Die Sonifikation des menschlichen EEG

Thomas Hermann und Gerold Baier

Aufbauend auf den vorhergehenden Beitrag über den Naturforscher als Hörer stellen wir nun vor, wie die neue Technologie der Sonifikation eine neuartige Wahrnehmung gesunder und krankhafter Körperrhythmen möglich macht.

Physiologische Rhythmen

Ein lebendiger Organismus wird auf vielen Zeitskalen von Rhythmen getragen. Wir sprechen hier von den physiologischen, körpereigenen, inneren Rhythmen. Diese Rhythmen werden auch endogen genannt. Sie sind auch in Abwesenheit äußerer Stimuli zu beobachten. Beispiele sind der Herzschlag oder die (unbewusste) Atmung. Beide sind einfach zu beobachten, weil Sich dabei Muskel an- und entspannen. Es gibt aber noch viele andere Rhythmen, die weniger offensichtlich, aber ebenso wichtig für das Wohlbefinden des Körpers sind. Dazu gehören die pulsatilen Ausschüttungen von Hormonen aus den entsprechenden Drüsen. Zum wuchsen Ratten langsamer, wenn die rhythmische Ausschüttung des Wachstumshormons in den Blutkreislauf unterbunden und das Hormon künstlich auf konstantem Niveau gehalten wurde. Rhythmische Schwankungen lassen sich auch bei vielen anderen Hormonen nachweisen, allerdings ist ihre Funktion nicht immer im Detail bekannt. Soweit wir aber wissen, ist das Hormonsystem als Ganzes ein konzertiertes System komplexer rhythmischer Interaktionen in Dienste der Koordination lebenswichtiger Funktionen in allen Organen.

Das am besten untersuchte System komplexer rhythmischer Organisation ist wohl die elektrische Aktivität des zentralen Nervensystems. Rhythmen finden sich hier ebenfalls auf vielen zeitlichen und räumlichen Skalen, meist transient und mit variablen Dauern. Wir wissen, dass diesen Rhythmen auf der Ebene einer einzelnen Nervenzelle elektrische Entladungen, die so genannten Aktionspotentiale zugrunde liegen. Wie sich aber durch die Interaktion unzähliger Aktionspotentiale die Rhythmen auf der Ebene des menschlichen Gehirns formen, wechselwirken und was genau ihre Funktion ist, ist bislang noch nicht im Einzelnen aufgeklärt. Während es im Tierversuch möglich ist, die verschiedenen Rhythmen direkt im Gewebe gleichzeitig an vielen Stellen zugleich zu messen, ist es oft schwierig, diese Ergebnisse ohne weiteres auf den Menschen anzuwenden. Wir sind erst am Anfang eines tieferen Verständnisses der rhythmischen Vielfalt im intakten menschlichen Gehirn.

Gut studiert ist die rhythmische Aktivität des menschlichen Elektroenzephalograms (EEG) im Bereich von 0.1 bis 20 Hertz. Seit ihrer Entdeckung und erstmaligen Beschreibung durch Hans Berger hat sich diese Messtechnik verbreitet und als nichtinvasive Methode zur Beobachtung der elektrischen Gehirntätigkeit bewährt. Durch das Ehepaar Frederic und Erna Gibbs und William Lennox wurde die Verbindung von EEG Rhythmen mit neurologischen Krankheiten erkannt. Besondere Bedeutung hat das EEG bei der Aufklärung von Schlafstörungen und bei den Epilepsien. In diesen beiden Fällen ist es gerade die Beobachtung und Klassifizierung von Rhythmen, die für die Diagnose genutzt.

