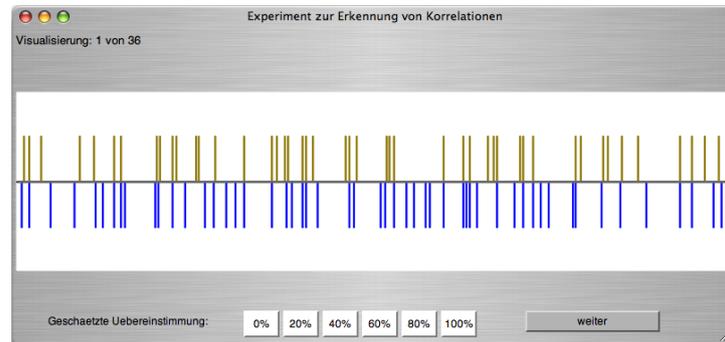
Für jede Display-Bedingung wird vorab eine zufällige Reihenfolge der Durchgänge festgelegt (siehe Kapitel 5.3.2). Für jeden Durchgang wurde die zugehörige Sequenz von 100 Peaks geladen und auf dem Display dargestellt, wie im Folgenden für beide Display-Arten beschrieben:

#### 3.2.1.2. Visuelles Display

In Abbildung 3.3 ist ein Bildschirmfoto des Moduls zur Visualisierung zu sehen. Für das visuelle Display wird jeder Peak der Sequenz als Strich auf weißem Hintergrund dargestellt. Dabei werden die Peaks der ersten Zeitserie ( $P_1$ ) als gelbe Striche oberhalb und die Peaks der zweiten Zeitserie ( $P_2$ ) als blaue Striche unterhalb

---

<sup>1</sup>AKG Acoustics Austria: <http://www.akg.com>



**Abbildung 3.3.:** Bildschirmfoto des Programms während des Experiments zur visuellen Bedingung. Diese Testsequenz ist zu 40% korreliert.

einer horizontalen Linie dargestellt. Die horizontale Linie stellt die Zeitachse dar und die Peaks (Striche) werden anhand des Peakzeitpunkts  $t_p$  auf der Zeitachse verteilt. Eine detaillierte Beschreibung der Implementierung dieses Moduls erfolgt in Kapitel 5.4.2.

#### 3.2.1.3. Auditives Display

Für das auditive Display wurde jeder Peak der Sequenz als perkussiver Klang dargestellt. Dabei wurden die Peaks der ersten Zeitserie ( $P_1$ ) als hohe Klänge auf dem rechten und die Peaks der zweiten Zeitserie ( $P_2$ ) als tiefe Klänge auf dem linken Ohr abgespielt. Die Klänge wurden dabei anhand des Peakzeitpunkts  $t_p$  auf der gesamten Abspieldauer (20 Sekunden) verteilt. In Abbildung 3.4 ist ein Bildschirmfoto des Moduls zur Sonifikation dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der Implementierung dieses Moduls findet sich in Kapitel 5.4.3.

#### 3.2.1.4. Protokoll

Die Reaktionen der Versuchspersonen auf die Stimuli wurden ebenfalls mit Hilfe der für diesen Versuch erstellten Software protokolliert. Außer der Versuchspersonen-Nummer wurde der Klick-Zeitpunkt (Zeitpunkt, an dem die Versuchsperson eine Schaltfläche betätigt hat) sowie die gegenwärtige Display-Art, die laufende Nummer des Durchgangs, die eindeutige Peak-Sequenz-Identifikationsnummer und die von der Versuchsperson ausgewählte Kopplungsstärke gespeichert. Für jede Versuchsperson wurden diese Daten in einer Datei gesichert. Die genaue Funktion der



**Abbildung 3.4.:** Bildschirmfoto des Programms während des Experiments zur auditiven Bedingung. Hier wurde bereits die Schaltfläche „20%“ ausgewählt, die daraufhin ihre Farbe zur Bestätigung der Auswahl ändert.

Protokoll-Klasse ist in Kapitel 5.5 beschrieben. Dort erfolgt ebenfalls eine Beschreibung aller protokollierten Parameter und ihrer Bedeutung für die Auswertung.

### 3.2.2. Versuchsplan/Design

Es sollten drei unabhängige Variablen, systematisch variiert werden. Die Auswirkungen ihrer Variation sollten mit Hilfe der abhängigen Variablen untersucht werden.

#### Unabhängige Variablen:

- *Display-Art*: diskrete Variable mit den beiden Stufen *auditiv* und *visuell*
- *Korrelationsstärke*: diskrete Variable mit sechs Stufen von 0% bis 100%
- *Phase*: diskrete Variable mit drei Stufen (1-3). Jede Stufe hat dabei zwei Durchgänge jeder Ausprägung der Variablen Korrelationsstärke.

Die experimentellen Bedingungen setzten sich aus der Kombination aller Stufen der beiden unabhängigen Variablen Korrelationsstärke und Display-Art zusammen, wobei sie in drei Phasen eingeteilt wurden. Das dreifaktorielle Design besteht also aus insgesamt  $2 \cdot 6 \cdot 3$  Bedingungen, wie in Tabelle 3.2 dargestellt.

**Abhängige Variablen:** Für die Berechnung der abhängigen Variablen wurde die von den Versuchspersonen abgegebene Einschätzung der Kopplungsstärke (gewählte Kopplungsstärke) protokolliert. Aus ihr wurden als abhängige Variablen (wie im Abschnitt 3.1.2 erläutert) zwei unterschiedliche Fehlermaße berechnet:

Display-Art	Phase	Korrelationsstärke					
		0%	20%	40%	60%	80%	100%
visuell	1						
	2						
	3						
auditiv	1						
	2						
	3						

**Tabelle 3.2.:** Die experimentellen Bedingungen setzten sich aus der Kombination aller Stufen der beiden unabhängigen Variablen Korrelationsstärke und Display-Art zusammen, wobei sie in drei Phasen eingeteilt wurden.

- der *Distanzfehler* gibt die absolute Abweichung der gewählten Kopplungsstärke von der tatsächlichen Kopplungsstärke an:

$$E_d = |K_{\text{gewählt}} - K_{\text{tatsächlich}}|$$

Da die Variable Kopplungsstärke sechsstufig ist, liegen die Werte, die  $E_d$  annehmen kann zwischen null und fünf.

- das andere Fehlermaß hat nur zwei mögliche Werte:

$$E_b = \begin{cases} 0, & \text{für } K_{\text{gewählt}} = K_{\text{tatsächlich}} \\ 1, & \text{sonst} \end{cases}$$

Damit erinnert es an das Kronecker-Delta und soll in dieser Arbeit mit dem Begriff *boolescher Fehler* bezeichnet werden.

Häufig wird als weitere abhängige Variable die Zeit, die die Versuchsperson pro Durchgang benötigt, verwendet. In dieser Untersuchung wird die Zeit (obwohl sie auch protokolliert wurde) nicht als abhängige Variable verwendet weil die Sonifikation im Gegensatz zu den Visualisierungen eine festgelegte Dauer von 20 Sekunden haben, und damit gegenüber den Visualisierungen einen deutlichen Nachteil aufweisen.

**Reihenfolge der experimentellen Bedingungen und Messwiederholungen:** Für jede der zwölf Bedingungskombinationen aus den Variablen Display-Art und Kopplungsstärke wurden sechs Messwiederholungen durchgeführt, denen je eine Sequenz von 100 Peaks zugrunde lag. Für die visuellen Bedingungen wurden die selben Peak-Sequenzen verwendet wie für die auditiven Bedingungen. Insgesamt hat jede Versuchsperson alle experimentellen Bedingungen und somit 72 Durchgänge bearbeitet.

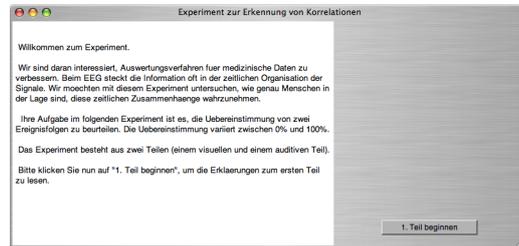
Die Stufen der Variablen Display-Art wurden geblockt variiert. Die eine Hälfte der Versuchspersonen hat zuerst die visuellen und danach die auditiven Bedingungen bearbeitet, die andere Hälfte zuerst die auditiven und danach die visuellen Bedingungen. Die Zuordnung zu den beiden Gruppen wurde von beiden Rechnern, an denen die Versuche stattfanden, jeweils abwechselnd in der Reihenfolge des Erscheinens der Probanden vorgenommen.

Die Stufen der Variablen Korrelationsstärke und der Messwiederholungen wurden dagegen in drei Phasen von jeweils zwölf Durchgängen eingeteilt und anschließend randomisiert. In jeder Phase wurden jeweils zwei zufällige Peak-Sequenzen jeder der sechs Korrelationsstärken in zufälliger Reihenfolge aufgerufen. Die Reihenfolge der 36 Durchgänge wurde für jede Versuchsperson und jede der Display-Arten zufällig festgelegt.

**Übungsdurchgänge:** Vor jedem der beiden Blöcke (visuelles Display, auditives Display) wurden zwei Übungsdurchgänge durchgeführt. Die Versuchspersonen bekamen dabei nacheinander die Visualisierung/Sonifikation von zwei im restlichen Experiment nicht vorkommenden Peaksequenzen der Kopplungsstärken 20% und 80%. Dazu wurde jeweils die Information, um welche Kopplungsstärke es sich handelt, angezeigt.

**Kontrolle der Störvariablen:** Als mögliche Störvariablen der Versuchspersonen wurden das Rhythmusgefühl bzw. der musikalische Hintergrund der Versuchspersonen und ihre Hör- und Sehfähigkeit betrachtet. Möglichen Störvariablen der Untersuchungssituation wie Tageszeit, Lärm und unterschiedliche Lichtverhältnisse, die einen relevanten Einfluss auf die abhängige Variable haben könnten, wurde begegnet, indem jede Versuchsperson jede Bedingungskombination bearbeitet hat und außerdem die Reihenfolge der Blöcke und die Reihenfolge der einzelnen Durchgänge innerhalb der Blöcke zufällig war.

Zusätzlich wurde dem Problem der unterschiedlichen Hör- und Sehfähigkeit und den Lichtverhältnissen begegnet, indem die Lautstärke und die Display-Helligkeit



**Abbildung 3.5.:** Standardisierter Einführungstext für das Experiment, der vom ersten Modul der Software angezeigt wird. Der angezeigte Text ist in Kapitel 3.2.3 angegeben.

individuell eingestellt werden konnte. Zur Nachkontrolle der zufälligen Verteilung der möglichen Störvariable Rhythmusgefühl/Musikalität wurden die Versuchspersonen im Fragebogen gebeten, eine Einschätzung ihres Rhythmusgefühls abzugeben und es wurde erfragt, ob die Versuchspersonen Musikinstrumente spielen.

Auch Versuchsleiter-Effekte wurden durch die Randomisierung und den standardisierten Versuchsablauf (vor allem die Einführung in das Thema und die Aufgabe) vermieden.

#### 3.2.3. Ablauf des Experimentes

Nach einer Begrüßung der Versuchsperson durch die Versuchsleiterin wurde eine kurze mündliche Instruktion zur Benutzung des Rechners gegeben. Darin wurde erklärt, dass alle Informationen, die man zum Bearbeiten der Aufgabe benötigt, mit Hilfe der Software erläutert werden und zur Bearbeitung der Aufgaben ausschließlich die linke Maustaste benötigt wird. Danach wurde die Möglichkeit zur individuellen Anpassung der Lautstärke und der Display-Helligkeit angesprochen und der Sitz des Kopfhörers kontrolliert.

Die Versuchspersonen bekamen im ersten Modul des Programms eine standardisierte Einführung in das Thema und ihre Aufgabe (vgl. Abbildung 3.5) mit folgendem Text:

*Willkommen zum Experiment.  
Wir sind daran interessiert, Auswertungsverfahren für medizinische Daten zu verbessern. Beim EEG steckt die Information oft in der zeitlichen Organisation der Signale. Wir möchten mit diesem Experiment untersuchen, wie genau Menschen in der Lage sind, diese zeitlichen*

*Zusammenhänge wahrzunehmen.*

*Ihre Aufgabe im folgenden Experiment ist es, die Übereinstimmung von zwei Ereignisfolgen zu beurteilen. Die Übereinstimmung variiert zwischen 0% und 100%. Das Experiment besteht aus zwei Teilen (einem visuellen und einem auditiven Teil).*

*Bitte klicken Sie nun auf „1. Teil beginnen“, um die Erklärungen zum ersten Teil zu lesen.*

Außer der allgemeinen Einführung ins Experiment gab es zu jeder der beiden Display-Arten (visuell/auditiv) einen eigenen Einführungstext, der zu Beginn des jeweiligen Teils angezeigt wird. Die eine Hälfte der Versuchspersonen begann mit der visuellen Bedingung, die andere Hälfte mit der auditiven. Hier wurde der Verlauf des Experimentes für den Beginn mit der visuellen Bedingung erläutert. Der Teil begann mit dem Einführungstext für die Visualisierungen:

*In den folgenden Durchgängen werden*

- für die eine Ereignisfolge gelbe Striche oberhalb der horizontalen Achse und*
- für die andere Ereignisfolge blaue Striche unterhalb der horizontalen Achse*

*verwendet.*

*Bitte beurteilen Sie den Grad der Übereinstimmung der gelben/oberen und blauen/unteren Striche. Hierfür sind alle Striche relevant.*

*Als Übung sehen Sie gleich zwei Beispiele, eines für 20% und eines für 80% Übereinstimmung.*

*Bitte markieren Sie für jedes Beispiel Ihre Bewertung und klicken Sie danach auf „weiter“.*

Im Anschluss daran wurde das Übungs-Modul für die Visualisierung aufgerufen. Es wurden zwei Übungsbeispiele präsentiert, eines für 20% und eines für 80% Korrelation. Nach Beenden des Übungsteils wurde der eigentliche Experiment-Teil aufgerufen. In Abbildung 3.3 sieht man ein Bildschirmfoto des Programms für diesen Zeitpunkt. Die Versuchspersonen bearbeiteten insgesamt 36 Visualisierungen, die sie einzeln (durch Auswahl eines der sechs Übereinstimmungswerte) einschätzten. Erst nach dem kompletten Ablauf des visuellen Teils wurde der auditive Teil begonnen. Die Einführung in die auditive Bedingung geschah mit folgendem Text:

*In den folgenden Durchgängen werden*

- *für die eine Ereignisfolge hohe Töne auf dem rechten Ohr und*
- *für die andere Ereignisfolge tiefe Töne auf dem linken Ohr*

*verwendet.*

*Bitte beurteilen Sie den Grad der Übereinstimmung der hohen/linken und tiefen/rechten Töne. Hierfür sind alle Töne relevant. Jedes Hörbeispiel dauert 20 Sekunden.*

*Mit Hilfe von „play“ und „stop“ können Sie das Hörbeispiel beliebig oft anhalten oder wiederholen. Wenn Sie schon eher Ihre Auswahl treffen möchten, müssen Sie das Hörbeispiel auch nicht zu Ende hören.*

*Als Übung hören Sie gleich zwei Beispiele, eines für 20% und eines für 80% Übereinstimmung.*

*Bitte markieren Sie für jedes Beispiel Ihre Bewertung und klicken Sie danach auf „weiter“.*

Nach der Instruktion wurde das Übungs-Modul für die auditive Bedingung aufgerufen. Es enthält die Sonifikation der selben Peaksequenzen, wie oben im Übungs-Modul für die Visualisierung. Nach Ablauf der Übungsphase wurde das eigentliche Experiment-Modul gestartet, in dem 36 Hörbeispiele bewertet werden mussten. In Abbildung 3.4 sieht man ein Bildschirmfoto des Programms zu diesem Zeitpunkt. Nachdem auch der zweite Teil abgeschlossen war, wurde das letzte Modul aufgerufen. Es zeigte folgenden Text an:

*Vielen Dank, dass Sie am Experiment teilgenommen haben. Bitte füllen Sie nun noch kurz den Fragebogen aus, den Sie von der Versuchsleitung erhalten.*

Drückte man nun auf die Schaltfläche „weiter“, schloss sich das Fenster. Die Versuchsperson bekam nun noch den Fragebogen, der im Anhang abgebildet ist.

