

ALBERTO DE CAMPO

SONIFIKATION – DARSTELLUNG, WAHRNEHMUNG, EMERGENZ

1. Hintergrund

Wie kann man Systeme untersuchen, in denen man komplexes Verhalten bzw. emergente Phänomene vermutet? Bei für Menschen unmittelbar wahrnehmbaren Eigenschaften der Systeme kann die Antwort direkte Beobachtung sein: Die Wege, die einzelne Tiere auf einer Ameisenstraße zurücklegen, oder die Hügel, die Termiten bauen, kann man sehen. Bei abstrakteren Eigenschaften spielen Messungen, Daten, Zahlen und Symbole als indirekte Beobachtung eine Rolle; je abstrakter das Gebiet, desto schwieriger kann es sein, geeignete Beobachtungs- und Analyseverfahren zu entwickeln. In wissenschaftlichen, sozialen, politischen, ökonomischen und anderen Systemen werden mehr und mehr Daten erhoben. Dabei muss zum Zeitpunkt der Messung noch gar nicht feststehen, was man in der Analyse herausfinden will – es genügt, zu wissen, welche Observablen sozusagen auf Verdacht gemessen werden sollen. Die üblichen Strategien, um unbekannte Phänomene in Daten zu „finden“, sind statistische Analyse, sinnlich wahrnehmbare Darstellung (in der Regel in visueller Form), und Kombinationen von beiden, um, in informationstheoretischen Begriffen gesprochen, aus dem Rauschen Information zu extrahieren.

Eine klassische Definition von Visualisation lautet: „Several case studies suggest that visualization can be defined as the substitution of preconscious visual competencies for conscious thinking.“¹ Eine darauf aufbauende Definition des allgemeineren Begriffs der Perzeptualisation könnte lauten: „Perceptualisation can be defined as the substitution of preconscious perceptual competencies for conscious thinking.“ Bewusstes Denken meint hier mathematisch-statistische Analyse; unbewusste Wahrnehmung bezieht sich darauf, dass in der Wahrnehmung Objekte sich scheinbar von selbst konstituieren: Wir gruppieren Grenzlinien zwischen Flächen in einem Bild „ganz automatisch“ zu Umrissen und weiter zu Objekten (etwa Möbelstücke und Personen in einem Familienporträt) und können uns nur mit Mühe zwingen, die Grenzlinien zwischen den Objekten lediglich als abstrakte Linien und die Objekte nur als Farbflächen zu sehen. Die definierte „Ersetzung“ ist hier nicht so gemeint,

¹ Richard Mark Friedhoff, „Part of a Panel Discussion: Is Visualization Really Necessary? The Role of Visualization in Science, Engineering, and Medicine“, in: Gregory M. Nielson/Dan Bergeron/IEEE Computer Society (Hg.), *Visualization '93: Proceedings, October 25-29th*, Bd. 5, San Jose, CA, 1993, S. 343.

dass das bewusste Denken für die wissenschaftliche Erkenntnis insgesamt überflüssig würde, sondern dass manche Darstellungsformen einzelne analytische Verfahren ersetzen können.

Eine Besonderheit der Wahrnehmung ist hierbei, dass wir keineswegs nur Muster erkennen können, die uns bekannt sind oder die wir vorher analytisch verstanden haben; wir erkennen auch unbekannte Muster, die sich in Bildern oder Klängen als Regelmäßigkeiten finden. Auch wenn wir keine Begriffe für die beobachteten Phänomene haben, können wir sie in Wiederholungen wiedererkennen und sie anderen Menschen demonstrieren, die dann auch lernen können, sie zu erkennen. Einen ähnlich unspezifischen Musterdetektor als Computerprogramm zu schreiben, ist nicht nur nicht trivial, sondern im Gegenteil nahezu unmöglich. Dass das menschliche Nervensystem als Wahrnehmungsmaschine unbekannte Muster zumindest detektieren kann, reicht im Prinzip auch schon aus, um Forschungsvorhaben auf neue Bahnen zu lenken.

Im Sinne der Kybernetik zweiter Ordnung und des Konstruktivismus gedacht, beruht dieses Auftauchen von neuen Eigenschaften in Systemen auf der Existenz von Beobachtern dieser Systeme; man könnte lange darüber streiten, ob „emergente Phänomene“ tatsächlich im System selbst, also unabhängig von Beobachtern existieren. Meine Auffassung ist, dass Emergenz ein Phänomen in der Realitätskonstruktion der Beobachtenden ist und insofern prinzipiell darauf beruht, dass BeobachterInnen wesentliche Aspekte des Systems verfolgen können. Hier setzt das eigentliche Versprechen der Wirksamkeit von Perzeptualisation an: Indem unbekannte Muster in den nicht wahrnehmbaren Eigenschaften von beobachteten Systemen der Wahrnehmung zugänglich gemacht werden, können auch emergente Phänomene entdeckt werden, für die es kein analytisches Vorwissen gibt.

Die Gestaltung von Perzeptualisationen und das Interagieren mit Perzeptualisationsmaschinen, die Eigenschaften von Daten, Modellen (also Systemen) sinnlich erlebbar machen, ist eine Strategie des handelnden Nachdenkens bzw. der Erkenntnisgewinnung über und mit Daten und Modellen. Die visuelle Form, Datenvisualisierung, ist in wissenschaftlichen Kontexten durchgesetzt und selbstverständlich – und wird auch in vielen künstlerischen Projekten aufgegriffen; die auditive Form, *Sonifikation*, ist in beiden Bereichen noch immer eher die Ausnahme. Dass das Experimentieren mit akustischen Darstellungen noch viel weniger erforscht ist, macht diesen Zugang auch für künstlerische Arbeiten sehr interessant. KünstlerInnen befassen sich sehr genau mit der Gestaltung von sinnlichen Erlebnissen und deren möglichem Detailreichtum; insofern ist gestalterische Erfahrung beim Entwerfen von Perzeptualisationen, die sehr empfindlich auf subtile Differenzen in den Daten oder Modellen sein sollen, ausgesprochen nützlich.

Wie der Vortrag, auf dem er beruht, diskutiert dieser Text anhand von Beispielen die grundlegenden Konzepte der Sonifikation und der auftretenden Wahrnehmungsphänomene, und er versucht sie als wissenschaftliche und künstlerische Tätigkeit zu positionieren.

2. Zur Methodologie der wissenschaftlichen Sonifikation

Aus wissenschaftstheoretischer Sicht steigen die Chancen, neue Hypothesen zu unklaren Beobachtungen zu entwickeln und im besten Fall neue Erklärungen für die beobachteten Phänomene zu finden, wenn die Palette der einsetzbaren alternativen Methoden umfangreicher wird. Solche Verfahren sind technische Dinge im Sinne von Rheinberger², und als solche Teil von experimentellen Setups; sie können, wenn sie gut verstanden sind, zu Standardverfahren werden. Zentrales Problem dabei sind die Fragen: Welche in der Darstellung wahrnehmbaren Gestalten gehen auf relevante Zusammenhänge in den Daten zurück und was sind Artefakte des Darstellungsverfahrens? Antworten darauf lassen sich nur durch genaues Experimentieren finden.

Bei der Sonifikation, der Repräsentation von Daten/Systemen über Klänge, sind einige der markantesten Spezifika folgende:

1. Klang existiert nur in der Zeit; insofern ist die Entfaltung von Vorgängen in der Zeit mit Klängen sehr detailreich darstellbar. Beispielsweise sind periodische Vorgänge mit bedeutsamen feinen Variationen als Rhythmen oder als Tonhöhenschwankungen sehr gut auflösbar.

2. Klang ist allgegenwärtig und vielschichtig; wir hören unbewusst immer die ganze akustische Umgebung als Hintergrund mit und werden spontan auf Veränderungen aufmerksam, sogar wenn wir schlafen – deshalb gibt es weit mehr akustische als optische Wecker.