Dennoch besteht das Problem, dass die Variabilität und die Flexibilität der abnormen Rhythmen im EEG hoch ist. Die gleichzeitige Aufzeichnung von 19 oder mehr Messkanälen auf einem Bildschirm, wie in der Neurologie bei Routinemessungen üblich, ist geeignet um Frequenzen gut abschätzen zu können. Aber sie ist nicht optimal für die Beobachtung anderer Eigenschaften. Insbesondere, wenn man den Stärke von Korrelationen oder Beziehungen zwischen den einzelnen Messungen per Auge zu schätzen versucht, wird man leicht fehlgeleitet, wenn die Rhythmen schneller sind als etwa 6 Hz. Für ein geschultes Ohr ist so eine Abschätzung viel einfacher und zuverlässiger. Dies ist nur ein Beispiel, aber es belegt die allgemeine Aussage, dass visueller und akustische Wahrnehmung in vieler Beziehung komplementär arbeiten und sich so bei schwierigen Aufgaben gut ergänzen können. Genau diese Eigenschaft wollen wir gezielt nützen, wenn wir im folgenden die Vertonung von Rhythmen im EEG vorschlagen und demonstrieren.

Die wissenschaftliche Vertonung von experimentellen Daten

Die technische Lösung, experimentelle Daten hörbar zu machen, heißt Sonifikation. Wir meinen mit Sonifikation die nachvollziehbare Klangsynthese aus experimentellen Daten mit dem Ziel einer wissenschaftlichen Interpretation. Die Klangsynthese ist heute in aller Regel digital, analoge Verfahren (wie der Geigerzähler, der die Intensität radioaktiver Strahlen in die Frequenz eines hörbaren Tons umsetzt) sind kaum noch gebräuchlich. Damit ist das Verfahren beliebig anwendbar, denn “Daten” kann natürlich im Prinzip alles sein, was in einem digitalen Computer gespeichert ist. Wir schränken uns hier also gezielt ein, wenn wir nur an Patienten vorgenommene physiologische Messungen besprechen. Die oben erwähnte Audifikation von Daten kann als Spezialfall der Sonifikation aufgefasst werden, bei der keine weiteren Klangsyntheseschritte zwischen die Daten und der Bewegung einer Lautsprechermembran geschaltet sind.

Eine kurze Diskussion verdient der Punkt “mit dem Ziel einer wissenschaftlichen Interpretation”. Dadurch werden die möglichen Verfahren der Klangsynthese eingeschränkt, aber man gewinnt gleichzeitig ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des besten Verfahrens. Das ist wichtig, denn zunächst einmal wird die Klangsynthese willkürlich sein, erst das Ziel entscheidet über ihre Güte. Zudem wird mit diesem Zusatz eine Verwechslung der Sonifikation mit digitaler Komposition, der Erzeugung von Musik, vermieden. Man mag das Produkt einer Sonifikation unter musikalischen oder musikästhetischen Gesichtspunkten hören, aber das ist nicht ihre Intention. Die Sonifikation vermeidet zum Beispiel alles, was den Prozess der Klangsynthese in den Vordergrund stellen könnte. Auch der Einfluss der Persönlichkeit des Programmierers der Klänge darf nicht durchklingen. Und: wird eine Sonifikation eines Datensatzes noch einmal (an gleicher oder anderer Stelle) durchgeführt, muss das Ergebnis gleich sein. Wenn das Resultat anders klingt, muss das auf eine bewusste Veränderung der Synthesetechnik zurückzuführen sein.

Das Gebiet der wissenschaftlichen Sonifikation wurde mit einer Tagung im Jahre 1992 in Santa Fe in Neu Mexiko begründet. Aus dieser Tagung formierte sich ein internationaler Forscherverbund, die “International Community for Auditory Display”, oft als ICAD abgekürzt. Seither gibt es eine wachsende Anzahl von interdisziplinär arbeitenden Wissenschaftlern, die immer neue Verfahren der Klangsynthese von Daten entwickeln und in verschiedensten Anwendungen erproben. Die Anwendungen reichen dabei von akustischen Kommandos für Mobiltelefone, dem Hören von Elektrosmog, über akustische Spiele für Kinder bis hin zu Vertonungen medizinischer Daten.

Wir besprechen im folgenden Beitrag auf einige Anwendungen, bei denen die Unterscheidung von gesunder und abnorm veränderter Physiologie im Vordergrund steht. Wir glauben, dass in diesem Fall am auffälligsten wird, warum das Hören in den Naturwissenschaften und in der Medizin zu Recht einen prominenten Platz beanspruchen kann.