**Stichprobe:** Die 18 Versuchspersonen setzten sich aus Studierenden und Doktoranden der Universität Bielefeld und der Universität Oldenburg zusammen. Der Großteil der Probanden (zehn) stammte aus dem Fachgebiet Informatik, drei weitere Teilnehmer aus der Fachrichtung Biologie, zwei aus der Linguistik. Die restlichen drei Teilnehmer waren Studienanfänger der Informatik. Es wurden acht Frauen und zehn Männer im Alter von 20 bis 30 Jahren untersucht.

**Belohnung:** Wie bei der Versuchspersonen-Werbung versprochen, erhielt jeder Proband nach dem vollständigen Ablauf des Versuchs und dem Ausfüllen des Fragebogens einen Schokoriegel.

**Dauer des Experiments:** Das Experiment dauerte zwischen 10 bis 45 Minuten, im Mittel 20 Minuten.



## 4. Datenerstellung

Die Daten für die Versuche werden mit GNU OCTAVE ([Eat06]) erstellt. Der Prozess der Datenerstellung ist in Abbildung 4.1 skizziert. In diesem Kapitel werden zunächst die verwendeten Lösungsverfahren für die Differentialgleichungen und Equilibrierungsmaßnahmen besprochen. Im Anschluss daran wird erklärt, auf welche Art die Peaks gefunden werden, die für die Versuche, die in Kapitel 3 verwendet werden. Zum Schluss wird auf die Berechnung der Peakdichte und der Korrelationsstärke eingegangen.

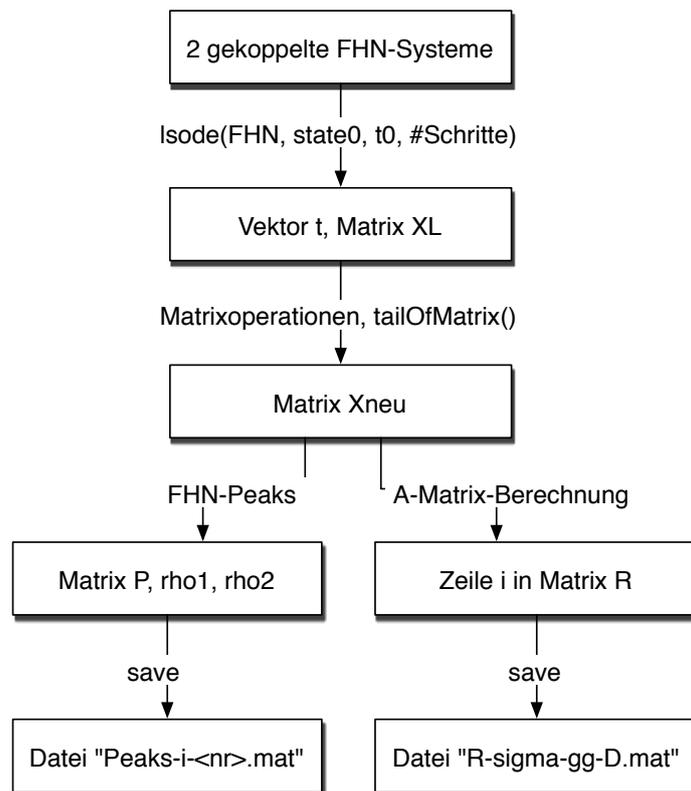
### 4.1. DGL-Lösungsverfahren/-methoden

Die in Kapitel 2.2.2.1 eingeführten diffusiv gekoppelten FHN-Systeme werden mit einem Differentialgleichungs-Lösungsverfahren angenähert. GNU OCTAVE bietet mehrere Methoden zur Lösung von Differentialgleichungen, unter anderem die Runge-Kutta-Methode und auch die Lsode-Methode.

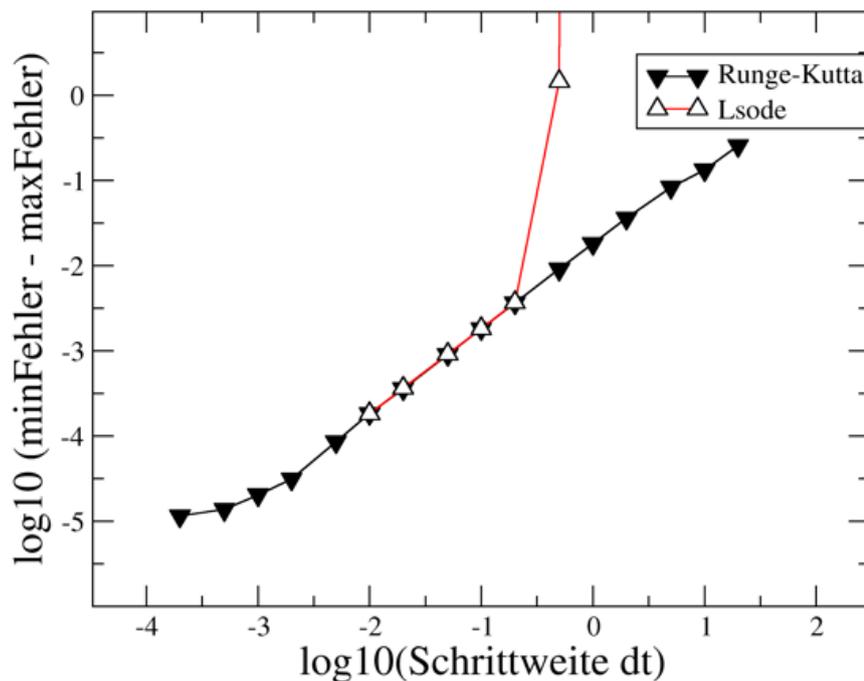
#### 4.1.1. Runge-Kutta

Die klassische Runge-Kutta-Methode vierter Ordnung ist ein numerisches Einschrittverfahren zur Lösung des Anfangswertproblems von Differentialgleichungen. Eine Methode wird laut Konvention  $n$ -ter Ordnung genannt, wenn der Fehlerterm  $O(h^{n+1})$  ist. Es werden vier Evaluationsschritte pro Runge-Kutta-Schritt  $h$  benötigt ([PV], Kap 16).

Für diese Diplomarbeit wurde das Runge-Kutta-Verfahren von GNU OCTAVE (RK4FIXED) als Berechnungsmethode ausgeschlossen weil Runge-Kutta für größere Schrittweiten als 0.2 einen erheblich größeren Fehler hat als LSODE. Dies ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Die rote Kurve mit den unausgefüllten Dreiecken gibt dabei den Fehler für RK4FIXED an und die schwarze Kurve mit den ausgefüllten Dreiecken den Fehler für LSODE. Zu beachten ist, dass beide Achsen den logarithmisch aufgetragen sind. Außerdem ist die Octave-Funktion RK4FIXED deutlich langsamer bei der Berechnung der Differentialgleichungen als die Octave-Funktion



**Abbildung 4.1.:** Ablauf-Skizze für die Datenerstellung. In den Kästen stehen die Eingaben bzw. die Ergebnisse und an den Pfeilen die Modifikatoren (Programme, Skripte, etc.).



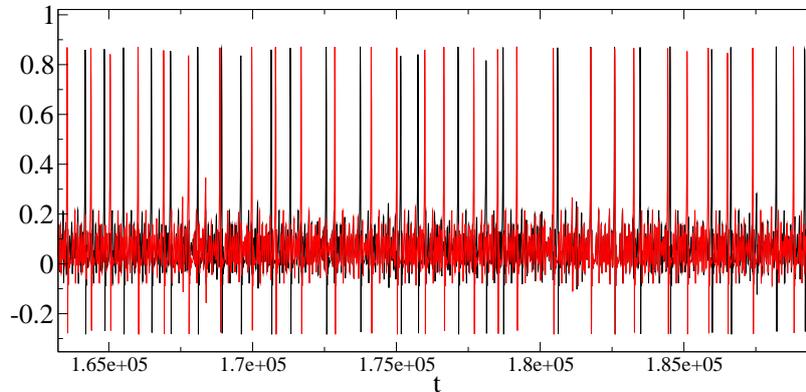
**Abbildung 4.2.:** Vergleich der Genauigkeit der Octave-Funktionen RK4FIXED und LSODE. Auf der y-Achse ist die Differenz aus dem maximalen und dem minimalen Fehler logarithmisch aufgetragen, auf der x-Achse die Schrittweite für die Näherungsfunktion.

LSODE. Ein Grund dafür ist, dass LSODE in Octave kompiliert vorliegt, RK4FIXED jedoch nicht.

#### 4.1.2. Lsode

Die LSODE-Funktion gehört zu dem Paket ODEPACK ([Hin06]), einer Sammlung von Lösungsfunktionen für das Initialwertproblem von Differentialgleichungen für OCTAVE. Ihr Name steht für „Livermore Solver for Ordinary Differential Equations“. LSODE ist – wie die anderen zu ODEPACK gehörenden Funktionen – in Fortran77 geschrieben und löst DGL-Systeme der Form  $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$  ([ea83]).

Als Eingaben bekommt die Funktion LSODE das System aus den beiden diffusiv



**Abbildung 4.3.:** Ausschnitt der Ergebnisse aus den beiden Differentialgleichungen für  $D = 0$ . Die beiden Zeitserien sind als schwarze bzw. rote Kurve dargestellt.

gekoppelten Differentialgleichungen (siehe Abschnitt 2.2.2.1), einen Startzustand  $state0/X_0$  und einen Vektor, der die Zeitschritte  $t$  enthält, die berechnet werden sollen. Der Startzustand wird für jeden LSODE-Aufruf zufällig neu festgelegt durch:  $state0 = 0.1 + 0.05 \cdot (2 \cdot \text{rand}(1, 6) - 1)$ . Das Ergebnis wird von LSODE in dem Vektor  $t$  und der Matrix  $X_L$  zurückgegeben. Im Vektor  $t$  steht in der ersten Zeile der eingegebene Wert  $t_0$ . Die erste Zeile von  $X_L$  ist der eingegebene Startzustand des Systems ( $state0$ ).

Für jeden Zeitschritt von LSODE wird der Wert  $t$  in den Vektor  $t$  geschrieben und eine Zeile in die Matrix  $X_L$  eingetragen.  $X_L$  besteht in diesem Fall aus sechs Spalten, die den Dimensionen der Differentialgleichungs-Systeme entsprechen: Spalte eins entspricht der Lösung für  $\dot{x}_1$ , Spalte zwei der Lösung für  $\dot{y}_1$  und so weiter (Vergleiche 2.2). Also sind Spalte eins und vier von  $X_L$  die Lösungen der beiden FHN-Differentialgleichungen und die restlichen Spalten für die Suche der Peaks in dieser Arbeit irrelevant. Weil die Matrizen sehr groß werden (7 500 000 Zeilen), werden der Vektor  $t$  und die erste und vierte Spalte aus  $X_L$  in eine neue Matrix  $X_{neu}$  gespeichert. Mit dieser kleineren Matrix wird weitergearbeitet. Stellt man die Ergebnisse der beiden Spalten zwei und drei aus Matrix  $X_{neu}$  gegen die Zeit  $t$  dar (Abbildung 4.3), so erkennt man Ausreißer (Spikes), die sich von dem Grundrauschen deutlich absetzen.

### 4.1.3. Equilibrierung

Bei der Berechnung von dynamischen Systemen, wie dem System der beiden gekoppelten FitzHugh-Nagumo-Differentialgleichungen, sind die berechneten Werte Anfangs etwas von den tatsächlichen Werten entfernt, da sich die Lösungsfunktion asymptotisch den tatsächlichen Werten annähert. Um Artefakten aus noch nicht-equilibrierten Berechnungen vorzubeugen werden bei der Erstellung der Peak-Matrix  $P$  die ersten 100 000 Zeilen der Matrix  $X_L$  außer Betracht gelassen. Dies erledigt die Funktion `TAILOFMATRIX()`.

## 4.2. Finden der Peaks

Im durch die FitzHugh-Nagumo-Systeme formulierten Modell entspricht ein Peak einem lokalen Maximum in den Ergebnissen der beiden Differentialgleichungen, welches einen Schwellwert  $\sigma$  überschreitet. Die Differentialgleichungen produzieren ein Grundrauschen im Intervall  $[-0.1, 0.3]$ . Aus diesem Rauschen treten Peaks hervor, die Werte von mehr als 0.8 annehmen. Wie man in Abbildung 4.3 sieht, sind die Peaks beider Zeitserien optisch gut vom Rauschen unterscheidbar. Sinnvolle Werte für den Schwellwert liegen also im Intervall  $[0.4, 0.8]$ . Der Schwellwert  $\sigma$  wurde hier willkürlich auf 0,6 festgelegt.