3. Wir können einerseits durch Konzentration bei einem komplexen Gewebe von Klangschichten einer einzelnen Schicht folgen (etwa ein Gespräch unter vielen parallelen, wie beim sogenannten Cocktail-Party-Effekt); andererseits können wir auch auf die Gesamtheit hören und den quasi polyphonen Zusammenhang als solchen erfassen.

4. Wir können Gehörtes kurzzeitig als detailreichen Klang erinnern, bevor die Elemente von den höheren (bewussteren) Wahrnehmungsmechanismen kategorisiert werden. Durch Zeitachsenmanipulation (Beschleunigung von langsamen Vorgängen, Wiederholung von Segmenten) können wir auch un-kategorisierte Feinstruktur der weiteren Analyse zugänglich machen.

Die Wahrnehmung von und das Denken in Klängen unterliegen bestimmten Begrenzungen:

Bedeutend sind zunächst *physiologische Begrenzungen* wie z. B. der Bereich der hörbaren Tonhöhen, die leisesten hörbaren Lautstärken (sie sind stark unterschiedlich für verschiedene Frequenzen), die kleinsten hörbaren Unterschiede in Tonhöhe, Lautstärke, Klangfarbe u. a. m. *Psychische Begrenzungen* umfassen etwa Grenzen der Aufmerksamkeit und des Gedächtnisses. *Gelernte Fähigkeiten* wie Tonhöhen benennen und notieren können, Vokabular zur Beschreibung von Klängen. *Kulturelle Einflüsse* können weit in die

² Hans-Jörg Rheinberger, *Experimentalsysteme und epistemische Dinge: eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Frankfurt/M., 2006.

Wahrnehmung selbst hereinspielen; z. B. hört man musikalische Tonhöhen in kategorisierten Tonhöhenklassen, die spezifisch für die Kultur sind, mit der man vertraut ist. Wenn man mit den temperierten zwölf Tonstufen der klassischen europäischen Musiktradition aufgewachsen ist, hört man Tonstufen aus nicht-westlichen Kulturen sehr wahrscheinlich als „falsch“; dasselbe gilt umgekehrt genauso. Die *persönliche Lebensgeschichte* kann Vorlieben für und genauere Kenntnis von bestimmten Arten von Klängen formen. Wenn Sonifikationen allgemein verständlich sein sollen, spielen all diese Begrenzungen eine wichtige Rolle im Gestaltungsspielraum.

3. Eine kurze Geschichte der Sonifikation

Der Einsatz des Hörens für wissenschaftliche Zwecke war nicht immer so unüblich wie er in der heute visuell dominierten wissenschaftlichen Kultur scheinen mag. Die hier gegebene kurze Übersicht zur Vorgeschichte der Sonifikation soll das nur anreißen; eine genauere Diskussion findet sich z. B. bei Kramer.³

In der *Medizin* findet das Hören von Körpergeräuschen, die Auskultation, seit Hippokrates Anwendung; das Stethoskop (von Laennec 1819 erfunden) wird auch heute noch verwendet.

In der *Mechanik* können ExpertInnen bei Maschinen wie z. B. Motoren sehr genau hören, welche Teile nicht optimal funktionieren oder falsch eingestellt sind. Es ist gut möglich, dass es dafür weitere, wenig bekannte Vorformen gibt. Ein sehr frühes Beispiel für wissenschaftliche Beweisführung über Klang ist die Hypothese, dass *Galilei* das quadratische Fallgesetz akustisch verifiziert habe (u. a. bei Drake⁴); in einer Rekonstruktion haben Riess et al.⁵ gezeigt, dass die im 17. Jh. üblichen Zeit-Messverfahren zu ungenau gewesen sein müssen, während das Erkennen eines sehr regelmäßigen Rhythmus' als Methode weit plausibler scheint.

Ein technisches Gerät, das für Menschen nicht spürbare Phänomene hörbar macht, ist der *Geiger-Müller-Zähler* (1908) – er wandelt ionisierende Strahlung in knackende Geräusche um, wenn radioaktive Partikel auf den Sensor treffen. *Passives Sonar*, die Idee Unterwassergeräusche von Schiffen oder Tieren zu hören, gibt es schon in Notizen von Leonardo da Vinci. *Aktives Sonar* arbeitet mit lauten Pulsen, die in undurchsichtige Wasservolumen eingespielt werden, um aus den Reflexionsmustern die Form des Untergrunds zu schließen oder auch um U-Boote, Wale oder Fischschwärme zu finden.

³ Gregory Kramer, *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994.

⁴ Stillman Drake, *Galileo*, New York, NY, 1980.

⁵ Falk Riess/Peter Heering/Dennis Nawrath, „Reconstructing Galileo's Inclined Plane Experiments for Teaching Purposes“, in: *Proceedings of the 8th International History, Philosophy, Sociology and Science Teaching Conference*, Leeds, UK, 2005.

In der *Seismologie* liegen akustische Verfahren nahe, da Erdbeben ja mechanische Vibrationen sind.

Bei Speeth⁶ lernten Subjekte, Erdbeben typen am beschleunigt abgespielten Geräusch zu erkennen; in der *Auditory Seismology* haben erst Hayward⁷ und später Dombois⁸ diese Praxis fortgesetzt. Aber auch in der *Quantenphysik* gibt es bereits in den 1990er Jahren einen Anwendungsfall: Pereverzev et al.⁹ wiesen den Josephson-Effekt nach, eine in den 1960er vorhergesagte Quanten-Oszillation zwischen schwach gekoppelten Superfluid-Helium-Reservoirs, indem sie in einem verstärkten akustischen Sensorsignal den erwarteten Verlauf hörten.

Die offizielle Geschichte der Sonifikation beginnt wohl mit der ersten International Conference for Auditory Display (ICAD) 1992. Hier trafen Forschende aufeinander, die an verwandten Ideen arbeiteten, und die *Proceedings* (Kramer¹⁰) sind das erste umfangreiche Buch, das diese Arbeiten in einen neuen, gemeinsamen Kontext – *Auditory Display, Sonification* – stellt. Aus dieser Community kommen zahlreiche interessante Arbeiten: Fitch und Kramer¹¹ haben gezeigt, dass für die Vitalzeichen-Überwachung von PatientInnen reines Auditory Display effektiver sein kann als ein *visual display* oder ein kombiniertes *audio-visual display*; Gaver et al.¹² haben gezeigt, dass sich die Prozesse einer virtuellen Fabrik mit polyphoner akustischer Darstellung sehr gut überwachen lassen (*monitoring*), um im Bedarfsfall steuernd eingreifen zu können.

Die Verbindung von neuronalen Signalen und dem Hören hat eine eigene Geschichte, von frühen Neurophysiologen wie Wedensky¹³, der Nervensignale mit dem eben erfundenen Telefon anhörte, zu aktuellen EEG-Sonifikationen wie Baier et al. (2007)¹⁴; Hermann et al. (2006)¹⁵, Hinterberger und Baier¹⁶.

⁶ Sheridan D. Speeth, „Seismometer Sounds“, in: *Journal of the Acoustical Society of America*, 33 (1961), S. 909-916.

⁷ Chris Hayward, „Listening to the Earth Sing“, in: Gregory Kramer (Hg.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994, S. 369-404.

⁸ Florian Dombois, „Using Audification in Planetary Seismology“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, Espoo, Finland, 2001.

⁹ S. V. Pereverzev/A. Loshak/S. Backhaus/J. Davies/R. E. Packard, „Quantum Oscillations Between Two Weakly Coupled Reservoirs of Superfluid 3He“, in: *Nature*, 388 (1997), S. 449-451.

¹⁰ Kramer (1994), *Auditory Display*.

¹¹ W. T. Fitch/Gregory Kramer, „Sonifying the Body Electric: Superiority of an Auditory over a Visual Display in a Complex Multivariate System“, in: Gregory Kramer (Hg.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994, S. 307-325.

¹² William W. Gaver/Randall B. Smith/Tim O’Shea, „Effective Sounds in Complex Systems: The ARKola Simulation“, in: *Proceedings of CHI ’91*, New Orleans, USA, 1991.

