

ABB. 1 Synchronisationsprozesse bei der akustischen Wahrnehmung. Niederfrequente Schallsignale werden durch synchronisierte neuronale Signale weitergeleitet und verarbeitet (Periodizitätsprinzip). Die Synchronisation von Metronomen ist ein Basismodell für diesen Prozess. Für hochfrequente Schallsignale versagt das Periodizitätsprinzip. Hohe Frequenzen werden nicht zeitlich, sondern als eine Ortsempfindung repräsentiert (Ortsprinzip).

Experimente zum Hören und Nachdenken

Kreative Uhren in unserem Kopf

MANFRED EULER

Wie kommt die Welt in unseren Kopf? Nach welchem Code werden die Signale aus der Außenwelt in unserem Nervensystem verschlüsselt? Was ist die Sprache unseres Gehirns? Um sich diesen Fragen zu nähern, muss man nicht unbedingt mit aufwändiger Technik ins Gehirn blicken und seine Aktivität analysieren. Was man im Rahmen von akustischen Wahrnehmungsexperimenten hören kann, verrät bereits einiges über die Funktionsprinzipien unseres Denkkorgans.

Raum ist ein Schwärmen im Auge;

Zeit ein Summen im Ohr;

Vladimir Nabokov

In diesem Artikel werden Hörexperimente vorgestellt, die sich am Heimcomputer einfach durchführen lassen. Die Versuche demonstrieren die Bedeutung neuronaler Prozesse, welche die zeitliche Struktur akustischer Signale bei niedrigen Frequenzen abbilden. Diese neuronalen Periodizitätsprozesse spielen für unsere Sprach- und Musikwahrnehmung eine zentrale Rolle. Sie lassen sich sehr gut im Modell synchronisierter Uhren verstehen, das in BIUZ 3/2004 diskutiert worden ist [5]. Bei den in dieser Ausgabe vorgestellten Experimenten blicken wir gewissermaßen aus der Innensicht auf die im vorigen Heft beschriebenen „kreativen Uhrwerke“; wir erleben und reflektieren adaptive dynamische Prozesse, die in unseren Köpfen Wirklichkeit konstruieren. In Abbildung 1 wird das schematisch gezeigt.

Für die Durchführung der Experimente benötigt man einen Computer, ausgestattet mit Soundkarte, Mikrophon und Lautsprecher. Außerdem ist ein geeignetes Audio-Editierprogramm erforderlich. Es wird hier das Programm „Cool-Edit“ benutzt, das die Aufnahme von Schallsignalen und deren Frequenzanalyse erlaubt. Das Programm wird nun von Adobe vertrieben [2]. Die einzelnen Frequenzkomponenten von Sprache oder Musik lassen sich damit ermitteln und in Abhängigkeit von der Zeit darstellen. Darüber hinaus kann man die Signale gezielt wandeln, indem man beispielsweise die Frequenzspektren verändert oder die Aufnahme mit veränderter Geschwindigkeit abspielt. Die notwendigen Schritte zur Bearbeitung der akustischen Reize stehen im Kasten auf Seite 250.

Eine akustische Reise in die Zwergenwelt

Die Reise zu den Funktionsprinzipien unseres Gehirns beginnt in einem literarischen Kontext. Jonathan Swifts bekannter Romanheld Gulliver reist zu den Liliputanern. In deren Zwergenwelt ist alles wie bei uns: dieselben Intrigen, Machtspiele, Kriege. Lediglich die Größenverhältnisse sind dort anders: Die Liliput-Menschen sind in allem um ziemlich genau den Faktor 12 verkleinert. Mit dem Kunstgriff der Größentransformation versucht Swift, die Relativität der menschlichen Erfahrung zu verdeutlichen. Die entscheidende Pointe des Romans könnte man auf den Punkt bringen: „Alles ist irgendwie relativ“. Genauso hat kürzlich ein Bestseller Einsteins Relativitätstheorie, allerdings leider gänzlich unzutreffend, zusammengefasst [9]. Die entscheidenden Perspektiv-



ABB. 2 Gulliver hört einem Liliputaner zu. Kann der als sprachgewandt geschilderte Gulliver die akustischen Signale der um den Faktor 12 kleineren Menschen überhaupt adäquat verarbeiten und verstehen?

ARBEITSSCHRITTE IM PROGRAMM „COOL EDIT“

Abfolge von Menüpunkten zum Durchführen der Experimente

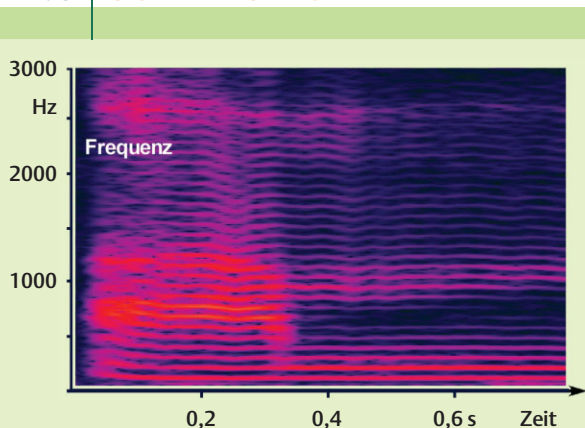
- Experiment 1: Transform → Time/Pitch → Stretch
→ passenden Streckungsfaktor einstellen.
- Experiment 2: Transform → Filters → FFT Filter
→ die jeweilige Filterkurve kann nun grafisch eingestellt werden.
- Experiment 3: Analog zu Experiment 1.
- Experiment 4: Analog zu Experiment 2.

tiven sind andere: Was ist relativ und wo gibt es Absolutes, Invariantes? Wodurch setzt die Natur harte Grenzen?