Die aus den Differentialgleichungen berechnete Matrix  $X_{neu}$  besteht aus den Spalten: `[t, 1. Zeitserie, 2. Zeitserie]`. Um die Peaks zu finden, werden für jede der beiden Zeitserien (Spalte 2 bzw. 3) unter allen Einträgen in der Spalte, die den Schwellwert  $\sigma$  überschreiten mit einem 3-Punkte-Kriterium lokale Maxima gesucht. Ein lokales Maximum wird dabei für diejenigen Werte  $j$  angenommen, deren linker Nachbar und rechter Nachbar kleiner als  $j$  sind:

```
if ((x(j, spalte) > sigma) &&  
    (x(j, spalte) >= x(j-1, spalte)) &&  
    (x(j, spalte) >= x(j+1, spalte)))
```

Für jeden auf diese Art gefundenen Peak wird ein Eintrag in die Matrix  $P$  geschrieben, wobei für einen Peak in der 1. Zeitserie der Eintrag die Form `[t, 1, 0]` hat und für einen Peak in der 2. Zeitserie die Form `[t, 0, 1]`. Für  $t$  wird der Zeitschritt aus  $X_{neu}$  übernommen.

Die beiden Zeitserien können für hohe Korrelationsstärken, selten aber auch für niedrige Korrelationswerte zum exakt gleichen Zeitpunkt einen Peak liefern. Da es für das Sonifikationsmodul wichtig ist, nur einen Peak pro Zeile der Matrix  $P$

zu verarbeiten, werden statt einer Zeile  $[t, 1, 1]$  in diesem Fall zwei Zeilen mit gleichem  $t$ -Wert direkt untereinander geschrieben. Dabei wird die Reihenfolge der Peaks willkürlich so festgelegt, dass die Zeile der Form  $[t, 1, 0]$  über der Zeile der Form  $[t, 0, 1]$  steht. Für die anderen Programmteile macht diese Verdopplung keinen Unterschied. Einen Ausschnitt aus der Matrix sieht man in der folgenden Tabelle.

t	1. Zeitserie	2. Zeitserie
2.00302026706937e+04	0	1
2.06940027592004e+04	0	1
2.07292027638937e+04	1	0
2.15906028787470e+04	0	1

**Tabelle 4.1.:** Auszug aus der Matrix P für 0% Korrelation

Die Matrix  $P$  wird in Dateien mit den Namen `Peaks-i-<nummer>.mat` gespeichert und später als Daten-Grundlage für die Versuche verwendet.  $\langle nummer \rangle$  ist eine laufende Nummer  $i$  und bestimmt die Kopplungskonstante  $D$  durch:

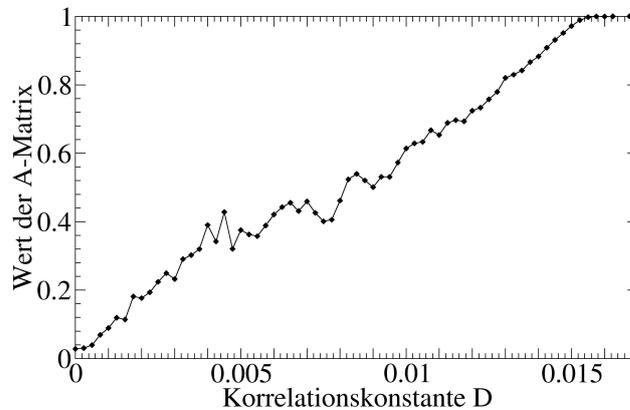
$$D = (0.00025 \cdot i) - 0.00025.$$

### 4.3. Berechnung der Korrelationsstärke

Um die tatsächliche Kopplungsstärke festzustellen wird über das Ergebnis der LSODE-Funktion ( $X_{neu}$ ) eine modifizierte Korrelationsmatrix gebildet, die im Folgenden *A-Matrix* genannt wird.

Für die A-Matrix wird  $X_1$  berechnet, indem alle Werte aus Spalte zwei der Matrix  $X_{neu}$ , die den Schwellwert  $\sigma$  überschreiten, normiert werden (durch die Anzahl der vorhandenen Zeilen geteilt) und alle anderen, die den Schwellwert nicht überschreiten, auf null gesetzt werden. Entsprechend wird  $X_2$  aus Spalte drei der Matrix  $X_{neu}$  berechnet. Anschließend werden  $X_1$  und  $X_2$  multipliziert und durch die Wurzel aus dem Produkt von der Summe der Quadrate von  $X_1$  und der Summe der Quadrate von  $X_2$  dividiert. Für den Sonderfall, dass der Nenner Null ist, wird  $A_{ij} = 0$  festgelegt.

$$A_{ij} = \frac{X_1 X_2}{\sqrt{(X_1)^2 (X_2)^2}}.$$



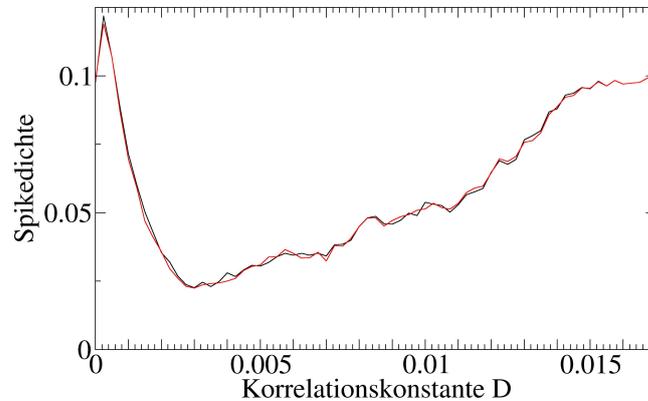
**Abbildung 4.4.:** Ergebnis der A-Matrix-Werte für  $D$  aus dem Intervall  $[0, 0.017]$ .

Das Ergebnis liefert eine Zahl zwischen 0 und 1, die angibt, wieviel Prozent der Peaks der Zeitserie gleichzeitig stattfinden (nach [MWKB06]). Abbildung 4.4 zeigt die Ergebnisse der A-Matrix-Berechnung für 69 Werte von  $D$ . Auf der  $X$ -Achse ist  $D$  aufgetragen, auf der  $Y$ -Achse ist der berechnete A-Matrix-Wert aufgetragen. Die resultierende Funktion ist geradenähnlich.

#### 4.4. Anpassen der Peakdichte

Aus der Matrix  $P$  wird außerdem die Dichte der Peaks pro Zeitserie berechnet, indem die Anzahl der Peaks pro Zeitserie durch das größte  $t$  (der letzte Zeitschritt, der berechnet wird) dividiert wird. In Abbildung 4.5 sind die Peakdichten  $\rho_1$  und  $\rho_2$  für  $D$ -Werte im Intervall  $[0, 0.017]$  aufgetragen. Die Kurven für beide Zeitserien liegen fast exakt übereinander, was bedeutet, dass beide Zeitserien immer gleiche Spikedichten haben. Allerdings ändert sich die Peakdichte beider Zeitserien in Abhängigkeit der Korrelationskonstante  $D$ .

Für die Versuche werden jedoch Zeitserien mit gleichen Peakdichten benötigt, da die Versuchspersonen sonst unter Umständen die Anzahl der vorkommenden Peaks anstatt der Korrelationsstärke beurteilen würden. Es gibt die Möglichkeit, die Peakdichte durch den Parameter  $I$  zu beeinflussen. Allerdings ist der Zusammenhang von  $I$ ,  $D$  und  $\rho$  nicht linear und die Peakdichte daher schwer korrigierbar.



**Abbildung 4.5.:** Die Peakdichte der beiden Zeitserien verändert sich in Abhängigkeit von  $D$ . Hier sind die Dichten beider Zeitserien im Intervall  $D = [0, 0.017]$  dargestellt. Die Peakdichte ist in Prozent angegeben. Zum Beispiel beträgt die Peakdichte für den Kopplungsparameter  $D = 0,0015$  für beide Zeitserien 0,05%. Dies bedeutet, dass 5 Peaks auf 10000 Zeitschritten stattfinden.

Stattdessen wird die Abspielgeschwindigkeit der Samples mit geringerer Peakdichte denjenigen Samples mit höherer Peakdichte angepasst. Dies wird automatisch von der Methode `GETDATASET` aus dem Versuchsprogramm erledigt, denn es werden immer genau 100 Peaks pro Durchgang verwendet. Das Intervall der Peaks wird immer auf die gleiche Abspielzeit (20 Sekunden) in der Sonifikation und die gleiche Fenstergröße in der Visualisierung gestreckt beziehungsweise gestaucht. Außerdem wird die Tondauer beziehungsweise die Peakbreite konstant gehalten, weswegen die Veränderungen von der Versuchsperson nicht wahrgenommen werden.

## 5. Software zur Versuchssteuerung

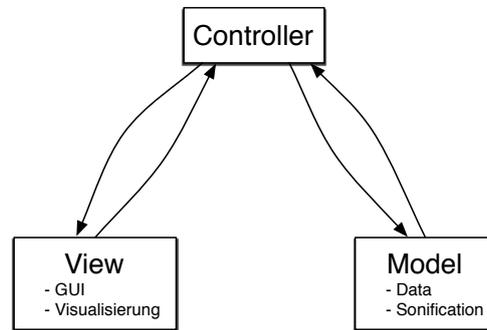
Die Programme zur Versuchssteuerung sind in SuperCollider3 ([McC]) und GNU Octave ([Eat06]) implementiert. SuperCollider ist eine objektorientierte Programmiersprache, die Audiosynthese in Echtzeit erlaubt. Die Programme bestehen aus Klassen, die teilweise voneinander erben, und deren Methoden. Zur einfachen Unterscheidung werden in diesem Kapitel **KLASSEN** von **Methoden**, **Variablen** und **Objekten** im Schriftbild unterschieden.

Für die Programme zur Versuchssteuerung wird das Model-View-Controller-Konzept verwendet ([Oes98]). Dies wird hier umgesetzt, wie in Abbildung 5.1 skizziert. Der Controller (jede CONTROL-Klasse) kommuniziert mit den VIEW-Klassen und der MODEL-Klasse. Dabei werden die grafische Benutzeroberfläche und die Visualisierungen durch die VIEW-Klassen gesteuert. Die MODEL-Klasse stellt die zur Visualisierung und Sonifikation notwendigen Daten zur Verfügung und steuert die Sonifikation.

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Beschreibung der Hauptklasse, die die Experiment-Steuerung übernimmt. Im nächsten Abschnitt wird kurz über die Implementation der Instruktions-Module berichtet. Die Experiment-Module werden im darauffolgenden Abschnitt beschrieben. Dabei wird auch die Methode erklärt, mit der die Einteilung der Durchgänge in Phasen und die Randomisierung durchgeführt wird. Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Display-Arten. Dort wird die Implementation der Visualisierungen und Sonifikationen erläutert. Zwei weitere Abschnitte behandeln die Protokoll-Funktion der Software und den Datenimport über die Schnittstelle zu Octave. Zum Schluss folgt ein Abschnitt zur Wiederverwendbarkeit des hier beschriebenen Softwarepaketes.

### 5.1. Hauptklasse und Steuerung

EXPERIMENT ist die Hauptklasse für die Programme zur Versuchssteuerung. Jedes Modul des Versuchs entspricht einem Control-Objekt, welches ein View-Objekt erzeugt und von den vorhergehenden und nachfolgenden Modulen unabhängig ist. Es öffnet ein eigenes Fenster, welches wieder geschlossen wird, sobald das Modul



**Abbildung 5.1.:** Umsetzung des Model-View-Controller-Konzeptes.

beendet wird. So können beliebig viele Module in beliebiger Reihenfolge eingebunden werden. Für das für diese Arbeit durchgeführte Experiment wurden die beiden folgenden Modul-Reihenfolgen verwendet:

<hr/> visuell – auditiv	<hr/> auditiv – visuell
Intro	Intro
IntroVis	IntroSon
VisExc	SonExc
Vis	Son
IntroSon	IntroVis
SonExc	VisExc
Son	Vis
Outro	Outro

Diese beiden Tabellen beschreiben die beiden unterschiedlichen Reihenfolgen der Module, während die folgende Aufstellung erklärt, welche Aufgabe welches Modul übernimmt:

**Intro:** Allgemeine Einführung, worum es in dem Experiment geht (Hintergründe)

**IntroVis:** Anleitung, welche Aufgabe in der visuellen Bedingung bearbeitet werden soll

**VisExc:** Zwei Übungsdurchgänge, in denen die Versuchspersonen ein Beispiel für 20% und eines für 80% Korrelation präsentiert bekommen

**Vis:** Das eigentliche Visualisierungsexperiment, bestehend aus 36 Durchgängen (mit 6 Durchgängen pro Bedingung), die innerhalb von 12-er-Gruppen randomisiert sind

**IntroSon:** Anleitung, welche Aufgabe in der auditiven Bedingung erledigt werden soll

**SonExc:** Zwei Übungsdurchgänge, in denen die Versuchspersonen ein Beispiel für 20% und eines für 80% Korrelation anhören

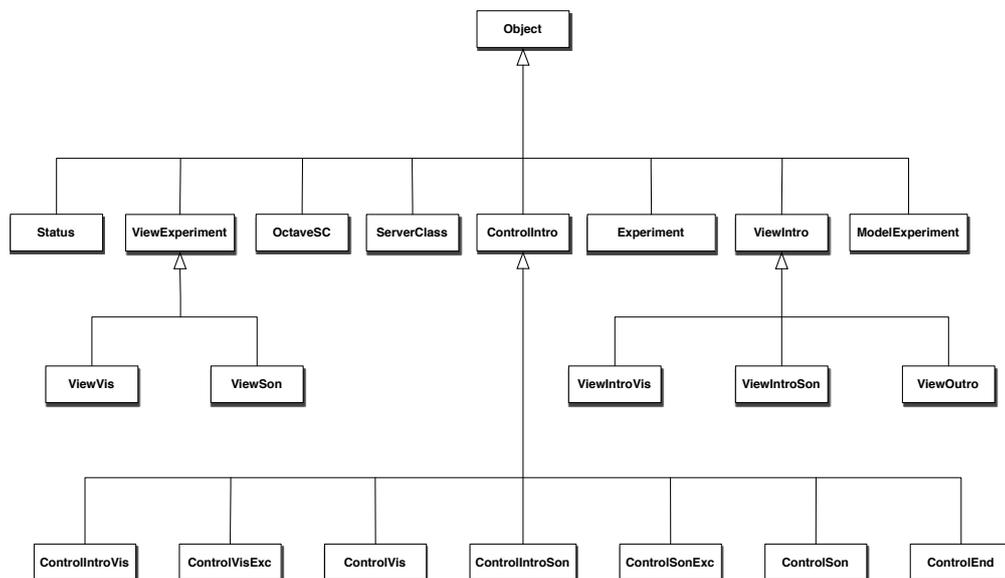
**Son:** 36 Durchgänge (mit 6 Durchgängen pro Bedingung) randomisiert in drei 12er-Gruppen

**Outro:** Dank an die Versuchspersonen und die Bitte, den Fragebogen noch auszufüllen.

Das Experiment wird von der Klasse `EXPERIMENT` aus gesteuert. Dort wird der `SuperCollider-Server` für die Sonifikation und `Octave` gestartet und das `Status-Objekt` erzeugt, was die Reaktionen der Versuchsperson registriert und protokolliert. Ebenso wird dort die Reihenfolge der `Display-Bedingungen` (visuell – auditiv bzw. auditiv – visuell) gesteuert und dann die einzelnen `Experiment-Module` in Form von `Control-Objekten` in der entsprechenden Reihenfolge aufgerufen. Jedes `Control-Objekt` erzeugt ein `View-Objekt`, welches ein Fenster öffnet. Wird dieses Fenster geschlossen, beendet sich das Modul und ruft die Methode `done()` aus der Klasse `EXPERIMENT` auf. Die Methode erhöht die Variable `state` und ruft damit das nächste Element der Liste `schedule` auf. Falls das sich letzte Modul aus der `schedule`-Liste beendet, schreibt die Methode `done()` die Inhalte des `Status-Objektes` in eine Datei und beendet den `Server` und `Octave`. Ein Vererbungsdiagramm der verwendeten Klassen ist in [Abbildung 5.2](#) zu finden.