¹³ N. Wedensky, „Die telefonische Wirkungen des erregten Nerven“, in: *Centralblatt für medizinische Wissenschaften*, 26 (1883).

¹⁴ Gerold Baier/Thomas Hermann/Ulrich Stephani, „Event-Based Sonification of EEG Rhythms in Real Time“, in: *Clinical Neurophysiology* 118, 6 (2007).

Die Faszination von MusikerInnen und KomponistInnen für Gehirnwellen, beginnend mit Alvin Luciers „Music for Solo Performer“ (1965) u. v. a. setzt sich bis in die Gegenwart fort und bezieht inzwischen auch die Forschung zu Brain-Computer-Interfaces in künstlerische Projekte ein.

Unabhängig davon wird die Idee des Hörens als wissenschaftliche Methode immer wieder von Forschern neu entdeckt, die die *sonification community* nicht zu kennen scheinen, so z. B. die Sonozytologie von James Gimzewski.¹⁷

Es scheint wahrscheinlich, dass die Forschungsaktivität in der Sonifikation und im Auditory Display in Zukunft noch zunehmen wird: Einerseits bietet es die Chance, sehbehinderten Menschen besseren Zugang zum immer weiter anschwellenden Fluss der Informationen zu ermöglichen, andererseits sind bei kleinen mobilen Geräten die visuellen Möglichkeiten beschränkt und akustische Interfaces ermöglichen Kommunikation, die die Augen für andere Aufgaben frei lassen („eyes-free“).

4. Das Forschungsprojekt SonEnvir

Um sich eine genauere Vorstellung einer wissenschaftlichen Methode zu bilden, sind konkrete Beispiele unersetzlich. Hier greife ich vor allem auf Arbeiten zurück, an denen ich direkt beteiligt war, weil sie leicht zugänglich sind, und ich viel Kontextwissen dazu einbringen kann; einige der beschriebenen Arbeiten von anderen sind im Rahmen eines Konzertwettbewerbs der ICAD entstanden.

Diese Arbeiten fanden weitgehend in einem interdisziplinär angelegten Projekt statt, das von 2005 bis 2007 am Institut für elektronische Musik in Graz stattfand. Der Name „SonEnvir“ steht für „Sonification Environment“, also Umgebung zur Sonifikation, d. h. Repräsentation, Analyse, Exploration wissenschaftlicher Daten. Die diversen Einzelprojekte sind auf der Projektwebsite <http://sonenvir.at> ausführlich dokumentiert.

Ausgangspunkt für unser Projekt war die Auffassung, dass Sonifikation nur interdisziplinär wirklich denkbar ist, unter Einbeziehung von Disziplinen wie Human Computer Interaction, Psychoakustik, Auditory Display Design, Exploratory Data Analysis, künstlerisches Sound Design, und vor allem auch denjenigen wissenschaftlichen Gebieten, für die Sonifikationen als Mittel zur

¹⁵ Thomas Hermann/Gerold Baier/Ulrich Stephani/Helge Ritter, „Vocal Sonification of Pathologic EEG Features“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.

¹⁶ Thilo Hinterberger/Gerold Baier, „POSER: Parametric Orchestral Sonification of EEG in Real-Time for the Self-Regulation of Brain States“, in: *IEEE Multimedia* (Special Issue on Sonification) 12, 2 (2005), S. 70-79.

¹⁷ Siehe hierzu Andrew E. Pelling/Sadaf Sehati/Edith B. Gralle/Joan S. Valentine/James K. Gimzewski, „Local Nanomechanical Motion of the Cell Wall of *Saccharomyces cerevisiae*“, in: *Science* 305, 5687 (2004), S. 1147-1150.

Hypothesenbildung, Exploration entwickelt werden sollten. Von Anfang an mit einbezogen wurden deshalb die Anwendungsgebiete Neurologie, Physik, Soziologie, und Signalverarbeitung. Jedes war im Projekt mit einem/einer Wissenschaftler/in vertreten.

Ergebnisse dieses Projekts waren neben zahlreichen Sonifikationen für wissenschaftliche und künstlerische Kontexte, von denen stellvertretend einige diskutiert werden, eine handlungsleitende Theorie, die *Data Sonification Design Space Map*, die zunächst kurz skizziert werden soll.

5. Data Sonification Design Space Map¹⁸

Wenn man zu neuen Forschungsfragen mit Darstellungsexperimenten beginnt, gleichgültig ob in visueller oder akustischer Form, weiß man gerade auch in Situationen interdisziplinärer Zusammenarbeit zunächst wenig über die jeweils anderen Gebiete: Eine Sonifikationsexpertin wird wenig über eine quantenphysikalische Frage wissen, ein Physiker wenig darüber, welche Varianten von Auditory Display bzw. Sonifikation für seinen konkreten Fall überhaupt infrage kommen. Kurz, wie beginnt man an Sonifikationen zu arbeiten, bevor man den ganzen Kontext kennt?

Die *Data Sonification Design Space Map* entwickelt für diese Problemlage Strategien, indem sie im Sinne der „Grounded Theory“¹⁹ aus einer breiten praktischen Basis (wie wir sie im Projekt und speziell im Workshop „Science by Ear“ entwickelt haben) theoretische Abstraktionen bildet. Damit soll implizites Wissen von PraktikerInnen erschlossen werden, um als Grundlage für reflektierende Diskussion, Didaktik und als Orientierung im Designprozess von neuen Anwendungen zu dienen. Die *Data Sonification Design Space Map* betrachtet die sogenannten *Sonification Designs* als experimentelle Setups im Sinne von Rheinberger²⁰, die im Idealfall als Standardlösungen in die allgemeine Praxis übergehen können.

Die *Design Space Map* stellt drei Fragen, die den Suchvorgang nach emergenten Phänomenen in den Daten systematisch beschleunigen soll:

1. Bei welchen Mengen an Datenpunkten ist zu erwarten, dass emergente Phänomene beobachtet werden können, also Wahrnehmung von Gestalten auftritt? Diese Anzahl an Punkten sollte dann innerhalb der typischen Dauer des akustischen Kurzzeitgedächtnisses (etwa 3 Sekunden)²¹ hörbar werden. (In Abb. 1 heißt diese Zahl *gestalt number*.)

¹⁸ Vgl. Alberto de Campo, *Science by Ear. An Interdisciplinary Approach to Sonifying Scientific Data*, Dissertation, Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, 2009, S. 37-51.

¹⁹ Barney G. Glaser/Anselm L. Strauss, *The Discovery of Grounded Theory*, New York, NY, 1967.

²⁰ Rheinberger (2006), *Experimentalsysteme*.

²¹ Bob Snyder, *Music and Memory: an Introduction*, Cambridge, MA (u. a.), 2000.

2. Wie viele Eigenschaften jedes Datenpunkts will man in die aktuelle Version der Darstellung einbeziehen? Je nach Verfahren können einzelne Datendimensionen direkt als Klangparameter abgebildet werden (z. B. Temperatur als Tonhöhe); nicht immer müssen alle Datendimensionen in jede Version des *Sonification Designs* einbezogen werden.

3. Wie viele parallele Klangverläufe (*auditory streams*)²² sollen zum Einsatz kommen? Bei Daten, die parallele Verläufe in der Zeit darstellen, liegt es nahe, diese oder eine Auswahl davon auch parallel darzustellen.

Auf alle drei Fragen antwortet man mit geschätzten Zahlen; aufgrund der Konstellation dieser Zahlen schlägt die *Design Space Map* eine Auswahl der Strategie für den nächsten Entwurf eines *Sonification Designs* vor. Damit erlaubt sie informierte Designentscheidungen auf der Basis von Wissen um psychoakustische Zusammenhänge und Vermutungen über die Daten.