Die Sonifikation physiologischer Rhythmen

Rhythmen mit einer Frequenz zwischen 0.1 und 20 Hz können in einfacher Weise direkt hörbar gemacht werden [Baier, 2001]. Aufbauend auf dieser Grundidee haben wir ein Verfahren entwickelt, um Rhythmen im menschlichen EEG in Echtzeit zu vertonen. Die Charakteristik der hörbaren Klänge gibt dabei Aufschluss über wichtige Eigenschaften der Daten. Der

Zeitpunkt des zu hörenden Klangs ist dabei durch den Zeitpunkt des höchsten Ausschlags im EEG bestimmt, die Dauer eines Klangs wird durch den Abstand einer Ausschlags vom vorhergehenden Ausschlag kontrolliert, die Höhe des Ausschlags bestimmt die Lautstärke des Klangs. Die Tonhöhe des gewählten Klangs ist im Folgenden willkürlich gewählt. Durch den Einsatz von festgelegten oder variablen Schwellenwerten können kleine und schwache Ausschläge unterdrückt werden. Dies ist vorteilhaft, wenn man gezielt nach pathologischen Veränderungen der rhythmischen Aktivität sucht. Um dem Hörer die Orientierung zu erleichtern, wird die räumliche Position der Messelektrode auf der Kopfhaut dargestellt: die Stereoposition des Klangs gibt an, wie weit links oder rechts vom Scheitel sich eine Elektrode befindet. Elektroden auf dem Scheitel sind genau in der Mitte zwischen den Stereopositionen zu hören. Um die Position zwischen Stirn und Nacken wahrnehmen zu können, wurde die Tonhöhe systematische variiert: Elektroden auf der Stirn haben den höchsten Ton, im Nacken den tiefsten. Dazwischen sind die Tonhöhen gleichmäßig in kleinen Terzen abgestuft. Die Methode ist an anderer Stelle im Detail beschrieben [Baier, Hermann, Stephani, 2007].

Die Sonifikation von EEG Rhythmen

Das menschliche Gehirn arbeitet mit elektrischen Signalen. Biochemische Prozesse erzeugen elektrische Potenziale in den Nevenzellen und chemische Susbtanzen, die sogenannten Neurotransmitter, übertragen die Information, die in den elektrischen Signalen steckt, von Zelle zu Zelle. Aber auf der Ebene von größeren Zellverbänden und dem Gehirn als Ganzen ist es die raumzeitliche Organisation der elektrischen Signale, die die Informationsverarbeitung im Gehirn am besten repräsentiert. Die Messung dieser Signale dient daher der Beurteilung der Gehirnphysiologie.

Die erste Veröffentlichung über die elektrische Aktivität des menschlichen Gehirns stammt aus dem Jahr 1929. Der deutsche Psychiater Hans Berger hatte mehrere Jahre in seinem Labor in Jena Untersuchungen an Kriegsverletzten, Patienten und seinen eigenen Kindern angestellt und war zu dem Schluß gekommen, daß bestimmte Potenziale auf der Kopfhaut im Wesentlichen auf der Aktivität von Nervenzellen im Gehirn beruhen und von Effekten der Muskelkontraktion oder des Blutflusses separiert werden können. Die darauf beruhende Meßmethode, das Elektroenzephalogramm (bei Berger noch "Elektroenkephalogramm") entwickelte sich anfangs zögerlich, ab dem zweiten Weltkrieg aber rasant zur wichtigsten Routinemethode in der Neurologie.

Das Prinzip der Messung ist einfach: Elektroden werden direkt auf die Kopfhaut aufgebracht und mit einem Meßverstärker verbunden. Die Differenz zwischen den Signalen an zwei Orten wird dann als Potenzial registriert. In der Regel werden zwischen 19 und 64 Elektroden gleichzeitig angelegt und mit einer Rate zwischen 100 und 500 Potenziale pro Sekunde über einen Zeitraum von einigen Minuten bis zu mehreren Tagen am Stück gemessen. Die so erhaltenen Daten, genannt das EEG, werden dann meist visuell ausgewertet.