## 5.2. Die Intro-Module

Zur Einführung in das Experiment bekommen die Versuchspersonen einen standardisierten Einführungstext. Dazu wird ein Objekt vom Typ `VIEWINTRO` erzeugt, welches ein Fenster mit dem entsprechenden Text öffnet. Die Einführungstexte sind in [Abschnitt 3.2.3](#) nachzulesen. Nach dem Lesen betätigt die Versuchsperson die Schaltfläche „weiter“. Dadurch wird das Fenster geschlossen und die Methode `done()` der Klasse `EXPERIMENT` aufgerufen, damit das nächste Modul aufgerufen wird.



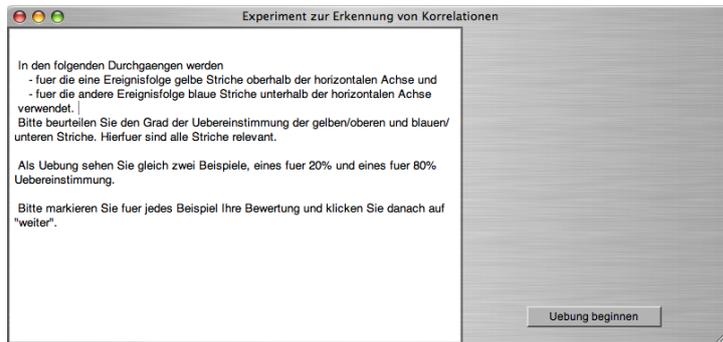
**Abbildung 5.2.:** Vererbungsdiagramm. OBJECT ist die Superklasse aller anderen Klassen. Außerdem erben die Klassen VIEWVIS und VIEWSON von VIEWEXPERIMENT und VIEWINTROVIS, VIEWINTROSON und OUTRO von VIEWINTRO. Die Klasse CONTROLINTRO ist die Superklasse von allen anderen Control-Klassen außer EXPERIMENT.

### 5.2.1. Grafische Benutzeroberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche der Einführungsmodule des Programms besteht also aus einem Textfeld und einem Button, mit dem das gegenwärtige Modul beendet und das nächste aufgerufen werden kann. Sie ist in Abbildung 5.3 zu sehen.

## 5.3. Die Experiment-Module

Zu den Experiment-Modulen gehören insgesamt vier Module. Einerseits die tatsächlichen Experiment-Module für beide Display-Modalitäten (VisExp und SonExp) andererseits die Übungsmodule, mit denen die Versuchspersonen die Bearbeitung der Aufgabenstellung erlernen können.



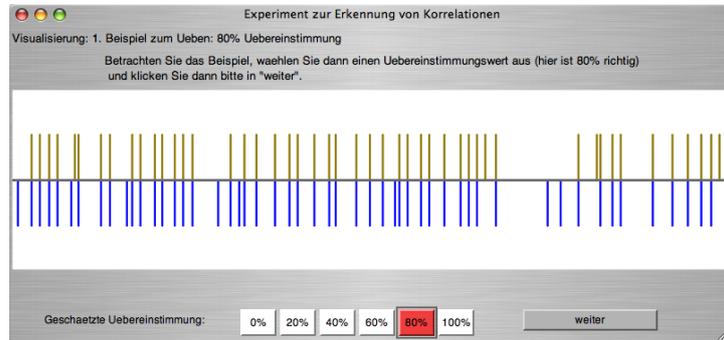
**Abbildung 5.3.:** Elemente der grafischen Benutzeroberfläche vom Einführungsmodul der Versuchssteuerung. Hier ist beispielhaft die Einführung in die visuelle Bedingung dargestellt.

### 5.3.1. Grafische Benutzeroberfläche

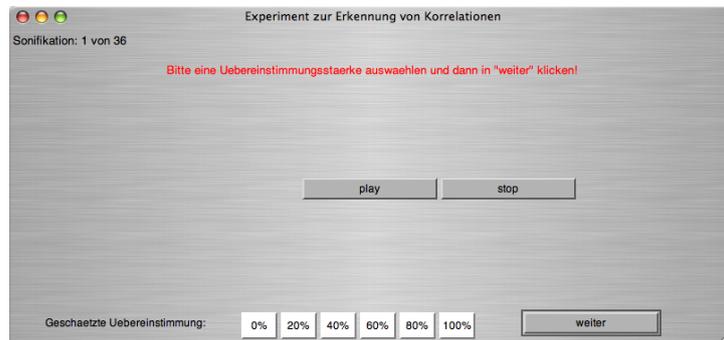
Alle Übungs- und Experiment-Module verwenden die gleiche Fenstergröße wie die Intro-Module. Auch der Button, mit dem das aktuelle Modul beendet und das nächste aufgerufen wird, wird übernommen. Hinzu kommt ein Fortschrittsfeld, in dem angegeben wird, in welchem Modul sich das Programm gerade befindet, wieviele Durchgänge insgesamt abgearbeitet werden sollen und welcher Durchgang gerade bearbeitet wird. Dieses Feld befindet sich oben links im Fenster. Direkt darunter liegt ein Feld für mögliche Hinweise. In den Übungsmodulen wird dort angezeigt, welche Kopplungsstärke gerade visualisiert bzw. sonifiziert wird (siehe Abbildung 5.4). Die Experiment-Module zeigen dort standardmäßig keinen Hinweis an. Wenn jedoch die Schaltfläche „weiter“ betätigt wurde, bevor eine Kopplungsstärke ausgewählt wurde, wird dort ein Hinweis in roter Schrift angegeben, wie in Abbildung 5.5 zu sehen.

Am unteren Fensterrand befinden sich sechs Radiobuttons mit den Beschriftungen der möglichen Korrelationsstärken des Versuchs. Dort wählen die Versuchspersonen ihre Übereinstimmungs-Abschätzung aus. Standardmäßig sind alle sechs Radiobuttons weiß. Ist einer der Buttons ausgewählt, ändert sich seine Farbe in rot, wie in Abbildung 5.4 zu sehen.

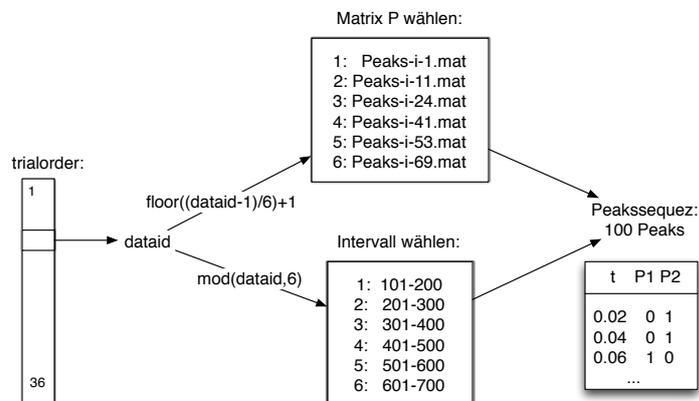
Für die visuellen Bedingungen ist in der Mitte des Fensters eine Region für die Visualisierungen reserviert (siehe Abbildung 5.4, die Methode wird in Abschnitt 5.4.2 beschrieben). In den auditiven Bedingungen werden in dieser Region stattdessen zwei weitere Buttons angezeigt („play“ und „stop“) mit der die Sonifikation



**Abbildung 5.4.:** Elemente der GUI. Übungsmodul zur Visualisierung während der ersten Übung. Hier wurde bereits der Radiobutton mit der Aufschrift 80% ausgewählt, der dadurch rot hervorgehoben wird.



**Abbildung 5.5.:** Elemente der GUI. Sonifikationsmodul während der ersten Sonifikation. In roter Schrift wird oben im Hinweisfeld darauf aufmerksam gemacht, dass zunächst einer der Radiobuttons ausgewählt werden muss, bevor auf „weiter“ geklickt wird.



**Abbildung 5.6.:** Eindeutige Zuordnung der `dataid` zu einer Peaksequenz bestimmter Kopplungsstärke.

vorzeitig beendet oder nochmals abgespielt werden kann. Die Methode zur Sonifikation wird in Abschnitt 5.4.3 beschrieben.

### 5.3.2. Die Abfolge der Durchgänge

Die zugrunde liegenden Daten für die beiden Bedingungen Sonifikation und Visualisierung werden über die Variable `dataid` eindeutig einer Menge an Peaks zugeordnet. Für dieses Experiment werden insgesamt 36 verschiedene Durchgänge pro Bedingung präsentiert. Jeder dieser Durchgänge verwendet eine Sequenz von 100 Peaks, verteilt auf beide Zeitserien. Diese Peaksequenz entspricht einem bestimmten Intervall innerhalb einer der zuvor erstellten Peak-Dateien (vgl. Abschnitt 4.2). Diese Zuordnung ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

Für das Experiment werden die Durchgänge von Versuchsperson zu Versuchsperson variiert. Da vermutlich ein Lerneffekt eintritt (Hypothese zwei), sodass die ersten Durchgänge pro Bedingung eine andere Fehlerhäufigkeit haben als die anderen wird der Ablauf der Durchgänge in drei Phasen von jeweils zwölf Durchgängen eingeteilt, in denen jede der sechs Korrelationsbedingungen zweimal vorkommt. Dabei soll sowohl die Verteilung der Peak-Intervalle auf die Phasen als auch die Abfolge der Korrelationsbedingungen innerhalb der Phasen randomisiert werden. Außerdem soll die Anzahl der Durchgänge pro Bedingung im Intervall 1-36 vom Versuchsleiter frei wählbar bleiben, die Versuchspersonen aber trotzdem zufällig

ausgewählte Korrelationsbedingungen erhalten.

Diese Anforderungen werden von der Methode `getAlphaTrialOrder` der Klasse `MODELEXPERIMENT` erfüllt. Zunächst werden die Identifikationsnummern in Gruppen nach der Korrelationsstärke eingeteilt (Identifikationsnummer 1-6 entspricht 0% Korrelation, Nummer 7-12 für 20% Korrelation usw.). Innerhalb der Gruppen werden die Nummern gemischt und danach auf die drei Phasen verteilt. Immer die ersten beiden Elemente jeder Gruppe (für jede Korrelationsstärke) werden für Phase eins benutzt, die beiden Elemente drei und vier für Phase zwei und die letzten beiden Elemente für Phase drei. Schließlich wird noch einmal innerhalb jeder Phase gemischt (damit die Durchgänge nicht in der Reihenfolge der Korrelationsbedingungen vorkommen) und die drei Phasen aneinandergehängt als Vektor `alphatrialorder` zurückgegeben. In der Versuchssteuerung muss nun nur noch die richtige Anzahl an Durchgängen (bei  $n$  Durchgängen die ersten  $n$  Elemente der Liste) verwendet werden.

## 5.4. Displays

Im Experiment sollen die Peaksequenzen auf zwei verschiedenen Displays dargestellt werden. Die Steuerung der Visualisierung findet in der

### 5.4.1. Steuerung der Durchgänge für eine der Display-Bedingungen

Jede der Control-Display-Klassen implementiert die Methode `action()` auf dem Button, der mit „weiter“ beschriftet ist. Wenn eine Versuchsperson die Schaltfläche drückt, wird zunächst überprüft, ob einer der Radiobuttons ausgewählt ist. Falls nicht, wird der Hinweis angezeigt, dass man zuerst einen Übereinstimmungswert aussuchen soll, bevor man mit dem nächsten Durchgang beginnt. Ist einer der Radiobuttons ausgewählt, wird entweder das Fenster geschlossen und das Modul beendet (falls der letzte Durchgang erreicht ist) oder der nächste Durchgang aus der Liste `trialorder` ausgewählt. Dabei wird eine neue Zeile in die Status-Liste geschrieben, die Status-Variable zurückgesetzt, der nächste Datensatz geladen und visualisiert beziehungsweise sonifiziert. Zuletzt werden noch einige GUI-Elemente zurückgesetzt, wie zum Beispiel die Auswahl der Radiobuttons aufgehoben.

### 5.4.2. Modul zur Steuerung der Visualisierung

Das Modul zur Steuerung der Visualisierungs-Experimente erzeugt eine Reihenfolge der Durchgänge (`trialorder`, vgl. Abschnitt 5.3.2), die eine randomisierte Liste

der Identifikationsnummern ist. Aus dieser Liste werden die ersten  $n$  Elemente für die Reihenfolge der Durchgänge verwendet, wobei  $n$  die Anzahl der Durchgänge ist. Daraufhin werden die Status-Variablen `expnr`, `rbuttonvalue`, `condition`, `dataid` gesetzt und das Objekt `view` vom Typ `VIEWVIS` erzeugt. Dadurch wird ein Fenster geöffnet und die Statuszeilen und Buttons hinzugefügt.