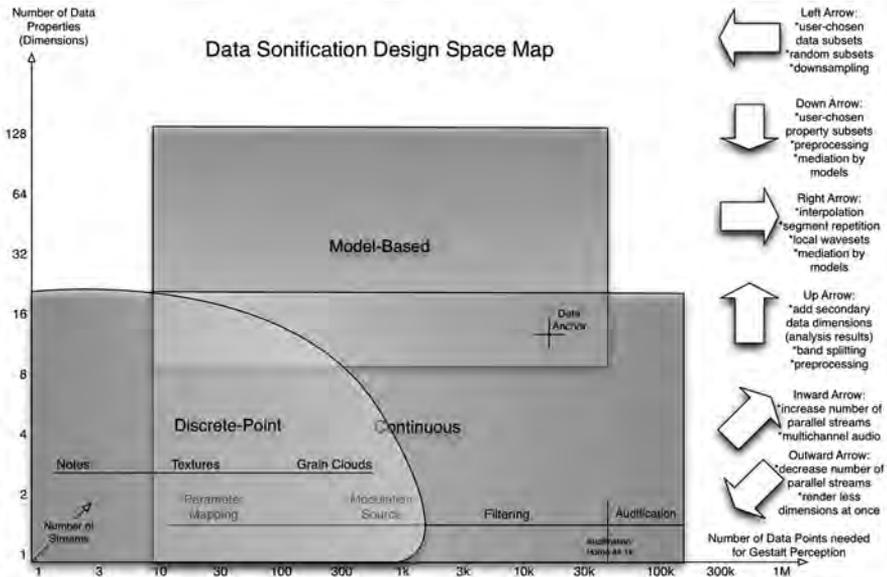


Abbildung 1 zeigt die typischen Bereiche der drei elementaren Sonifikations-Verfahren:

Continuous Data Representation: Die Daten bilden einen kontinuierlichen Verlauf in der Zeit; dieses Verfahren ist bei großen Datenmengen sinnvoll.

Discrete Point Data Representation: Jeder Datenpunkt wird als eigenes, im Normalfall sehr kurzes, Ereignis dargestellt; meist bei niedrigeren Gestaltzahlen eingesetzt.

²² Albert S. Bregman, *Auditory Scene Analysis: the Perceptual Organization of Sound*, Cambridge, MA (u. a.), 1990.

Model Based Data Representation: Die Daten informieren ein Modell, das vom User interaktiv quasi mit Energie angeregt und damit „gespielt“ werden kann, etwa indem physikalische Resonanzvorgänge simuliert werden. Das kann speziell bei hochdimensionalen Daten effektiv sein.

Entwicklungsschritte im *Sonification Design* lassen sich als Bewegungen auf der *Space Map* denken und darstellen: Wenn man untersuchen will, ob bei größeren Datenmengen andere Phänomene hervortreten, bewegt man sich auf der Karte nach rechts, bringt also mehr Datenpunkte ins gleiche Zeitfenster. Will man die Darstellung einfacher halten, kann man mit wenigen Datendimensionen beginnen. Soll die Darstellung komplexer werden, bildet man später mehr Dimensionen im Klang selbst ab.

6. Beispiele für *Sonification Designs* im Projekt SonEnvir

Die folgenden Beispiele wurden alle im Kontext des Projekts SonEnvir entwickelt. Sie sind in einzelnen *conference papers* dokumentiert und zusammenfassend in de Campo²³; darüber hinaus sind sie in der Sammlung von *Sonification Designs* auf der Projektwebsite (<http://sonenvir.at/data>) mit Klangbeispielen aufbereitet. Sämtlicher Code dieser Beispiele (in der Sprache „SuperCollider3“²⁴ geschrieben) ist auch online verfügbar. Die Integration in eine einzige, leicht benutzbare Demoapplikation für das ganze Projekt wurde erst nach Projektende begonnen und wird erst nach und nach stattfinden.

FRR Log Player

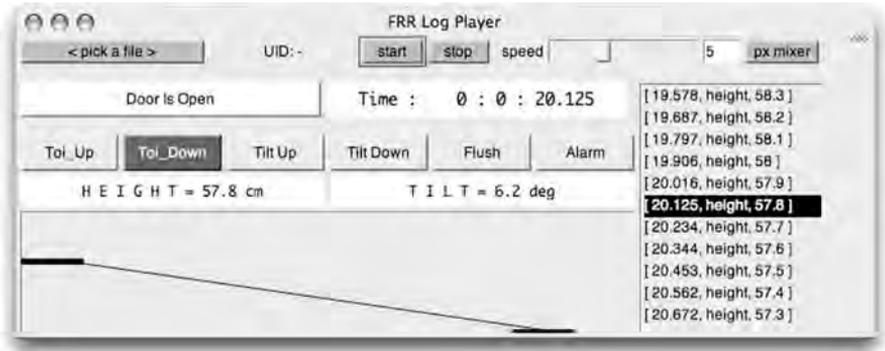
SonEnvir-Kollege Christian Dayé hat im EU-Projekt FRR (Friendly Rest Room) mitgearbeitet, in dem es um die Entwicklung einer funktional flexiblen Toilette für Menschen mit verschiedenen Behinderungen ging. Gegen Ende dieses Projekts fand ein Feldversuch statt, bei dem diese Toilette mit vielen Personen getestet wurde. Die Benutzungssequenzen wurden dabei als Logs mitgeschrieben. Sensoren registrieren, wenn die Tür geöffnet wird, wenn die Neigung der Toilette sich durch Belastung ändert, wenn Höhe oder Neigung per Fernbedienung verstellt wird, wenn die Spülung betätigt wird, wenn der Hilfefknopf gedrückt wird und anderes. (Kameras waren hier offensichtlich aus Gründen der Privatsphäre ungeeignet.)

Aus diesen Zeitverläufen sollten typische Benutzerverhaltensmuster erkennbar werden, um z. B. Schwächen des Designs und der technischen Ausstattung zu identifizieren, die bestimmten Benutzergruppen Schwierigkeiten machen. Die Abläufe können im Zeitraffer abgespielt werden, um sich einen

²³ de Campo (2009), *Science by Ear*.

²⁴ James McCartney et al., *SuperCollider3*, online unter: <http://supercollider.sourceforge.net/>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.

Überblick über die zeitlich ausgedehnten Benutzungsmuster zu verschaffen. Einerseits werden sie auf einem *Graphical User Interface* (GUI) optisch dargestellt, und andererseits sonifiziert: Jeder Knopf auf der Fernbedienung hat einen eigenen, einfachen symbolischen Sound; die Neigung wird als Richtung eines Glissandos im Hintergrundklang dargestellt.²⁵ Eine genauere Beschreibung findet sich in Daye et al.²⁶ und in de Campo²⁷.



2 – Das grafische Interface zum LogPlayer zeigt eine symbolische Darstellung der Sensorzustände und die neuesten registrierten Events

EEGPlayers

Bei diesen beiden *Sonification Designs* ging es darum, für die Beobachtung und Auswertung von EEG-Aufzeichnungen Tools zu erstellen, die im Kontext klinischer Praxis in der Neurologie einsetzbar und nützlich sein sollten. Beide Designs sind mit Klangbeispielen auf <http://sonenvir.at/data/eeg/> beschrieben, ausführlich in de Campo²⁸ und aus neurologischer Sicht in Wallisch²⁹.

Beim *EEG Screener* (s. Abb 3) ist das Anwendungsszenario die Analyse von Langzeit-EEG-Aufzeichnungen, wie sie z. B. bei Kindern gemacht werden, bei denen Verdacht auf sogenannte Absence-Epilepsie besteht. Die klinisch relevanten Anteile in EEG-Signalen sind eher niederfrequent (zwischen 1 Hz und etwa 30 Hz) und bei zeitbeschleunigtem Abhören dieser Signale lassen sie sich gut in den hörbaren Bereich (20 bis 20.000 Hz) verschieben. Sie

²⁵ Dieses Beispiel ist mit Klangbeispielen kurz beschrieben unter <http://sonenvir.at/data/logdata1/>.