Gulliver, so der Roman, ist sehr sprachbegabt, und ihm gelingt es binnen weniger Wochen, die Liliputansprache zu erlernen (Abbildung 2). Wie würde sich ein solcher Zwerg anhören, wenn man annimmt, dass seine Sprache ebenso wie bei uns produziert wird?

Sprache basiert physikalisch auf den Schwingungen der Stimmbänder und dem Mitschwingen (Resonanz) von Hohlräumen. Bei einer Verkleinerung der geometrischen Abmessungen um den Faktor 12 werden die relevanten Frequenzen um den gleichen Faktor vergrößert. Wir erwarten eine Art Mickymaus-Effekt, wie er bei Trickfilmen oder zu schnell laufenden Schallplatten auftritt. Doch kann Gulliver die Sprache der Mini-Menschen überhaupt adäquat verarbeiten und verstehen? Das folgende Experiment schafft Klarheit.

ABB. 3 | SICHTBARE SPRACHE



Zeitlicher Verlauf der Frequenzen des Wortes „am“. Die Helligkeit ist ein Maß für die jeweilige Intensität. Man erkennt neben der Grundfrequenz bei circa 100 Hz (unterste Linie) die einzelnen Oberschwingungen (Harmonischen). Die drei Formantbereiche des Vokals „a“ liegen bei etwa 750 Hz, 1200 Hz und bei 2500 Hz.

Experiment 1: Man nimmt einige Sätze mit dem Computer auf und wandelt sie in die Sprache eines hypothetischen, zwölfmal kleineren Menschen um, indem man die Tonhöhe um den Faktor 12 nach oben dehnt (siehe Kasten links). Kann jemand, der die Original-Sätze nicht gehört hat, die so erzeugte „Liliputaner-Sprache“ verstehen?

Genau genommen müsste man die Liliputaner nicht nur höher, sondern auch schneller sprechen lassen, doch diese Feinheit soll hier nicht berücksichtigt werden. Die Sprache klingt tatsächlich wie Mäusepfeifen. Man erahnt die Satzmelodie, aber das Gesprochene bleibt unverständlich. Die Sprache der Liliputaner-Welt wäre, auch wenn sie nach den gleichen Prinzipien wie unsere eigene erzeugt würde, ohne zusätzliche technische Hilfsmittel unverständlich.

Science-fiction ade: Wir verstehen keine Mini-Menschen

Gullivers phantastische Reise zu den kleinen Menschen und zu den Riesen ist schon in Bezug auf die Kommunikation zum Scheitern verurteilt, ganz zu schweigen von anderen physikalischen und biologischen Grenzen. Ebenso gehören klein geschrumpfte Kinder ins Reich der Fiktion wie Tauchfahrten in einem maßstäblich verkleinerten U-Boot in das Innere des menschlichen Körpers. Wieso ist es unmöglich, die transformierte Sprache zu verstehen, und was lernen wir aus dem Versuch über die Funktionsweise von Gehör und Gehirn?

Die Lieblingsbegründung von Studierenden aus einem meiner Physik-Seminare bezieht sich auf die Tatsache, dass wir ganz hohe Töne nicht hören können. Alle Frequenzen der transformierten Sprache sind um den Faktor 12 nach oben verschoben. Dadurch werden Signale in den Frequenzbereich über 15 kHz verlagert, der von den meisten und insbesondere von älteren Menschen nicht mehr wahrgenommen wird. Uns fehlt demnach Information, die im oberen Frequenzbereich durch die beschränkte Übertragungsfunktion unseres Ohres nicht weitergegeben wird. Manche Studenten begründen noch genauer: Der charakteristische Klang von Vokalen wird durch die Formanten bestimmt. Das sind Frequenzbereiche, bei denen durch Resonanzprozesse im menschlichen Vokaltrakt eine höhere Leistung abgestrahlt wird und die daher lauter klingen. In Abbildung 3 sind die Formantbereiche durch hellere Linien (d.h. größere Intensitäten) erkennbar. Einige Formantbereiche der menschlichen Stimme liegen zwischen 2-3 kHz. Sie werden bei den transformierten Signalen in den Bereich zwischen 24-36 kHz verschoben und bleiben somit unhörbar. Beide Begründungen klingen äußerst plausibel, doch treffen sie den Kern des Problems?

Welche Frequenzen tragen zum Verstehen von Sprache bei?