In die Variable `dataset` wird das nächste Intervall an Peaks geladen mit Hilfe der Methode `getNextDataset(dataid, #peaks, #trials)` und die Visualisierung erstellt, indem die Methode `replot(dataset)` auf dem Objekt `view` aufgerufen wird. Außerdem wird die Action-Methode der Schaltfläche „weiter“ gesetzt (vgl. 5.4.1).

**Die Methode `replot(dataset)`** Das Herzstück der Visualisierung ist die Methode `replot` der Klasse `VIEWVIS`. Sie bekommt als Argument eine Liste von Peaks (`dataset`) übergeben. Zunächst erzeugt sie ein weißes Rechteck als Visualisierungshintergrund (`plotregion`) und ruft die Methode `corrVis2` auf. Diese zeichnet auf dem weißen Rechteck eine horizontale Linie, die als Trennlinie zwischen den beiden Zeitserien dient. Die Zeitstempel der Daten aus der Tabelle `dataset` werden auf die Länge der Trennlinie gestreckt bzw. gestaucht und als x-Wert der Visualisierung verwendet. Jeder Peak in der ersten Zeitserie (jede eins in der zweiten Spalte in Matrix P (vgl. Tabelle 4.1)) wird oberhalb der Trennlinie als gelbe Rechtecke und jeder Peak in der zweiten Zeitserie (dritte Spalte in Matrix.....) unterhalb der Trennlinie als schmale blaue Rechtecke dargestellt.

### 5.4.3. Modul zur Steuerung der Sonifikation

Das Modul zur Steuerung der Sonifikation geht zunächst vor wie das Modul zur Steuerung der Visualisierung. Statt dem Aufruf der Methode `replot` wird die GUI um zwei Schaltflächen erweitert, die mit „play“ und „stop“ beschriftet sind. Über diese beiden Schaltflächen kann die Versuchsperson die Sonifikation wiederholt anhalten und abspielen. Die Sonifikation wird über den Aufruf der Methode `corrSon` erzeugt.

**Die Methode `corrSon`** Das Herzstück der Sonifikation ist die Methode `corrSon` der Klasse `MODELEXPERIMENT`, deren Ausgangsversion von Thomas Hermann geschrieben wurde. Sie bekommt als Argumente eine Liste von Peaks (`dataset`) und die Dauer der Sonifikation (`duration` – in dem für diese Arbeit durchgeführten Experiment 20 Sekunden) übergeben. Die Zeitstempel der Daten aus der Tabelle `dataset` werden auf die Länge der Sonifikation (`duration`) gestreckt bzw. gestaucht und die Lautstärke (`amp`) festgelegt. Jeder Peak in der ersten Zeitserie

(jede eins in der zweiten Spalte der Matrix P (vgl. Tabelle 4.1)) wird als hoher Klang auf das linke Ohr und jeder Peak in der zweiten Zeitserie (dritte Spalte in der Matrix) als tiefer Klang auf das rechte Ohr gelegt. Die Zeilen der Matrix werden so als Liste von `events` an die Klasse `Score` übergeben und abgespielt. Dabei wird die vorher vom `SERVER` geladene `SYNTHDEF N1` verwendet, die einen Bongo-Sound abspielt.

## 5.5. Protokoll des Versuchs

Die Überwachung des Versuchs wird über das `status`-Objekt der Klasse `STATUS` gesteuert. Dazu wird in der Hauptklasse (`EXPERIMENT`) das `status`-Objekt erzeugt, dem unter anderem der vollständige Pfad (`fname`) für die am Ende des Experimentes zu speichernde Datei als Argument übergeben wird.

Für jede von der Versuchsperson gedrückte Schaltfläche wird ein Eintrag in die Matrix eingefügt. Jeder Eintrag besteht aus sechs Werten:

1. `condition`: gibt die Bedingung an, mit der die Versuchsperson gerade arbeitet: -1 bezeichnet die Sonifikations-Übungen, -2 steht für das Sonifikations-Experiment, 1 steht für die Übung zum Visualisierungs-Experiment und 2 für das Visualisierungs-Experiment. Der Wert 0 wird gesetzt, wenn die Versuchsperson eines der Einführungsmodule benutzt.
2. `time`: der Zeitstempel enthält die seit Programmbeginn abgelaufene Zeit in Sekunden.
3. `expnr`: die laufende Nummer des Durchgangs pro Block (Wert von 1-36)
4. `isfinalstate`: nimmt die Werte null und eins an. Entscheidet sich die Versuchsperson mehrmals um, wird für jeden Klick auf einen der Radiobuttons ein Eintrag in die Status-Matrix eingefügt. Klickt die Versuchsperson danach auf die Schaltfläche „weiter“, wird ein zusätzlicher Eintrag mit dem Endzustand der Radiobuttons gemacht.
5. `dataid`: die Identifikationsnummer für das Intervall von Peaks (vgl. Abbildung 5.6)
6. `rbuttonvalue`: die Identifikationsnummer für den ausgewählten Radiobutton (Werte von 1-6)

Die Werte der oben genannten Variablen werden aus den Control- und View-Klassen gesetzt. Für jeden neuen Eintrag in der Status-Matrix muss die Status-Methode `nextLine` aufgerufen werden, die die Inhalte der Variablen als neue Zeile zur Tabelle hinzufügt. Mit der Methode `saveToFile`, die aus der Hauptklasse `MODELEXPERIMENT` aufgerufen wird, wird die Status-Matrix in eine Datei gespeichert. Die Datei wird hierbei als Supercollider-Quelltext unter dem anfangs mit der Variablen `fname` festgelegten vollständigen Pfad gespeichert.

## 5.6. Kommunikation mit Octave über die Schnittstellenklasse *OctaveSC*

Die Pipe-basierte Kommunikation von SuperCollider und Octave geschieht über die Klasse `OCTAVESC`, die von Thomas Hermann implementiert wurde. Informationen findet man in der zugehörigen Hilfe-Datei `OctaveSC.help.rtf`, die auf der beiliegenden CD zu finden ist.

Um die Kommunikation mit Octave zu ermöglichen wird in der Klasse `MODELEXPERIMENT` eine Instanz der Klasse `OCTAVESC` erzeugt, auf dem dann die Methoden `value()` und `at()` aufgerufen werden können. So können die Octave-Skripte `increaseVpId` und `setDataset` in Octave aufgerufen werden und anschließend die Ergebnisse in SuperCollider importiert werden.

## 5.7. Nutzen der Software für weitere Experimente

Im Folgenden werden weitere Einsatzmöglichkeiten der Software für generelle Experimente besprochen und anschließend notwendige Parameter-Anpassungen für naheliegende Anwendungsfälle aufgezeigt.

### 5.7.1. Generalisierbarkeit

Die erstellte Software stellt die Möglichkeiten für einen standardisierten Experimentablauf zur Verfügung. Zu Beginn können die Versuchspersonen begrüßt werden und allgemeine Einführungen zum Hintergrund des Experiments gegeben werden. Darauf folgt eine genaue Einführung in die zu bearbeitende Aufgabe, ebenfalls in schriftlicher, vom Programm gesteuerter Form. Die Software stellt Möglichkeiten zur Verfügung, mit denen Vorübungen vor dem tatsächlichen Versuchsbeginn durchgeführt werden können. Weiterhin existiert eine Methode, mit der eine Randomisierung der Durchgänge erreicht wird. Dabei können die Durchgänge in Pha-

sen eingeteilt werden, wie in dem vorliegenden Versuch geschehen. Auch die Einteilung des Experimentes in verschiedene Blocks wird unterstützt.

Das Nutzerverhalten wird automatisch vom oben beschriebenen Programmpaket registriert und abgespeichert. So werden sämtliche Button-Klicks erfasst und zusätzlich ein Zeitstempel protokolliert. Dies ermöglicht eine Fehlererfassung und Aussagen über die Reaktionszeit der Versuchspersonen. Die Zeitstempel wurden aus Gründen der Wiederverwertbarkeit der Software in nachfolgenden Versuchen zusätzlich implementiert, obwohl sie im für diese Arbeit durchgeführten Experiment nicht ausgewertet werden.

Das Experiment besteht aus einer Abfolge von Modulen, die beliebig durch weitere Module erweitert werden kann und unterstützt multimodale Versuchsaufbauten, indem sowohl das visuelle Display mit Hilfe von Visualisierungen als auch das auditive Display mit Hilfe von Sonifikationen getestet werden können.

### 5.7.2. Anwendungsfälle

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, welche Änderungen an den Parametern für eine Wiederholung des Experimentes unter ähnlichen Bedingungen (die naheliegenden Anwendungsfälle) nötig sind.

**Anzahl der Durchgänge:** Die Anzahl der Durchgänge pro Bedingung wird dem Objekt `control` als Argument übergeben, kann also beim Aufruf der Hauptklasse individuell eingestellt werden.

**Anzahl der Module:** Neue Module können nach Belieben in die Control-Klasse eingebaut werden, indem sie in der Liste `schedule` in der Klasse `EXPERIMENT` eingetragen werden. Dadurch werden sie automatisch in den Versuchsablauf integriert. Auch kann die Reihenfolge der Module dort geändert werden.

**Dauer der Sonifikation:** Die Dauer der Sonifikation ist durch die Klassenvariable `duration` auf 20 Sekunden voreingestellt. Sie kann in der Klasse `CONTROLINTRO` global für den ganzen Versuch verändert werden.

**Dauer der Visualisierung:** Die Betrachtungsdauer der Visualisierung ist im Augenblick unbegrenzt.

**Menge der Peaks pro Durchgang:** Die Anzahl der Peaks pro Durchgang ist durch die Klassenvariable `npeaks` auf 100 voreingestellt. Sie kann jederzeit in der Klasse `CONTROLINTRO` geändert werden. Man sollte dabei nur gerade Zahlen verwenden, denn die 100 Peaks sind auf beide Zeitserien verteilt. Eine ungerade Zahl würde subjektiv zu einer geringeren Kopplungsstärke führen.

**Größe und Position des Fensters für die Versuche:** Die Klassenvariablen `wwidth` und `wheight` der Klasse `CONTROLINTRO` steuern die Größe des Fensters. Die Position des Fensters wird durch die Variablen `wxpos` und `wypos` in den Klassen `VIEWINTRO` und `VIEWEXPERIMENT` festgelegt. Sie kann von außen (entweder aus der Klasse `EXPERIMENT` oder aus der Startup-Datei (`file://~/scwork/startup.rtf`) gesetzt werden (Beispiel: `ViewIntro.wxplace = 68;`).



## 6. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 3.2 besprochenen Experimente vorgestellt und diskutiert. Dafür werden die in Kapitel 3.1.3 genannten Hypothesen der Experimente mit Hilfe von statistischen Verfahren überprüft. Die Resultate werden nach Hypothesen geordnet dargestellt. Aus der von den Versuchspersonen abgegebenen Einschätzung der Kopplungsstärke (*gewählte Kopplungsstärke*) wurden als abhängige Variablen die zwei Fehlermaße berechnet, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Diese beiden Fehlermaße (Distanzfehler und boolescher Fehler) werden für jede der Hypothesen getrennt behandelt. Zum Schluss werden die Ergebnisse noch explorativ untersucht.

### 6.1. Hypothese 1: Display-Art

Um zu überprüfen, ob die Erkennung und Unterscheidung der Korrelationsstufen den Versuchspersonen in der auditiven Bedingung leichter fällt als in der visuellen (Hypothese 1) wurden Mittelwertvergleiche zwischen der auditiven und der visuellen Bedingung für die jeweilige Gesamtfehlerzahl durchgeführt.

#### 6.1.1. Distanzfehler

Für den Distanzfehler ergab sich für das visuelle Display ein Mittelwert von  $E_d = 0.412 \pm 0.039$  Fehlern<sup>1</sup>. Für das auditive Display betrug die mittlere Fehleranzahl  $E_d = 0.63 \pm 0.303$ . Der Vergleich der Mittelwerte für den Distanzfehler  $E_d$  ergab einen signifikanten Mittelwertsunterschied [ $T(17) = 2.662$ ;  $p = 0.016$ ]<sup>2</sup>. Allerdings wurden – anders als vorhergesagt – in der visuellen Bedingung *weniger* Fehler gemacht als in der auditiven.

---

<sup>1</sup>Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung

<sup>2</sup>Konvention für T-Test-Ergebnisse: [ $T(\langle\text{Freiheitsgerade}\rangle) = \langle\text{Prüfgröße}\rangle$ ;  $p = \langle\text{Signifikanzwert}\rangle$ ]

### 6.1.2. Boolescher Fehler

Für den booleschen Fehler sieht der Vergleich der Stichprobenmittelwerte ähnlich aus. Hier machten die Versuchspersonen im visuellen Teil im Durchschnitt  $E_b = 0.341 \pm 0.083$  Fehler. Im auditiven Teil des Experimentes wurden dagegen durchschnittlich  $E_b = 0.435 \pm 0.132$  falsche Antworten gegeben. Auch hier ist die Fehleranzahl in der visuellen Bedingung im Mittel signifikant geringer als in der auditiven Bedingung:  $[T(17) = 2.699; p = 0.015]$ .

Überraschenderweise wurden also sowohl für den Distanzfehler, als auch für den booleschen Fehler in der visuellen Bedingung signifikant weniger Fehler gemacht als in der auditiven Bedingung. Das bedeutet, dass die erste Hypothese falsifiziert wurde.

### 6.1.3. Diskussion

Datenanalyse geschieht in unserer Umwelt meist mit Hilfe visueller Displays. Es liegt nahe, zu vermuten, dass Menschen im Gebrauch von auditiven Displays für die Datenanalyse wesentlich ungeübter sind. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Versuchspersonen in der auditiven Bedingung mehr Fehler gemacht haben als in der visuellen Bedingung. In diesem Fall müsste man durch Training der Versuchspersonen eine Verbesserung der Ergebnisse (mit Übung weniger Fehler in der auditiven Bedingung als ohne Übung) erzielen können. Die Frage, ob es einen Lerneffekt gibt oder nicht, wird im Zusammenhang mit der zweiten Hypothese geklärt (Kapitel 6.2).