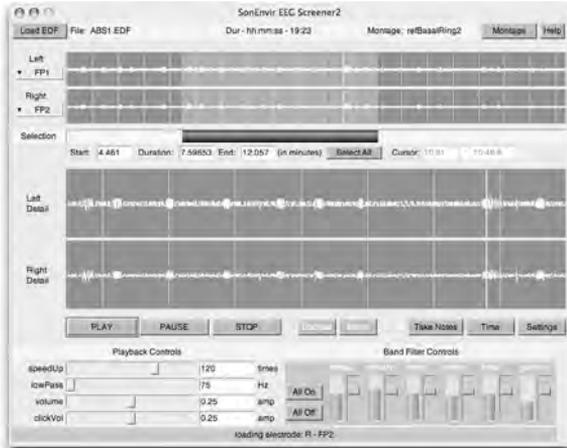
²⁶ Christian Dayé/Alberto de Campo/Christian Fleck/Christopher Frauenberger/Georg Edelmayer, „Sonification as a Tool to Reconstruct User’s Actions in Unobservable Areas“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, Limerick, Ireland, 2005.

²⁷ de Campo (2009), *Science by Ear*.

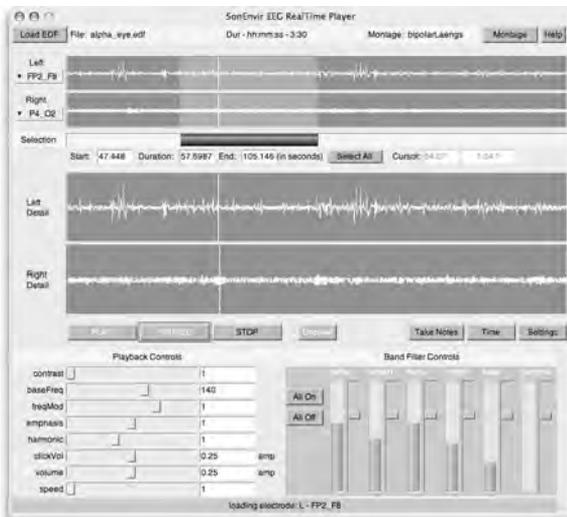
²⁸ Ebd.

²⁹ Annette Wallisch, *EEG plus Sonifikation. Sonifikation von EEG-Daten zur Epilepsiediagnostik im Rahmen des Projekts ‚SonEnvir‘*, Dissertation, Medizinische Universität Graz, 2007.

sind in EEG-typische Frequenzbänder aufteilbar, Zeitabschnitte lassen sich wiederholt anhören, und man kann leicht annotierte Hörprotokolle mit genauen Zeitpunkten und Einstellungen anfertigen.



3 – Grafisches User Interface des *EEGScreener*s



4 – Grafisches User Interface des *EEGRealtimePlayer*s

Mehrere Stunden lang gleichzeitig auf einen Videoschirm zu achten, der den Patienten zeigt, und auf einen zweiten Bildschirm, auf dem die EEG-Signale gezeigt werden, ist sehr ermüdend. Der *EEGRealtimePlayer* (s. Abb 4) kann eingesetzt werden, um bei laufenden EEG-Aufnahmen das Überwachungsper-

sonal dabei zu unterstützen und zu entlasten. Die akustische Darstellung über Sonifikation erlaubt hier, sich an eine relativ konstante Klangkulisse zu gewöhnen; wenn in dieser Klangkulisse überraschende Änderungen auftreten, wird man von selbst aufmerksam.

Dazu werden die EEG-Signale in rhythmisch pulsierende Klänge verwandelt, deren Zeitstrukturen in verschiedenen Tonhöhenschichten abgebildet werden. Dadurch ist der *EEGRealtimePlayer* auch verwendbar, um diese Zeitstrukturen zu Analysezwecken genauer unter die akustische Lupe zu nehmen.

Juggling Sounds

Diese Arbeit wurde vor allem von Till Bovermann mit Jonas Groten³⁰ realisiert, und beruht auf der Idee, JongleurInnen beim Erlernen und Ausarbeiten von verschiedenen komplexen Bewegungsformen auditives Feedback zu geben. Einerseits haben Jongleure visuell mit dem Beobachten der Keulen, Bälle, o. Ä. schon genug zu tun, andererseits geht es oft darum, Bewegungen auf der linken und der rechten Körperhälfte synchron oder gegengleich auszuführen, was optisch schwierig festzustellen ist.

Die Arbeit wird am besten anhand der Videos auf <http://sonenvir.at/data/JugglingSounds/> verständlich. Die Bewegungen der Keulen werden mit Markern und schnellen Kameras verfolgt, und diese Daten werden in vier Zonen auf vier verschiedene Arten sonifiziert. Diese Varianten sind jeweils für bestimmte Jonglageformen speziell geeignet, weil sie z. B. Exaktheit der Wurfhöhen, oder Gleichheit der Drehwinkel der Keulen gesondert darstellen. Gleichzeitig ist diese variable Mehrfachdarstellung für JonglagekünstlerInnen auch einfach reizvoll als Erweiterung ihrer Performancepraxis. Natürlich geht auch hier das Design der Sounds und der Mappings zwischen Bewegungen und Sounds über eine rein technische Arbeitsweise hinaus: Wenn die technische Seite funktioniert, beginnt die künstlerisch-gestalterische Arbeit an Sonifikationen.

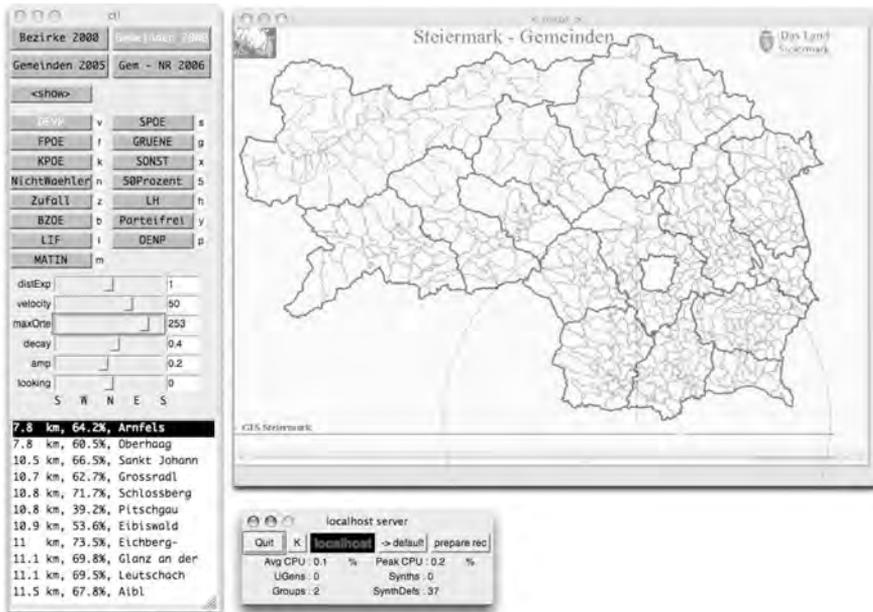
Wahlgesänge

Wahlgesänge thematisiert ein Ordnungsprinzip, wie es bei sozialen Daten häufig vorkommt, nämlich räumlich geordnete Daten. Als sehr einfaches Beispiel haben wir Daten von Wahlergebnissen in einem österreichischen Bundesland gewählt: der Steiermark. Daten von mehreren Landtagswahlen in über 500 Wahlkreisen liegen vor, und die Prozentzahlen jeder Partei und jeder Wahl können miteinander in ihrer räumlichen Verteilung verglichen werden.

Auf dem Interface (s. Abb. 5) wählt man das Wahljahr und die Partei aus, die man hören will. Dann klickt man auf einen Punkt der Landkarte und löst damit eine Welle aus, die sich ringförmig vom Startpunkt ausbreitet. Wenn die

³⁰ Till Bovermann/Alberto de Campo/Jonas Groten/Gerhard Eckel, „Juggling Sounds“, in: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Interactive Sonification*, York, 2007.