Wir besprechen als erstes das Klangbeispiel Sound 1. Es ist mit der Aufzeichnung normaler Gehirnaktivität eines gesunden Probanden entstanden. Die Daten umfassen 19 gemessene Elektroden und wurden vor der Klangsynthese nicht weiter vorverarbeitet. Die Augen des Probanden waren bei der Messung geöffnet. Abbildung 1 zeigt eine typische Messkurve einer Elektrode und die Wellenform und das Spektrogramm des entstandenen Klangs.

Die rhythmische Aktivität ist kontinuierlich, wenig differenziert und wirkt verwirrend. Es drängt sich der Eindruck von Zufall auf. Bei genauerer Analyse lassen sich zwar einige probandentypische Merkmale wie wiederkehrende rhythmische Gruppenbildungen entdecken, doch der hohe Grad an Zufälligkeit bestätigt sich auch bei intensivem Hören.

Im starken Kontrast hierzu steht eine bestimmte Form epileptischer Aktivität, wie sie häufig bei Kindern beobachtet werden kann. Die so genannten Absenzen werden im EEG begleitet von einem koordinierten Rhythmus mit einer Frequenz von etwa 3 Komplexen pro Sekunde. Ein Komplex ist dabei zusammengesetzt aus einem kurzen und einem längeren Ereignis. Zusammen bilden die zwei Ereignisse ein Motiv. Kennzeichnend ist, dass im EEG dass selbe Motiv in unterschiedlicher Ausprägung auf praktische allen Kanälen zu beobachten ist. Unser Klangbeispiel Sound 2 ist die Sonifikation einer Absence. Normale Hintergrundaktivität wurde dabei unterdrückt, damit sich der Hörer auf den abnormen Rhythmus konzentrieren kann. Abbildung 1 zeigt eine typische Messkurve einer Elektrode und die Wellenform und das Spektrogramm des entstandenen Klangs.

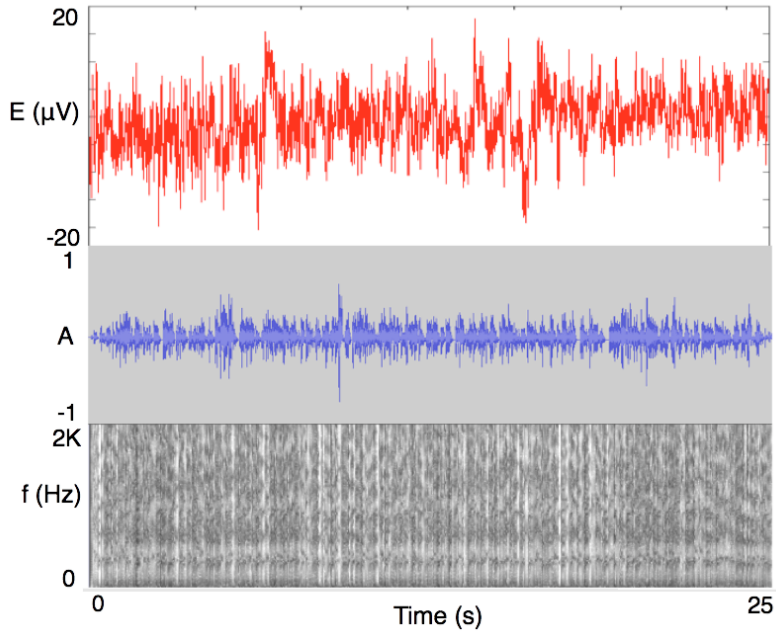

Abbildung 1: Repräsentative Zeitreihe (oben), Wellenform des Klangs (Mitte) und Spektrogramm (unten) eines EEG Segments mit normaler Gehirnaktivität. E elektrisches Potenzial; A Amplitude; f Frequenz.