Die Aufgabe, Korrelationen zwischen zwei Zeitserien zu erkennen und einzuschätzen, war für alle Versuchspersonen neu. Man könnte aber vermuten, dass diese ungewohnte Aufgabe einen zusätzlichen Effekt auf die Performanz der Versuchspersonen in der auditiven Bedingung hat, weil sowohl die Aufgabe neu ist als auch die Display-Art ungeübt ist. Für den Fall, dass die Versuchspersonen zuerst die auditive Bedingung bearbeiten, müssen sie eine für sie unbekannte Aufgabe mit einem ungewohnten Display lösen. Im zweiten Teil des Experimentes bearbeiten sie danach die visuelle Bedingung, also das für die Datenanalyse gewohnte Display mit einer jetzt schon aus der auditiven Bedingung bekannten Aufgabe. Für den Fall, dass die Versuchspersonen jedoch zunächst die visuelle Bedingung bearbeiten, müssen sie eine für sie unbekannte Aufgabe mit Hilfe des für sie bekannten visuellen Displays lösen. Erst danach, wenn sie sich mit der Aufgabe vertraut gemacht haben, bearbeiten sie im zweiten Teil des Experimentes die auditive Bedingung mit der nun schon bekannten Aufgabe. Die Versuchspersonen, die die auditive Be-

dingung zuerst bearbeiten, müssen also für die auditive Bedingung eine doppelt schwere Aufgabe lösen.

#### **6.1.3.1. Post-Hoc-Hypothese**

Dies führt zu der Hypothese, dass diejenigen Versuchspersonen, die die visuelle Bedingung zuerst bearbeitet haben, in der auditiven Bedingung weniger Fehler machen als diejenigen Versuchspersonen, die die auditive Bedingung zuerst bearbeitet haben.

Der Post-Hoc-Test wurde ebenfalls für beide Fehler-Arten durchgeführt. Für den Distanzfehler erhält man für die Versuchspersonen, die die auditive Bedingung zuerst bearbeitet haben den Mittelwert von  $E_d = 0.759 \pm 0.312$ . Einen Mittelwert von  $E_d = 0.5 \pm 0.243$  Fehlern haben hingegen die Versuchspersonen, die die visuelle Bedingung zuerst bearbeitet haben. Der T-Test ergibt eine Tendenz [ $T(16) = 1.965$ ;  $p = 0.067$ ] aber keine Signifikanz.

Für den booleschen Fehler haben die Versuchspersonen, die die auditive Bedingung zuerst bearbeitet haben einen Mittelwert von  $E_b = 0.491 \pm 0.12$  Fehlern, die Versuchspersonen, die die visuelle Bedingung zuerst bearbeitet haben jedoch den Mittelwert von  $E_b = 0.38 \pm 0.126$  Fehlern. Auch hier ergibt der T-Test keine Signifikanz sondern nur eine Tendenz [ $T(16) = 1.915$ ;  $p = 0.073$ ].

Die Post-Hoc-Hypothese kann also nur tendenziell bestätigt werden. Dass das Ergebnis nicht signifikant ist, beziehungsweise die Hypothese auch nicht deutlich widerlegt werden kann, ist vermutlich auf die geringe Anzahl von neun Versuchspersonen pro Gruppe (visuelle Bedingung zuerst – auditive Bedingung zuerst) zurückzuführen. Diese ist deshalb so gering, weil die zuerst bearbeitete Bedingung ursprünglich nicht als Untersuchungsparameter eingeplant wurde, sondern erst für den Post-Hoc-Test betrachtet wurde.

Die o.g. Post-Hoc-Hypothese sollte also in einem neuen Experiment weiter untersucht werden. Falls die im Test gemessene Tendenz auf einen (schwachen) Effekt zurückzuführen ist, sollte der Test für mehr Versuchspersonen pro Gruppe signifikant werden. Falls die Tendenz jedoch auf keinen Effekt zurückzuführen ist, sondern nur zufällig entstanden ist, sollte der Test für mehr Versuchspersonen deutlicher nicht-signifikant werden. In einer Replikation (Wiederholung des Versuchs unter sehr ähnlichen Bedingungen) zu diesem Experiment sollte auch die standardisierte Aufgabenstellung überarbeitet werden, um den Einfluss der unbekannteren Aufgabe weiter zu verringern. Eine mögliche Idee wäre zum Beispiel, alle Versuchspersonen die Aufgabenstellung (Erkennung von Korrelationen in Zeitserien) zunächst visuell üben zu lassen und erst im Anschluss daran zum ungewohnten auditiven Display

zu wechseln. Dies ist natürlich nur sinnvoll, wenn das auditive Display nicht mit dem visuellen Display verglichen werden soll.

## 6.2. Hypothese 2: Lerneffekt

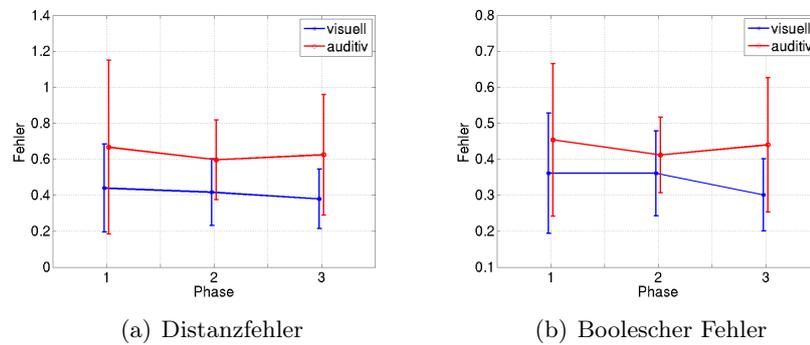
Die zweite Hypothese besagt, dass die Versuchspersonen im Laufe der Zeit (von Phase eins bis Phase drei) weniger Fehler machen (vor allem in der auditiven Bedingung). Dies wurde durch multivariate Varianzanalyse (MANOVA) überprüft.

### 6.2.1. Distanzfehler

Die Stichprobenmittelwerte und deren Standardabweichung für die Fehlerhäufigkeit für den Distanzfehler sind in der folgenden Tabelle angegeben. Zur Verdeutlichung sind die Mittelwerte für den Distanzfehler in Abbildung 6.1(a) aufgetragen. Die zugehörigen Standardabweichungen sind als Fehlerbalken angegeben. Um die Fehlerbalken besser erkennen zu können, wurde die rote Kurve (auditive Bedingung) jeweils minimal nach rechts und die blaue Kurve (visuelle Bedingung) minimal nach links verschoben. Beiden ist aber dennoch der selbe Wert auf der X-Achse zugeordnet. Zur Verdeutlichung der „Verläufe“ wurden die Stichprobenmittelwerte außerdem verbunden.

Display	Phase	Distanzfehler	
		Mittelwert	Standardabweichung
visuell	1	0.440	0.244
	2	0.417	0.185
	3	0.380	0.165
auditiv	1	0.667	0.483
	2	0.597	0.222
	3	0.625	0.335

Die Varianzanalyse für die mittlere Fehleranzahl des Distanzfehlers ergab, wie schon in Hypothese 1 betrachtet, einen signifikanten Haupteffekt der Display-Art [ $F(17) = 7.08$ ;  $p = 0.16$ ]. Es ergab sich jedoch kein signifikanter Haupteffekt für die Phase. Anders als vorhergesagt wurde auch die Interaktion zwischen der Bedingung und der Phase des Experiments nicht signifikant.



**Abbildung 6.1.:** Stichprobenmittelwerte und Standardabweichungen (Erklärung siehe Abschnitt „Hypothese 2: Distanzfehler“)

### 6.2.2. Boolescher Fehler

Die Stichprobenmittelwerte und die zugehörige Standardabweichung für den booleschen Fehler sind in der folgenden Tabelle angegeben. Zur Verdeutlichung sind die Werte zusätzlich in Abbildung 6.1(b) grafisch dargestellt. Die zugehörigen Standardabweichungen sind als Fehlerbalken eingetragen.

Display	Phase	boolescher Fehler	
		Mittelwert	Standardabweichung
visuell	1	0.361	0.167
	2	0.361	0.118
	3	0.301	0.100
auditiv	1	0.454	0.212
	2	0.412	0.105
	3	0.440	0.187

Die Varianzanalyse für die mittlere Fehleranzahl des booleschen Fehlers ergab, wie schon in Hypothese 1 betrachtet, einen signifikanten Haupteffekt der Display-Art [ $F(17) = 7.29$ ;  $p = 0.15$ ]. Allerdings ergab die Varianzanalyse auch für den booleschen Fehler weder einen signifikanten Haupteffekt für die Phase noch einen Interaktionseffekt zwischen der Bedingung und der Phase.

Zusammenfassend wurde die zweite Hypothese falsifiziert, denn es ist keine signifikante Verringerung der Fehler im Verlauf der Versuchs-Phasen der auditiven Bedingung erkennbar. Somit gibt es keine Lerneffekte in diesem Versuch.

### 6.2.3. Diskussion

Eine mögliche Hypothese, warum der erwartete Lerneffekt in der auditiven Bedingung nicht auftrat ist, dass die Versuchspersonen im Laufe der auditiven Bedingung ermüden (die Konzentration nachlässt). Diese Vermutung wird durch die Tatsache unterstützt, dass drei der 18 Versuchspersonen im persönlichen Gespräch nach der Beendigung des Versuches vorschlugen, in weiteren Experimenten die Eventfrequenz der Sonifikation zu erhöhen und somit die Länge der einzelnen Hörbeispiele zu verkürzen. Die lange Dauer und die langsame Abfolge der Events trage stark zur Ermüdung bei. Diese (vermuteten) Ermüdungseffekte könnten sich negativ auf die Fehleranzahl ausgewirkt und eventuelle Lerneffekte ausgeglichen haben.

Eine weitere Vermutung wäre, dass die für die Versuchspersonen unbekannte Aufgabe (Korrelationen zu erkennen) in Verbindung mit der ebenfalls neuen Aufgabe (Datenanalyse mit Hilfe des auditiven Displays zu betreiben) dazu führt, dass die vermuteten Lerneffekte gar nicht innerhalb von 36 Durchgängen zu beobachten sind. Möglicherweise muss man wesentlich längere Lernzeiten einplanen und die Versuchspersonen zum Beispiel mehrmals an unterschiedlichen Tagen zum Experiment bestellen und das Lernverhalten über diese längere Zeit betrachten.

## 6.3. Hypothese 3: Interaktion (Kopplungsstärke)

Die Hypothese, dass es zwischen den Variablen Korrelationsstärke und Display-Art eine Interaktion gibt, wurde durch multivariate Varianzanalyse geprüft. Auch hier wurde der Test wieder für beide Fehlerarten berechnet. Die Ergebnisse werden wieder für beide Fehlerarten getrennt betrachtet.

### 6.3.1. Distanzfehler

Für den Distanzfehler sind die Stichprobenmittelwerte und zugehörigen Standardabweichungen in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Eine grafische Darstellung dieser Werte findet sich in Abbildung 6.2(a). Ebenso, wie in Abbildung 6.1(a) sind die zugehörigen Standardabweichungen als Fehlerbalken angegeben. Um die Fehlerbalken besser erkennen zu können, wurde auch hier die rote Kurve (auditive Bedingung) jeweils minimal nach rechts und die blaue Kurve (visuelle Bedingung)

minimal nach links verschoben. Beiden ist aber dennoch der selbe Wert auf der X-Achse zugeordnet. Zur Verdeutlichung der „Verläufe“ wurden die Stichprobenmittelwerte außerdem verbunden.

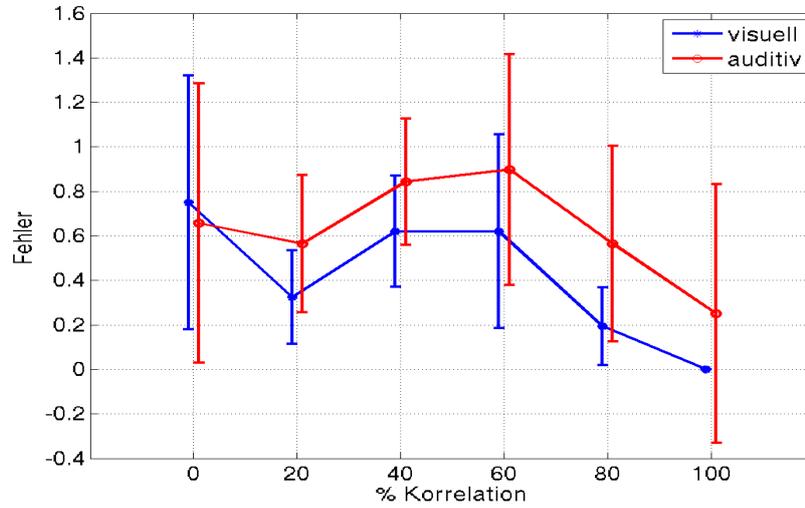
Display	Korrelationsstärke	Distanzfehler	
		Mittelwert	Standardabweichung
visuell	0%	0.75	0.57
	20%	0.324	0.21
	40%	0.62	0.25
	60%	0.62	0.436
	80%	0.194	0.174
	100%	0	0
auditiv	0%	0.657	0.627
	20%	0.565	0.309
	40%	0.843	0.283
	60%	0.898	0.518
	80%	0.565	0.44
	100%	0.25	0.581

Für den Distanzfehler ergeben sich zwei Haupteffekte. Einerseits für die Display-Art [ $F(1,17) = 7.08$ ;  $p = 0.16$ ], wie schon für die erste Hypothese nachgewiesen. Zusätzlich hat auch die Kopplungsstärke einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Fehleranzahl [ $F(5,85) = 15.74$ ;  $p < 0.001$ ]. Für den Distanzfehler ergibt sich jedoch keine signifikante Interaktion.

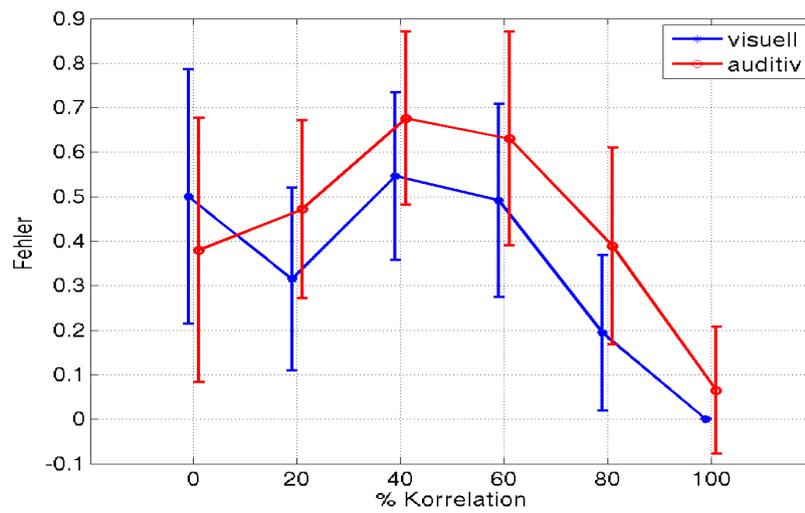
### 6.3.2. Boolescher Fehler

Für den booleschen Fehler sind die Stichprobenmittelwerte und Standardabweichungen in der folgenden Tabelle angegeben. Die grafische Darstellung der Werte ist in Abbildung 6.2(b) zu finden.