Welle auf einen Wahlkreis trifft, wird der Ton für das Ergebnis dieses Wahlkreises ausgelöst. Man hört also das Zentrum zuerst, dann die nächsten Nachbarn, später entferntere Nachbarn. Die Tonhöhen werden von den relativen Prozentzahlen bestimmt. Durch wiederholtes Klicken an verschiedenen Orten kann man regionale Unterschiede und Besonderheiten im Wahlverhalten in hoher Auflösung erkunden.



5 – Grafisches User Interface des Wahlgesänge-Designs

Dieses Design geht auf ein Beispiel für *Model-Based Sonification* von Till Bovermann³¹ zurück; Klangbeispiele finden sich unter <http://sonenvir.at/data/wahlgesaenge>.

Abgesehen von ihrer Relevanz für die jeweilige Anwendungsdisziplin haben die realisierten Sonifikationsdesigns in ihrer Vielfalt, gemeinsam mit den Erfahrungen, die das Team in den interdisziplinären Workshops sammeln konnte, entscheidend dazu beigetragen, dass mit der *Sonification Design Space Map* eine neue handlungsleitende Theorie für die Sonifikationsforschung entwickelt werden konnte.

³¹ Till Bovermann, „MBS-Sonogramm“, 2005, online unter: <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~tboverma/sc/>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.

7. Sonifikation in Wissenschaft und Kunst

Abgesehen vom Interesse vieler KünstlerInnen an der Darstellung von Daten und Systemen sind auch viele Sonifikationsforscher der Ansicht, dass in der Praxis der Sonifikation interdisziplinäre Zusammenarbeit von Kunst und Wissenschaft notwendig und sinnvoll ist. Die ICAD organisiert in ihren Konferenzen Konzerte, um diese Idee zu propagieren. Für die ICAD 2004 hat Stephen Barrass einen Wettbewerb zu EEG-Daten ausgeschrieben („Listening to the Mind Listening“), dessen Ergebnisse im Sydney Opera House aufgeführt wurden.³²

Bei der ICAD in London 2006 hat das SonEnvir-Team den Concert Call und das Konzert selbst organisiert.³³ Der Concert Call stellte globale Daten von 192 Ländern aus UNO-Statistiken³⁴ zur Verfügung, von elementaren Daten wie Bevölkerungszahl, Fläche, BNP, Pro-Kopf-Einkommen bis hin zu Ausbildungszeiten für Männer und Frauen, Prozentsatz der Bevölkerung mit Zugang zu sauberem Wasser, Wohnbedingungen u. v. a. Die gestellte Aufgabe bestand darin, daraus soziologische Fragen zu entwickeln und diese Fragen mit Sonifikation zu behandeln. Die Sonifikationen sollten durchaus auch allgemein verständlich sein, etwa in dem Sinne, wie Hans Rosling mit dem Projekt GapMinder (<http://www.gapminder.org/>) populäre Aufklärungsarbeit durch neue, klug gestaltete und leicht verständliche Formen der Datenvisualisierung leistet. Im Folgenden behandle ich drei Beiträge für dieses Konzert. Zu diesen und fünf weiteren Arbeiten sind *papers* und MP3-Files verfügbar, die für Kopfhörerwiedergabe adaptiert sind.³⁵

Life Expectancy – Tim Barrass

Life Expectancy soll HörerInnen ermöglichen, Beziehungen zwischen Lebensumständen und Lebenserwartung zu finden. Die gewählten Klänge verwenden sehr direkte Metaphern und sind insofern einfach lesbar. Gleichzeitig erlauben sie eine sehr dichte, reiche Darstellung. Das Stück besteht aus drei Teilen: einer *introduction*, die der Orientierung dient, einem langem Hauptteil und einer Coda, die Genderdifferenzen in der Lebenserwartung thematisiert.

Der erste Teil zeigt in 20 Sekunden die räumlichen Richtungen aller Hauptstädte mit einem leicht ortbaren Glockenklang (auf einer ringförmigen Lautsprecheranordnung mit 8 Kanälen), nach aufsteigender Lebenserwartung geordnet, und die Lebenserwartung selbst, die als aufsteigende Linie umgesetzt ist.

³² <http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2004/concert.htm>.

³³ <http://www.dcs.qmul.ac.uk/research/imc/icad2006/concert.php>.

³⁴ UN Statistics Division, „Social Indicators“ (2006), online unter: <http://unstats.un.org/unsd/demographic/products/socind/default.htm>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.

³⁵ <http://www.dcs.qmul.ac.uk/research/imc/icad2006/proceedings/concert/index.html>.

Der Hauptteil bringt in ca. 6 Minuten sehr viel Information: Jedes Land wird durch eine komplexe Audiovignette von ca. 2 Sekunden dargestellt; der interessanteste Aspekt daran ist die Reihenfolge: Sie beginnt beim Land mit der höchsten Lebenserwartung, springt zur niedrigsten, dann zur zweithöchsten, zur zweitniedrigsten usw., bis die Reihe in der Mitte endet.

Die Audiovignette für jedes Land bringt den Namen des Landes (als Text gesprochen), die Population (als Anzahl der sprechenden Stimmen), die Position (als geografische Breite als Tonhöhe der Glocke, die Länge als Richtung am Ring). Die Lebenserwartung selbst wird als aufsteigende Tonleiter umgesetzt, die abbricht (1 Note = 10 Jahre) – zunächst für Männer, dann für Frauen. Das Durchschnittseinkommen erklingt als Münzen und der Zugang zu sauberem Wasser als Klang eines Wassergefäßes.

Die Coda stellt die Genderunterschiede in der Lebenserwartung noch mal explizit dar, als Glissando eines Tons vom jeweiligen Wert für Männer zu dem von Frauen.

Tim Barrass selbst beschreibt seine Arbeit eher zurückhaltend:

I have taken a straightforward and not particularly musical approach, in an attempt to gain a clear impression of the dataset. The sound mapping is ‚brittle‘, designed specifically for the dataset. I would not expect this approach to provide a flexible base to explore the musical, sonic and informational possibilities of similar material, but it may at least serve as an example of one direction that has been tried.³⁶

Obwohl das Stück ‚schmucklos‘ erscheint, indem es sehr viele Daten sehr direkt abbildet, finde ich es sowohl als Komposition wie als Sonifikation hervorragend gelungen: Es stellt komplexe Zusammenhänge elegant in einer Form dar, die als Hörerlebnis wirklich interessant ist. Die Metaphern sind so transparent, dass man viele Details nach und nach entdecken und ‚lesen‘ lernen kann. Die stärkste Intervention im Stück, die Idee, Länder mit hohen und niedrigen Werten bei der jeweiligen Lebenserwartung zu verweben, und die sich daraus ergebenden Konstellationen haben wohl nicht nur bei mir zu neuen Perspektiven geführt.

*„Navegar É Preciso, Viver Não É Preciso“ –
Alberto de Campo, Christian Dayé³⁷*

Die Arbeit an diesem Stück begann mit der Frage, wie man die räumlich geordneten Daten von 192 Ländern in eine zeitliche Ordnung (für ein Konzert) bringen kann. Die Idee, dass sich die Sonifikation entlang der Route der histo-

³⁶ Tim Barrass, „Description of Sonification for ICAD 2006 Concert: Life Expectancy“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.

³⁷ Alberto de Campo/Christian Dayé, „Navegar É Preciso, Viver Não É Preciso“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.

risc h ersten Umrundung der Erde von Fernando Magellan (1519-1522) bewegen könnte, hat alle weiteren Entscheidungen maßgeblich beeinflusst. Genauere Dokumentation und ein Soundfile des Stücks finden sich auf der Website der ICAD 2006.