Der Anfall beginnt nach etwa 10 Sekunden, er ist durch die harten lauten Schläge leicht zu erkennen. Auffällig ist, dass die Frequenz und Intensität der Schläge während des Verlaufs der Attacke abnimmt. Gut zu hören ist auch eine Umgruppierung der Rhythmen von verschiedenen Elektroden während der Attacke. Diese Form der Epilepsie hebt sich mit hören typischen und meist stereotypen Merkmalen markant vom Hintergrund ab. Die rhythmische Umorganisation des normalen Hintergrund-EEG in die Epilepsie ist mit der Sonifikation intuitiv mitzuverfolgen.

Das dritte Klangbeispiel, Sound 3, wurde aus der Aufzeichnung eines Schlaf-EEG synthetisiert. Hier wurden Schwellen so gesetzt, dass vor allem die Aktivität mit einer Frequenz im Bereich von 10-14 Hz deutlich wird. Dadurch werden die so genannten Schlafspindeln hörbar. In Echtzeit ist zu hören, dass sie kurze rhythmische Ausbrüche sind, die von verschiedenen Elektrodengruppen getragen werden. Wegen der kurzen Dauern und vergleichsweise stabilen mittleren Frequenz sind sie für das Ohr schnell als auffällige akustische Gestalten zu erkennen. In unserer Sonifikation wird durch die Wahl der Tonhöhen für die einzelnen Kanäle auch die „harmonische“ Struktur erkennbar, die Zusammensetzung der Tonhöhen innerhalb einer Schlafspindel. In den am stärksten ausgeprägten Schlafspindeln ist auch der Eindruck einer laufenden Welle von Aktivität

wahrzunehmen, ein Eindruck, der durch detaillierte neurophysiologische Untersuchungen bestätigt wird.

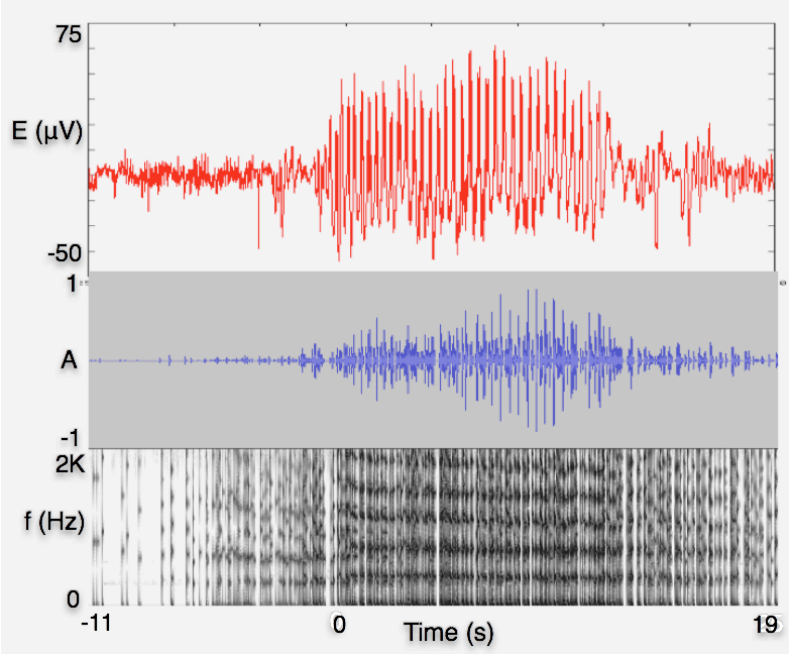

Fig. 2: Repräsentative Zeitreihe (oben), Wellenform des Klangs (Mitte) und Spektrogramm (unten) eines EEG Segments mit einer Absence. Der Anfall beginnt bei 0 und endet bei 12 Sekunden.

Die Sonifkation ermöglicht eine klangliche Darstellung von gemessenen Daten, die deren Struktur angemessen wiedergibt. Je nach Technik der Klangsynthese können verschiedene Merkmale betont und hörbar gemacht werden. Selbstverständlich sind diese Verfahren auch auf anderes Datenmaterial anwendbar. Wir erwähnen lediglich, dass Sonifikationen auch schon von elektrischer Muskelaktivität, von Herztätigkeit, und verschiedener Parameter während der Anästhesie entstanden sind. Es wurde mehrfach betont, dass hörbare Darstellungen physiologischer Vorgänge vor allem bei der Überwachung, zum Beispiel im klinischen Umfeld, mit Erfolg eingesetzt werden können.