Hier findet man ebenfalls den schon für Hypothese 1 nachgewiesenen Haupteffekt für die Display-Art [ $F(1,17) = 7.29$ ;  $p = 0.015$ ] und einen Haupteffekt in der Kopplungsstärke [ $F(5,85) = 41.96$ ;  $p < 0.001$ ]. Zusätzlich gibt es eine signifikante Interaktion der beiden unabhängigen Variablen Kopplungsstärke und Display-Art [ $F(5,85) = 3.12$ ;  $p = 0.012$ ].



(a) Distanzfehler



(b) Boolescher Fehler

**Abbildung 6.2.:** Stichprobenmittelwerte und Standardabweichungen. Hinweise zu diesen Abbildungen siehe Abschnitt „Hypothese 3: Distanzfehler“.

Display	Korrelationsstärke	boolescher Fehler	
		Mittelwert	Standardabweichung
visuell	0%	0.5	0.286
	20%	0.315	0.205
	40%	0.546	0.188
	60%	0.491	0.217
	80%	0.194	0.174
	100%	0	0
auditiv	0%	0.380	0.297
	20%	0.472	0.2
	40%	0.676	0.194
	60%	0.630	0.240
	80%	0.389	0.221
	100%	0.065	0.142

---

### 6.3.3. Diskussion

Die Kopplungsstärke hat also einen signifikanten Effekt auf die mittlere Fehleranzahl (Haupteffekt). Diesen Effekt kann man in den Abbildungen 6.2(a) und 6.2(b) gut erkennen. Die Versuchspersonen machen (bezogen auf beide Fehlermaße) für beide Display-Arten bei Peaksequenzen, die 100% korreliert sind, im Mittel die wenigsten Fehler. Ebenfalls scheint die 20%-Bedingung und die 80%-Bedingung für beide Display-Arten etwas leichter zu sein, als die 40%- und 60%-Bedingung. Der Vergleich der 0%-Bedingung mit den anderen Kopplungsstärken wird im Zusammenhang mit der Interaktion diskutiert. Die Aufgabe ist also für die präsentierten Korrelationsstärken unterschiedlich schwer.

Leider ist in den beiden Abbildungen die Richtung der Abweichung (tatsächliche Kopplungsstärke unter- oder überschätzt) nicht erkennbar. Daher werden im folgenden Abschnitt (Abschnitt 6.4) die einzelnen Durchgänge aller Versuchspersonen mit Hilfe von zwei weiteren Arten von Grafiken untersucht: Streudiagramme (Scatterplots), in denen die einzelnen Durchgänge aller Versuchspersonen betrachtet werden können und ein zusammenfassendes Tendenzdiagramm.

Für den booleschen Fehler gibt es eine signifikante Interaktion zwischen der Korrelationsstärke und der Display-Art. Dies bedeutet, dass die dritte Hypothese für den booleschen Fehler verifiziert ist. Betrachtet man Abbildung 6.2(b), so scheint der Interaktionseffekt hauptsächlich darauf zurückzuführen zu sein, dass für 0%

in der auditiven Bedingung weniger Fehler gemacht werden als in der visuellen Bedingung, für 20%-100% Korrelation jedoch in der visuellen Bedingung weniger Fehler gemacht werden. Dies deckt sich mit der in Kapitel 3.1.2 geäußerten Hypothese, dass das Gehör dem Auge bei geringen Korrelationsstärken durch seine hohe zeitliche Auflösung überlegen sein könnte. Interessant wäre es, zu untersuchen, ob das Gehör dem Auge auch für Kopplungsstärken zwischen 0% und 20% überlegen ist.

## 6.4. Explorative Untersuchung

Im vorhergehenden Abschnitt wurde durch den Haupteffekt in der Varianzanalyse nachgewiesen, dass die Kopplungsstärke einen signifikanten Effekt auf die mittlere Fehleranzahl hat. Nun stellt sich die Frage, ob die tatsächliche Kopplungsstärke eher unter- oder überschätzt wird. Dafür erfolgt nun eine explorative Betrachtung der Ergebnisse mit Hilfe eines Diagramms zur Tendenz und danach die Betrachtung der einzelnen Wertepaare.

### 6.4.1. Abweichungs-Richtung

In Abbildung 6.3 ist die von den Versuchspersonen ausgewählte Kopplungsstärke gegen die tatsächliche Kopplungsstärke aufgetragen. Hier wurden alle abgegebenen Einschätzungen pro Kopplungsstärke addiert und der Mittelwert sowie die Standardabweichung dieser Werte bestimmt und für beide Display-Arten aufgetragen. Als Referenz wurde die Mitteldiagonale (schwarz) eingezeichnet. Die Mittelwerte dieser Grafik lassen nur Aussagen über die Tendenz der Abweichungsrichtung zu aber nicht über die tatsächliche Fehlergröße. Dies liegt daran, dass sich Über- und Unterschätzungen der tatsächlichen Korrelationsstärke gegenseitig aufheben. Die Stärke der Abweichung der Kurven von der Diagonalen sagt also etwas über die Stärke der Tendenz der Abweichungs-Richtung (Schätzrichtung) aus. Zu beachten ist bei der Interpretation, dass die beiden Kurven etwas nach rechts bzw. nach links verschoben wurden, um die Fehlerbalken beider Kurven unterscheiden zu können.

In dieser Abbildung fällt als erstes die Ähnlichkeit der beiden Kurven für die visuelle und die auditive Bedingung auf. Das bedeutet, dass die Korrelation für die meisten Kopplungsstärken in beiden Display-Arten in die gleiche Richtung über- bzw. unterschätzt werden. Man sieht hier, dass die Versuchspersonen die Kopplung für 0% eher überschätzen, für Kopplungsstärken von 40% bis 100% jedoch eher unterschätzen. Für 20% gibt es in beiden Display-Arten ähnlich viele Überschätzungen wie Unterschätzungen. Weiterhin kann man auch hier die leichte

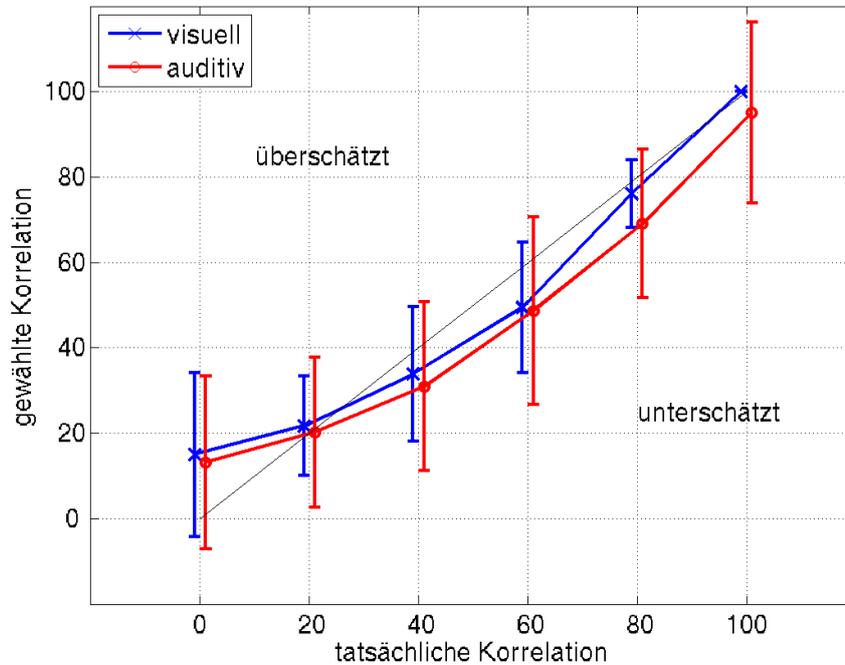
Interaktion zwischen der Korrelationsstärke und der Display-Art beobachten, denn für 0% ist die auditive Kurve näher an der Diagonalen, während für die anderen Korrelationsstärken die visuelle Kurve näher an der Diagonalen liegt.

#### 6.4.2. Betrachtung der einzelnen Wertepaare

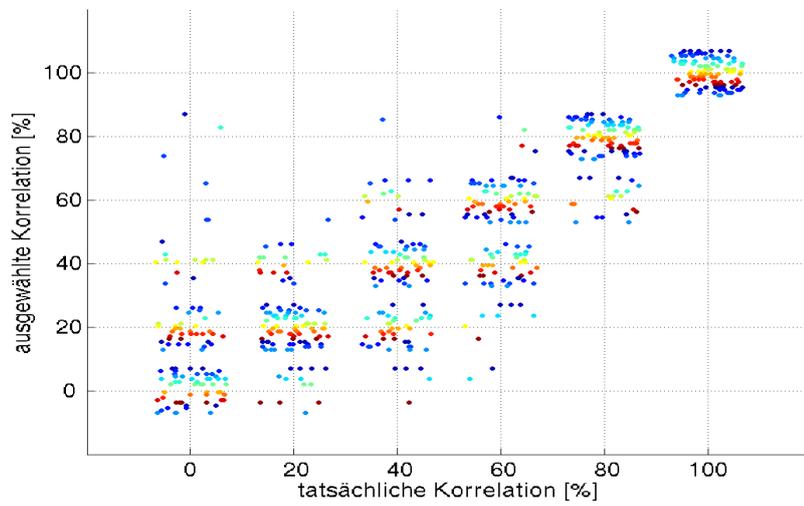
Als weitere Darstellungsart des Effektes der Kopplungsstärke werden zwei Streudiagramme (Scatterplots) erstellt. Mit diesen ist die Betrachtung von einzelnen Durchgängen möglich. Für die visuelle Bedingung ist das Streudiagramm in Abbildung 6.4(a), für die auditive Bedingung in Abbildung 6.4(b) abgebildet. Für diese Abbildungen wurden alle Wertepaare (tatsächliche Korrelation, gewählte Korrelation) aller Durchgänge aufgetragen. Jeder Versuchsperson wurde dabei eine Farbe und ein y-jitter-Wert zwischen -7% und 7% zugewiesen. Außerdem werden von den x-Werten gleichverteilte Zufallszahlen im Intervall von  $[-7\%, 7\%]$  subtrahiert. Ein einzelnes Wertepaar wird also sowohl horizontal als auch vertikal „verwackelt“.

Betrachtet man zunächst das Streudiagramm für die visuellen Durchgänge (Abbildung 6.4(a)), so kann man die mittlere Diagonale, um die die Wertepaare streuen deutlich erkennen. Weiterhin fällt auf, dass die Stärke der Streuung mit zunehmender tatsächlicher Kopplungsstärke abnimmt. Das dritte auffällige Merkmal der Abbildung ist, dass für Kopplungswerte von 0% und 20% die Kopplungsstärke offensichtlich eher als stärker eingeschätzt wird, während für alle anderen Kopplungsstärken (40% bis 100%) die Kopplungsstärke von den Versuchspersonen eher unter- als überschätzt wird.

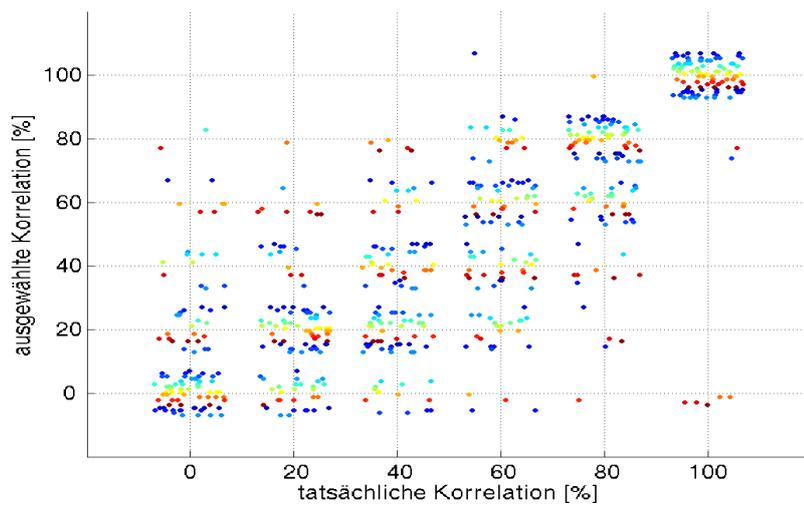
Für das Streudiagramm der auditiven Bedingung (Abbildung 6.4(b)) ist die mittlere Diagonale ebenfalls erkennbar. Auch hier nimmt die Stärke der Streuung für hohe Kopplungsstärken ab. Interessanterweise liegen auch in diesem Streudiagramm für Werte von 0% und 20% mehr Wertepaare oberhalb der Diagonalen als unterhalb, während für Werte von 40% bis 100% Kopplung mehr Wertepaare unterhalb der Diagonalen liegen als oberhalb. Daraus lässt sich auch für die auditive Bedingung schließen, dass die Versuchspersonen die Kopplungsstärke für geringe Werte offensichtlich eher überschätzen, während sie sie für Kopplungswerte ab 40% Kopplung eher unterschätzen. Allerdings muss man bedenken, dass nicht für alle Kopplungsstärken eine gleichstarke Abweichung vom tatsächlichen Wert möglich ist. Beispielsweise ist für 0% Korrelation keine Unterschätzung der Kopplungsstärke, sondern nur eine Überschätzung möglich. Aber auch wenn man 0% mit 100% Korrelation vergleicht, 20% mit 80% Korrelation und 40% mit 60% Korrelation, dann bleibt die Tendenz der Versuchspersonen, die tatsächliche Korrelation eher zu unter- als überschätzen.



**Abbildung 6.3.:** Tendenz der Abweichungs-Richtung. Für diese Grafik wurde die tatsächlich Kopplungsstärke gegen die ausgewählte Kopplungsstärke aufgetragen. Die Mittelwerte der visuellen Bedingung sind mit blauer Farbe und Kreisen (o), die der auditiven Bedingung mit roter Farbe und Kreuzen (x) eingetragen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Um die Fehlerbalken besser erkennen zu können, wurde die rote Kurve minimal nach rechts und die blaue Kurve minimal nach links verschoben. Außerdem wurden die Mittelwerte der Kurve verbunden, um die beiden Kurven visuell besser vergleichen zu können. Zu beachten ist dabei, dass die zugrunde liegenden Daten jedoch sechsstufig diskret sind. Als weiteren Anhaltspunkt wurde die Diagonale eingetragen (schwarz), die dem exakten Urteil (keine Abweichung) entspricht.