6 – Primo Viaggio Intorno al Globo Terracqueo, Antonio Pigafetta (1530)

Die historischen Kolonisatoren wollten Gewürze finden: das damals teuerste Gut. Wir fragten uns: Welche modernen Äquivalente wären für die Kolonisatoren heute interessant? Unsere Wahl fiel auf Reichtum und Einkommensverteilung im Detail (der sogenannte Gini-Index) und den Zugang zu sauberem Wasser als zukunftskritische Ressource.

Wir haben uns hier bewusst zu höherer Komplexität der Darstellung entschieden; obwohl das mehr Konzentration von den HörerInnen verlangt, bleibt so das Hörerlebnis auch nach mehrmaligem Hören interessant. Jedes Land wird mit einem komplexen Strom von Klängen dargestellt, der aus 5 nachklingenden ‚Resonatoren‘ zusammengesetzt ist, die von zufällig verteilten Klicks mit einer bestimmten Dichte ‚angeschlagen‘ werden. Der zentrale Resonator klingt auf einer Tonhöhe nach, die vom mittleren Einkommen des jeweiligen Landes bestimmt wird, und ist am häufigsten zu hören; die beiden äußeren Paare („Satelliten“) erklingen seltener, und ihre Tonhöhen entsprechen den höchsten und niedrigsten 10 bzw. 20 % der Einkommensverteilung. Länder mit sehr geringen Einkommensunterschieden klingen wie eng beieinanderliegende Akkorde, bei großen Unterschieden ist der fünfstimmige Akkord weit aufgespreizt.

Alle Parameter dieses komplexen Klangs werden von den Daten des jeweiligen Landes und vom Navigationsprozess bestimmt, d. h. von der aktuellen Distanz und Richtung des virtuellen Schiffs zu dem jeweiligen Land. Man hört immer die Klänge der nächstliegenden 15 Länder gleichzeitig, aus den Richtungen, in denen sie relativ zum Schiff liegen.

Die *Mappings* sind im einzelnen:

Bevölkerungsdichte des Landes	Dichte der zufälligen Trigger der Resonatoren
Einkommen pro Kopf	Tonhöhe des zentralen Resonators
Ratio höchste/niedrigste 10 % Einkommen	Tonhöhen der äußeren Satelliten-Resonatoren
Ratio höchste/niedrigste 20 % Einkommen	Tonhöhen der inneren Satelliten-Resonatoren
Zugang zu sauberem Wasser	Nachklingzeiten der Resonatoren (kurz = trocken)
Distanz zum Schiff	Lautstärke, Attack (weit weg = verschwommen)
Richtung zum Schiff	Richtung des Klangs im Lautsprecher-Ring
Geschwindigkeit und Ausrichtung des Schiffs, Windstärke	Richtung, Klangfarbe, Lautstärke des Windgeräusches

Um die gewählten *Mappings* von den Daten auf Klangeigenschaften lernen zu können, zeige ich in Vorträgen meist ein interaktives Beispiel, bei dem man den gesamten Soundstream eines Landes hört und zwischen allen 192 Ländern umschalten kann; der Code dafür ist als Teil des Kapitels über Sonifikation im *SuperCollider Book* auch online verfügbar. Damit lassen sich multidimensionale Unterschiede wie etwa zwischen der Mongolei (sehr niedrige Bevölkerungsdichte, sehr arm) und Hongkong (sehr dichte Bevölkerung, sehr reich) gut vergleichen und erfassen. Mehr Hintergrundinformationen zu Reiseroute und anderen Details sind in Dayé und de Campo³⁸ und in de Campo³⁹ zu finden.

Terra Nullius – Julian Rohrer, ICAD Concert 2006 London

Dieses Stück thematisiert ein zentrales Problem sozialer Daten: ihre Unvollständigkeit. Manchmal sind fehlende Daten (*missing data*) ergänzbar, meistens aber nicht. Was bedeutet es, wenn beispielsweise bei Daten, die eine Per-

³⁸ Christian Dayé/Alberto de Campo/Marianne Egger de Campo, „Sonifikationen in der wissenschaftlichen Datenanalyse“, in: *Angewandte Sozialforschung* 24, 1/2 (2006), S. 41-56.

³⁹ de Campo (2009), *Science by Ear*.

son beschreiben, der Wert für Alter fehlt? Entlang einer linearen Skala für den Parameter „Alter“ können die Daten nach dieser Dimension nicht mehr geordnet werden. Wenn der Wert für das Alter in irgendeiner Form abgebildet werden soll, fehlt eine Eigenschaft wie z. B. die Farbe eines dargestellten Datenpunkts. Am ehesten könnte man argumentieren, dass das Fehlen von Daten als neue, orthogonale Dimension behandelt werden müsste. Die betroffenen Datenpunkte auszuschließen ist zwar möglich, kann allerdings die Datenlage unzulässig verzerren.

„Terra Nullius“ macht dieses Niemandsland der Bedeutungen explizit hörbar: Die ZuhörerInnen befinden sich im virtuellen Erdmittelpunkt, während sich ein Zeiger um die Erde dreht. Zuerst werden nur die Länder mit geografischer Breite nahe an der von Greenwich hörbar, in der Reihenfolge ihrer geografischen Länge. Nach und nach kommen mehr Länder in nördlichen und südlichen Breiten dazu.

Jede Datendimension wird einem bestimmten Frequenzband zugeordnet, und wenn in einem Land die Daten für diese Dimension fehlen, macht Rauschen in diesem Frequenzbereich dieses Fehlen hörbar. Rohrhuber dazu: „A band of filtered noise is used for each dimension that is missing, i.e. the noisier it is, the less we know. In the end the missing itself seems quite rich of information – only about what?“⁴⁰

8. Diskussion und Ausblick

Sonifikation als wissenschaftliche und künstlerische Praxis wirft die gleichen epistemologischen Fragen auf wie andere Repräsentationsstrategien:

- Sind die emergenten Phänomene immanent in den Daten bzw. Modellen?
- Existieren sie nur in der Wahrnehmung der BeobachterInnen?
- Wie sicher kann man eigentliche Dateneigenschaften und Darstellungsartefakte unterscheiden – oder kann man zumindest lernen, sie zu unterscheiden?
- Jede Darstellung ist schon eine Interpretation – welche konkreten Darstellungsformen einer Struktur sind dann neutraler, aussagekräftiger als andere?

Diese Fragen stellen sich bei jeder Gestaltung einer neuen Sonifikation aufs Neue, insofern gibt es hier keine definitive Antworten – das Nachdenken darüber gewinnt durch die Beschäftigung mit Perzeptualisationsformen als Methoden der Erkenntnis neue Aspekte.

Es scheint sehr wahrscheinlich, dass sich akustische Repräsentationen von Daten, Systemen und Modellen weiter ausbreiten werden, vor allem auch dort,

⁴⁰ Julian Rohrhuber, „Terra Nullius“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.

wo reiche Interaktionsmöglichkeiten mit den Systemen erstrebenswert sind. Im wissenschaftlichen Bereich tragen Projekte wie SonEnvir und das Nachfolgeprojekt QCD-Audio⁴¹ sowie die Arbeiten in der Neuroinformatikgruppe in Bielefeld⁴² dazu bei, diese Methoden zu verfeinern und in neuen experimentellen Setups als technische Dinge zu erproben. Im eher anwendungsorientierten Bereich des Interaktionsdesigns für mobile Geräte ist zu erwarten, dass Auditory Display, also der Einsatz akustischer Interfaces, weiter zunehmen wird.

Zahlreiche KünstlerInnen haben großes Interesse daran, Sonifikation in die Gestaltung von komplexen multimedialen Arbeiten zu wissenschaftlichen oder sozialen Fragen einzubeziehen.