Abschluss

Die Sonifikation ist ein neuer Ansatz, um die komplexe Dynamik biomedizinischer Daten kompakt darzustellen. Wir haben uns hier auf die Darstellung physiologischer Rhythmen als besonders eindrückliches Beispiel konzentriert. Einfache und periodische Rhythmen sind in graphischer

Darstellung ebenso gut zu sehen wie sie in der Vertonung zu hören sind. Doch sind einfache Rhythmen in der Physiologie des Menschen und besonders in der Aktivität des Gehirns die grosse Ausnahmen. Und die Tatsache, dass man sich in der Vergangenheit vorwiegend auf nur eine, isolierte rhythmische Tätigkeit konzentriert hat, kann nicht vergessen machen, dass wir es in der Regel mit einer Vielzahl von gleichzeitig ablaufenden und interagierenden Rhythmen zu tun haben. Durch die neuen erweiterten Möglichkeiten der Messtechnik sind wir in der Lage, mehrere und viele Rhythmen zugleich aufzuzeichnen und wir versuchen jetzt, sie nicht mehr nur isoliert, sondern als komplexes rhythmisches Geflecht zu verstehen. Dafür werden neue Methoden benötigt und die Sonifikation kann den Gültigkeitsbereich der visuellen Verfahren sinnvoll und erheblich erweitern. Menschliche Beobachter verknüpfen im Alltag intuitiv visuelle und auditive Wahrnehmungen. In ihrer Rolle als Naturforscher werden sie die akustische Unterstützung ebenso hilfreich finden. Mit entsprechender Schulung wird mit der Sonifikation die Entdeckung neuer Phänomene durch das Hören möglich.

Dank

Wir danken Prof. Dr. Ulrich Stephani, Dr. Hiltrud Muhle und Dr. Gert Wiegand vom Universitätsklinikum Schleswig-Holstein in Kiel, für die Kooperation bei der Datenanalyse und die neurologische Beratung in allen Fragen abnormer Gehirnaktivität.

Verzeichnis der Klänge

Die im Text besprochenen Sonifikationen können im Internet unter www.sonification.de/publications gehört werden.

Sound 1: Echtzeit-Sonifikation eines Segments normaler Gehirnaktivität. Aufzeichnung eines 19 Kanal Standard-EEG. Dauer des Beispiels: 25 Sekunden.

Sound 2: Echtzeit-Sonifikation eines Segments epileptischer Gehirnaktivität. Aufzeichnung eines 19 Kanal Standard-EEG mit 3/s Rhythmus einer typischen Absence auf allen Kanälen. Dauer des Beispiels: 30 Sekunden.

Sound 3: Echtzeit-Sonifikation eines Segments mit Gehirnaktivität während Schlafphase 2. 27 Kanal-EEG mit Schlafspindeln in einigen Kanälen. Dauer des Beispiels: 22 Sekunden.

Literatur und Leseempfehlungen

G. Baier, *Rhythmus – Tanz in Körper und Gehirn*. Rowohlt Verlag, Reinbek bei Hamburg, 2001. Mit Audio-CD: S. Sahle und G. Baier, Rhythmus. 16 tracks.

G. Baier, T. Hermann, U. Stephani, Event-based Sonification of EEG Rhythms in Real Time. Clin. Neurophysiol. **118**, 1377-1386 (2007).

G. Kramer, An Introduction to Auditory Display, in: Kramer G (Hrsg.) Auditory Displays – Sonification, Audification and Auditory Interfaces. Addison Wesley, Reading, 1994.

Literarisch wird die Idee der hörenden Welterfahrung von Herbert G. Wells in der Geschichte „Das Tal der Blinden“ thematisiert. In: H.G. Wells, Das Kristall-Ei. DTV, München, 1998.