(a) visuelle Bedingung



(b) auditive Bedingung

**Abbildung 6.4.:** Streudiagramm der Durchgänge nach Display-Art. Zur Erstellung siehe Abschnitt „Betrachtung der einzelnen Wertepaare“.

Für 100% Kopplung der Hörbeispiele fallen fünf Werte von drei verschiedenen Versuchspersonen auf, die die Hörbeispiele für 0% Kopplung gehalten haben. Diese Ausreißer sind dadurch zu erklären, dass für den ungeübten Hörer in der Sonifikation bei exakt gleichzeitigen akustischen Events der Eindruck entstehen kann, nur eine Zeitserie auf einem Ohr zu hören. In der visuellen Bedingung kann dieser Effekt jedoch nicht auftreten, da immer beide Zeitserien gleichzeitig untereinander sichtbar sind. In der 100%-Bedingung hat beim visuellen Display keine Versuchsperson einen Fehler gemacht.

Im Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass die Streuung um die mittlere Diagonale in der auditiven Bedingung erheblich stärker ist als in der visuellen Bedingung, was durch die statistischen Analysen bestätigt wird (siehe z.B. die Fehlerbalken in den Abbildungen 6.2(a) und 6.2(b)). Ein weiterer Unterschied der beiden Abbildungen findet sich im Vergleich der 0%-Bedingungen. Für die visuelle Bedingung liegen wesentlich mehr Wertepaare bei 20% geschätzter Kopplung als für die auditive Bedingung. Andersherum liegen im Streudiagramm für die auditive Bedingung mehr Werte bei 0% Kopplung. Dies bestätigt die in der statistischen Analyse festgestellte bessere Performanz der auditiven Bedingung bezüglich der 0%-Bedingung gegenüber der visuellen Bedingung.

## 7. Fazit

In dieser Arbeit wurde die Verwendbarkeit von Sonifikationen zur Analyse von Korrelationen experimentell untersucht. Als Basis dafür wurde eine Software zur Steuerung von Versuchen entwickelt, die auch für weitere Experimente wiederverwendet werden kann. Bei der Implementation wurde besonders darauf geachtet, dass die Software

- einen standardisierten Ablauf von Experimenten unterstützt, indem die Einführung in die Aufgabe der Versuchspersonen von der Software durchgeführt wird und die Randomisierung der Durchgänge automatisch stattfindet,
- das Nutzerverhalten der Probanden (wie Buttonklicks und Bearbeitungsdauer) registriert und abspeichert und
- modular aufgebaut ist und damit die Einführung neuer Module oder Änderungen im Ablauf mit minimalem Aufwand ermöglicht.

Als Anwendung wurde eine Simulation kreuzkorrelierter Nervenzellen entwickelt. Die simulierten Daten wurden mit Hilfe der Software zur Versuchssteuerung sowohl auf dem auditiven Display als auch auf dem visuellen Display dargestellt. Die Erkennung der den Daten zugrunde liegenden Korrelationsstärken wurde in einem psychophysischen Experiment untersucht.

Im Experiment wurde festgestellt, dass die Visualisierung der Sonifikation in diesem Versuch überlegen ist (Hypothese 1). Berechnet man die Performanz der auditiven Bedingung (1 - mittlere Fehleranzahl) in Bezug zur Performanz der visuellen Bedingung, so stellt man fest, dass man mit der auditiven Bedingung 86% der Performanz der visuellen Bedingung erreicht. Dass die visuelle Bedingung besser abschneidet ist damit erklärbar, dass der Sehsinn beim Menschen der primäre Sinn zur Verarbeitung von Daten ist. Steht der Sehsinn zur Datenverarbeitung nicht zur Verfügung kann mit recht guten Ergebnissen auf den Hörsinn zurückgegriffen werden. Schon ungeübte Versuchspersonen erreichen im Gebrauch von auditiven Displays in diesem Experiment eine Performanz von 86% der Performanz des visuellen Displays. Dies deutet darauf hin, dass man das Gehör auf diesem Ergebnis aufbauend trainieren kann, um noch bessere Ergebnisse zu erzielen.

Zwar konnten im Experiment keine Lerneffekte für die auditive Bedingung nachgewiesen werden (Hypothese 2), dies wird aber damit erklärt, dass die Übungsphase zu kurz ist und die Versuchspersonen außerdem über die Dauer des Versuchs ermüden. Hier wäre es sinnvoll, Versuche anzuschließen, mit denen man das Lernverhalten für Sonifikationen über längere Zeit, zum Beispiel mehrere Wochen, untersucht.

Es konnte eine Interaktion zwischen der Kopplungsstärke und der Display-Art festgestellt werden (Hypothese 3). Diese wird darauf zurückgeführt, dass für die getesteten Korrelationsstärken 20% bis 100% die Visualisierungen den Sonifikationen überlegen sind, die auditive Bedingung jedoch für 0% Korrelation der visuellen Bedingung gegenüber im Vorteil ist.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung ist, dass die sechs getesteten Stufen der Variablen Kopplungsstärke unterschiedlich gut eingeschätzt werden. Besonders gut werden hohe Kopplungsstärken erkannt, geringe und mittlere Korrelationsstärken für beide Display-Modalitäten erheblich schlechter. Generell wird die Korrelationsstärke häufiger unter- als überschätzt.

In weiterführenden Untersuchungen sollte geklärt werden, ob der vermutete Lerneffekt für die Korrelationserkennung zwischen den beiden simulierten Zeitserien in Langzeitversuchen festgestellt werden kann. Man könnte die Versuchspersonen mehrmals an unterschiedlichen Tagen mit dem gleichen Versuch konfrontieren. Die Versuchssoftware muss hierfür nicht geändert werden. Auch die Frage, ob Sonifikationen für die Erkennung von besonders geringen Kopplungen (zwischen 0% und 20%) das geeignetere Display ist, trat im Zusammenhang mit dem Interaktionseffekt (Hypothese 3) auf. Hierfür könnte zum Beispiel der für diese Arbeit durchgeführte Versuch mit sechs Stufen der Variablen Korrelationsstärke im oben genannten Intervall wiederholt werden. Die dafür durchzuführenden Änderungen an der Software zur Versuchssteuerung, sind minimal. Weiterhin ist interessant, ob das Gehör bei der Erkennung der Korrelation von mehr als zwei Zeitserien dem visuellen System überlegen ist. Ab wie vielen Zeitserien gilt dies? Dafür müssten das Visualisierungsmodul und das Sonifikationsmodul auf die gleichzeitige Darstellung von mehr als zwei Zeitserien erweitert werden.

Durch diese Arbeit wurde ein besseres Verständnis der Korrelationserkennung durch den Menschen erreicht. Es wurden mehrere Fragestellungen aufgezeigt, mit denen dieses Verständnis noch weiter erforscht werden kann. Als Basis für die folgenden Untersuchungen kann die erstellte modulare Software verwendet werden.

# Anhang A.

## Installation und Benutzung der Software

Zur Benutzung des Versuchs-Programms benötigt man einen Apple Macintosh und folgende zusätzliche Programmpakete:

- SuperCollider (am besten „SuperCollider3\_bin\_20060121.tar.gz“)
- Octave
- X11

Als nächstes müssen in der Datei `$HOME/.profile` oder `$HOME/.bashrc` die Pfade (`$PATH`) und die Display-Variable gesetzt werden (`export DISPLAY=:0`). Nun fügt man in die Datei `$HOME/scwork/startup.rtf` die absoluten Pfade für Octave und das Verzeichnis ein, in dem man die Versuchs-Programme installieren möchte. Zum Beispiel:

```
OctaveSC.octavePath = "/usr/local/bin/octave";  
Experiment.workdir = "/homes/adierker/Versuch/";
```

Zur Installation muss das Installationsskript aufgerufen werden (siehe beiliegende CD)

### A.1. Benutzungshinweise

Zur Benutzung des Programms erzeugt man ein Objekt vom Typ `EXPERIMENT` zum Beispiel mit `exp = Experiment.new(36,<JMMTT-vpid>)`. Das erste Argument ist dabei die Anzahl der Durchgänge (`trials`) pro Bedingung und das zweite Argument ist der Name der Datei, in die die Ergebnisse (Inhalte der Status-Objekte wie die Reihenfolge der Durchgänge, Antworten der Versuchspersonen,

Zeitstempel etc.) gespeichert werden. Das Objekt `exp` steuert nun den nachfolgenden Versuchsablauf vollständig selbst.





# Literaturverzeichnis

Hilfsmittel für diese Diplomarbeit: L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, GNU Octave, vim, SuperCollider, Matlab, Omnigraffle und SPSS. Außer SPSS und Matlab wurden alle anderen Programme auf einem Apple Powerbook G4 benutzt.

- [Bai01] Gerold Baier. *Rhythmus – Tanz in Körper und Gehirn*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbeck, 2001.
- [BD03] Bortz and Döring. *Forschungsmethoden und Evaluation*. Springer, 3 edition, 2003.
- [BHLM05] Gerold Baier, Thomas Hermann, Oscar Manuel Lara, and Markus Müller. Using sonification to detect weak cross-correlations in coupled excitable systems. In *Proceedings of ICAD 05 - Eleventh Meeting of the International Conference on Auditory Display*. ICAD - International Conference on Auditory Display, July 6-9 Limerick, Ireland, 2005.
- [Bor05] Jürgen Bortz. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer, Heidelberg, 6., vollst. überarb. und aktualisierte aufl. edition, 2005.
- [ea83] R. S. Stepleman et. al. *Scientific Computing - Applications of Mathematics and Computing to the Physical Sciences*, volume 1 of *IMACS transactions on scientific computation; 10*, chapter 10? „ODEPACK, A Systematized Collection of ODE Solvers“, pages 55–64. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1983.
- [Eat06] John W. Eaton. Gnu octave, October 2006.
- [GKES89] C.M. Gray, P. König, A.K. Engel, and W. Singer. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*, 338:334–337, 1989.

- [Her02] Thomas Hermann. *Sonification for Exploratory Data Analysis*. PhD thesis, Bielefeld University, Bielefeld, Germany, Feb 2002.
- [Hin06] Alan C. Hindmarsh. Serial fortran solvers for ode initial value problems, October 2006.
- [HR99] Thomas Hermann and Helge Ritter. Listen to your data: Model-based sonification for data analysis. In *Advances in intelligent computing and multimedia systems*, pages 189–194, Baden-Baden, Germany, 1999. Int. Inst. for Advanced Studies in System research and cybernetics.
- [Hub95] Oswald Huber. *Das psychologische Experiment*. Aus dem Programm Huber: Psychologie-Lehrbuch. Huber, Bern [u.a.], 2., erg. und korrigierte aufl. edition, 1995.
- [Kra94] Gregory [Hrsg.] Kramer. *Auditory display*. Santa Fe Institute studies in the sciences of complexity : Proceedings ; 18. Addison-Wesley, Reading, Mass. [u.a.], 1. print. edition, 1994.
- [Kur90] Ray Kurzweil. *The age of intelligent machines*. MIT Pr., Cambridge, Mass. [u.a.], 1990.
- [KuTMJ96] Eric R. Kandel and James H. Schwarz und Thomas M. Jessell. *Neurowissenschaften – Eine Einführung*. Spektrum, 1996.
- [Lan05] E. Lange. Issues and Questions for Research in Communicating with the Public through Visualizations. *Trends in Real-Time Landscape Visualization and Participation: Proceedings at Anhalt University of Applied Sciences, Dessau, Germany, May*, pages 26–28, 2005.
- [McC] J. McCartney. SuperCollider: A New Real Time Synthesis Language. *Proceedings of the 1996 International Computer Music Conference,(1996), International Computer Music Association*.
- [MK85] Wolfgang Miram and Dieter Krumwiede. *Informationsverarbeitung*. Materialien fuer den Sekundarbereich II : Biologie. Schroedel, Hannover, neubearb edition, 1985.
- [MKA<sup>+</sup>03] F. Mormann, T. Kreuz, R.G. Andrzejak, P. David, K. Lehnertz, and C.E. Elger. Epileptic seizures are preceded by a decrease in synchronization. *Epilepsy Research*, 53(3):173–185, 2003.

- [MWKB06] Markus Müller, Katja Wegner, Ursula Kummer, and Gerold Baier. Quantification of cross correlations in complex spatiotemporal systems. *The American Physical Society*, 2006.
- [Oes98] Bernd Oestereich. *Objektorientierte Softwareentwicklung - Analyse und Design mit der Unified Modeling Language*. R. Oldenbourg Verlag, München Wien, 4 edition, 1998.
- [PV] William H. [Hrsg.] Press and William T. Vetterling. *Numerical recipes*. Cambridge Univ. Press, Cambridge [u.a.].
- [SB01] Robert F. [Hrsg.] Schmidt and Niels Birbaumer. *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.], 4., überarb. und aktualisierte aufl. edition, 2001.
- [Sca94] Carla Scaletti. Sound synthesis algorithms for auditory data representations. In *Auditory display*. Gregory Kramer, 1994.
- [Sch05] Robert F. [Hrsg.] Schmidt. *Physiologie des Menschen*. Springer-Lehrbuch. Springer, Heidelberg, 29., vollst. neu bearb. und aktualisierte aufl. edition, 2005.
- [Sin99] W. Singer. Neurobiology: Striving for coherence. *Nature*, 397(6718):391, 1999.
- [Sjo01] C. Sjostrom. Designing haptic computer interfaces for blind people. *Signal Processing and its Applications, Sixth International, Symposium on. 2001*, 1, 2001.
- [SM00] Heidrun Schumann and Wolfgang Müller. *Visualisierung*. Springer, Berlin [u.a.], 2000.
- [TS86] John M. T. Thompson and Hugh B. Stewart. *Nonlinear dynamics and chaos*. Wiley, Chichester [u.a.], 1986.
- [War00] Colin Ware. *Information visualization*. The Morgan Kaufmann series in interactive technologies. Morgan Kaufmann, San Francisco [u.a.], 2000.
- [Wik06] Wikipedia. Bild:aktionspotenzial.png — wikipedia, die freie enzyklopädie, 2006. [Online; Stand 22. November 2006].

- [ZGHG99] Philip G. Zimbardo, Richard J. Gerrig, and Siegfried [Bearb.] Hoppe-Graff. *Psychologie*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.], 7., neu übers. und bearb. Aufl. edition, 1999.