Um nur ein Beispiel zu erwähnen: Ich hatte das große Vergnügen, in dem Projekt „Bonner Durchmusterung“ (ein Auftragswerk zum Jahr der Astronomie 2009) mit dem Komponisten Marcus Schmickler zusammen *Sonification Designs* für viele verschiedene Arten von astronomischen Daten und Modellen zu entwerfen. Diese Designs waren bewusst eher strikt gehalten. Schmicklers Stück ist eine Folge von Episoden, die verschiedene astronomische Phänomene behandeln; als ich es erstmals ganz hörte, war ich verblüfft über den Unterschied zwischen dem, was ich von den einzelnen Designs in akustischer Erinnerung hatte, und der Komposition, die dieses Material mit weniger strengen Interpretationen der Phänomene und frei gestalteten Überleitungen so kombinierte, dass ein sehr überzeugender ästhetischer Zusammenhang entstand.

Literatur

- Baier, Gerold/Hermann, Thomas, „The Sonification of Rhythms in Human Electroencephalogram“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, Sydney, Australia, 2004.
- Ders./Hermann, Thomas/Stephani, Ulrich, „Event-Based Sonification of EEG Rhythms in Real Time“, in: *Clinical Neurophysiology* 118, 6 (2007).
- Barras, Tim, „Description of Sonification for ICAD 2006 Concert: Life Expectancy“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.
- Bovermann, Till, „MBS-Sonogram“, 2005, online unter: <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/~tboverma/sc/>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.
- Ders./de Campo, Alberto/Groten, Jonas/Eckel, Gerhard, „Juggling Sounds“, in: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Interactive Sonification*, York, 2007.
- Bregman, Albert S., *Auditory Scene Analysis: the Perceptual Organization of Sound*, Cambridge, MA (u. a.), 1990.

⁴¹ <http://www.qcd-audio.at/>.

⁴² <http://ni.www.techfak.uni-bielefeld.de/> sowie <http://www.techfak.uni-bielefeld.de/ags/ami/>.

- Dayé, Christian/de Campo, Alberto/Fleck, Christian/Frauenberger, Christopher/Edelmayer, Georg, „Sonification as a Tool to Reconstruct User’s Actions in Unobservable Areas“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, Limerick, Ireland, 2005.
- Ders./de Campo, Alberto/Egger de Campo, Marianne, „Sonifikationen in der wissenschaftlichen Datenanalyse“, in: *Angewandte Sozialforschung* 24, 1/2 (2006), S. 41-56.
- de Campo, Alberto, *Science by Ear. An Interdisciplinary Approach to Sonifying Scientific Data*, Dissertation, Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz, 2009.
- Ders./Dayé, Christian, „Navegar É Preciso, Viver Não É Preciso“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.
- Ders./Rohrhuber, Julian/Bovermann, Till/Frauenberger, Christopher, „Sonification and Auditory Display in SuperCollider“, in: Scott Wilson/David Michael Cottle (Hg.), *The SuperCollider Book*, Cambridge, MA, 2011, S. 381-408.
- Dombois, Florian, „Using Audification in Planetary Seismology“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, Espoo, Finland, 2001.
- Drake, Stillman, *Galileo*, New York, NY, 1980.
- Fitch, W. T./Kramer, Gregory, „Sonifying the Body Electric: Superiority of an Auditory over a Visual Display in a Complex Multivariate System“, in: Gregory Kramer (Hg.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994, S. 307-325.
- Friedhoff, Richard Mark, „Part of a Panel Discussion: Is Visualization Really Necessary? The Role of Visualization in Science, Engineering, and Medicine“, in: Gregory M. Nielson/Dan Bergeron/IEEE Computer Society (Hg.), *Visualization '93: Proceedings, October 25-29th*, Bd. 5, San Jose, CA, 1993, S. 343.
- Gaver, William W./Smith, Randall B./O’Shea, Tim, „Effective Sounds in Complex Systems: The ARKola Simulation“, in: *Proceedings of CHI '91*, New Orleans, USA, 1991.
- Glaser, Barney G./Strauss, Anselm L., *The Discovery of Grounded Theory*, New York, NY, 1967.
- Hayward, Chris, „Listening to the Earth Sing“, in: Gregory Kramer (Hg.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994, S. 369-404.
- Hermann, Thomas/Baier, Gerold/Stephani, Ulrich/Ritter, Helge, „Vocal Sonification of Pathologic EEG Features“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.
- Hinterberger, Thilo/Baier, Gerold „POSER: Parametric Orchestral Sonification of EEG in Real-Time for the Self-Regulation of Brain States“, in: *IEEE Multimedia (Special Issue on Sonification)* 12, 2 (2005), S. 70-79.
- Jordà Puig, Sergi, *Digital Lutherie. Crafting Musical Computers for New Musics’ Performance and Improvisation*, PhD thesis, Departament de Tecnologia, Universitat Pompeu Fabra, 2005.
- Kramer, Gregory, *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994.
- Ders., „An Introduction to Auditory Display“, in: ders. (Hg.), *Auditory Display: Sonification, Audification, and Auditory Interfaces*, Reading, MA, 1994.
- McCartney, James et al., *SuperCollider3*, online unter: <http://supercollider.sourceforge.net/>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.

- Pelling, Andrew E./Sehati, Sadaf/Gralle, Edith B./Valentine, Joan S./Gimzewski, James K., „Local Nanomechanical Motion of the Cell Wall of *Saccharomyces cerevisiae*“, in: *Science* 305, 5687 (2004), S. 1147-1150.
- Pereverzev, S. V./Loshak, A./Backhaus, S./Davies, J./Packard, R. E., „Quantum Oscillations Between Two Weakly Coupled Reservoirs of Superfluid ^3He “, in: *Nature*, 388 (1997), S. 449-451.
- Pigafetta, Antonio, *Primo Viaggio Intorno al Globo Terracqueo*, hg. v. Carlo Amoretto, Mailand, 1800.
- Ders., *Mit Magellan um die Erde: ein Augenzeugenbericht der ersten Weltumsegelung 1519-1522*, hg. v. Robert Grün, mit einem Vorwort von Dieter Lohmann, Stuttgart, Wien, 2001.
- Rheinberger, Hans-Jörg, *Experimentalsysteme und epistemische Dinge: eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Frankfurt/M., 2006.
- Riess, Falk/Heering, Peter/Nawrath, Dennis, „Reconstructing Galileo’s Inclined Plane Experiments for Teaching Purposes“, in: *Proceedings of the 8th International History, Philosophy, Sociology and Science Teaching Conference*, Leeds, UK, 2005.
- Roads, Curtis, *Microsound*, Cambridge, MA, 2002.
- Rohrhuber, Julian, „Terra Nullius“, in: *Proceedings of the International Conference on Auditory Display (ICAD)*, London, UK, 2006.
- Snyder, Bob, *Music and Memory: an Introduction*, Cambridge, MA (u. a.), 2000.
- Speeth, Sheridan D., „Seismometer Sounds“, in: *Journal of the Acoustical Society of America*, 33 (1961), S. 909-916.
- UN Statistics Division, „Social Indicators“ (2006), online unter: <http://unstats.un.org/unsd/demographic/products/socind/default.htm>, zuletzt aufgerufen am 12.07.2011.
- Wallisch, Annette, *EEG plus Sonifikation. Sonifikation von EEG-Daten zur Epilepsiediagnostik im Rahmen des Projekts ‚SonEnvir‘*, Dissertation, Medizinische Universität Graz, 2007.
- Wedensky, N., „Die telefonische Wirkungen des erregten Nerven“, in: *Centralblatt für medizinische Wissenschaften*, 26 (1883).

Internetquellen

- <http://ni.www.techfak.uni-bielefeld.de/>
<http://sonenvir.at>
<http://sonenvir.at/data>
<http://sonenvir.at/data/eeg/>
<http://sonenvir.at/data/JugglingSounds/>
<http://sonenvir.at/data/logdata1/>
<http://sonenvir.at/data/wahlgesaenge>
<http://www.dcs.qmul.ac.uk/research/imc/icad2006/concert.php>
<http://www.dcs.qmul.ac.uk/research/imc/icad2006/proceedings/concert/index.html>
<http://www.gapminder.org/>
<http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2004/concert.htm>
<http://www.qcd-audio.at/>
<http://www.techfak.uni-bielefeld.de/ags/ami/>