Die Hypothesen der Studenten kann man leicht testen, indem man unserem Gehör gefilterte Sprache anbietet, bei welcher ein entsprechender Teil des Spektrums im hohen

Frequenzbereich fehlt. Dies lässt sich durch das Setzen eines geeigneten Filters im Audio-Editor-Programm erreichen.

Experiment 2: Man filtert aus einer Sprachaufzeichnung alle Frequenzen über 1000 Hz heraus. Obwohl die Aufnahme nun sehr dumpf klingt, ist die Sprache dennoch einigermaßen verständlich.

Der Versuch zeigt: Es sind nicht die fehlenden hohen Frequenzen, die ein Verstehen der Sprache unmöglich machen. Die abgeschnittenen oberen Formantbereiche beeinflussen zwar die Deutlichkeit, die Färbung und den Klang der Sprache, doch ihr Fehlen ist nicht unbedingt kritisch für das Verständnis des Gesprochenen.

Vokale und Konsonanten sind (nahezu) periodische Signale. Sie lassen sich mathematisch aus periodischen Sinusschwingungen zusammensetzen, deren Frequenzen Vielfache einer gemeinsamen Grundfrequenz sind (Abbildung 3). Daher sieht das Spektrum von (quasi)periodischen Sprachsignalen wie eine Leiter aus; die Grundfrequenz ist die tiefste Sprosse und die aufsteigenden „Sprossen“ verlieren sich allmählich nach oben, da ihre Intensität abnimmt.

Die Grundfrequenzen der Sprache liegen je nach Geschlecht und Alter im Bereich von 100 Hz bis 250 Hz. Führt man eine Frequenztransformation mit dem Liliputanerfaktor 12 durch, so verschieben sich die Grundfrequenzen auf über 1 kHz. Unser Gehirn ist offensichtlich mit einer sprachlichen Analyse dieser Signale überfordert. Wie weit kann man die Frequenzen von Sprache nach oben transformieren, bis sie nicht mehr zu verstehen ist?

Experiment 3: Man transformiert die Frequenzen von Sprachsignalen um die Faktoren 2, 4, 6, 8, 10 und testet, ob man der so umgewandelten Sprache geistig folgen kann.

Je nach Grundfrequenz der Sprache verliert sich die Verständlichkeit bei einem Transformationsfaktor von ungefähr 6 bis 8. Bezogen auf die Grundfrequenzen der Signale bedeutet das: Liegen diese über circa 800 bis 1000 Hz, dann kann unser auditorisches System die Signale sprachlich nicht mehr interpretieren. Offenbar spielen die tiefen Grundfrequenzen eine ganz wesentliche Rolle für die Verarbeitung von Sprache. Was kann man aus dieser Tatsache über die „Sprache“ unseres Gehirns lernen?

Periodizitätsprinzip und Uhrensynchronisation

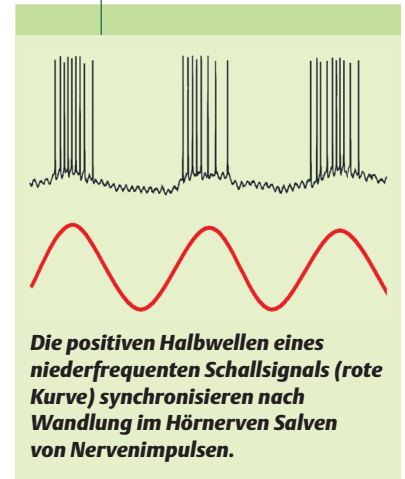
Alle Informationen aus der Außenwelt werden über neuronale Entladungsmuster intern repräsentiert. Ein einzelnes Neuron überträgt Signale nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip. Es kennt nur zwei Zustände: feuern oder nicht feuern. Verglichen mit einem Metronom, das regelmäßig tickt, ist das spontane Feuern von Neuronen eher mit einer schlecht gehenden Uhr vergleichbar, einer Uhr, deren Takt durch das ► thermische Rauschen der Umgebung unregelmäßig beeinflusst wird. Wie kann ein derartiges System eine kontinuierliche Welt repräsentieren? Es kann einerseits seine Impulsrate in Abhängigkeit von der Reizstärke ändern. Diese Wandlung von Reizstärke in die (mittlere) neuronale

Impulsrate ist die Standard-Codierung, wie sie in Lehrbüchern beschrieben ist. Darüber hinaus können Neuronen auch die zeitliche Struktur von Reizen abbilden. Ähnlich wie die synchronisierenden Metronome können sie ihren Takt an ein sich zeitlich veränderndes erregendes Signal anpassen.

Im Bereich niedriger akustischer Frequenzen werden die neuronalen Entladungsmuster des Hörnerven vom akustischen Signal synchronisiert. Das Feuern einzelner Neuronen des Hörnerven erfolgt im Gleichtakt mit dem erregenden Schallsignal (Abbildung 4). Die Überlagerung der Entladungsmuster vieler Neuronen bildet die zeitliche Struktur des akustischen Reizes ab. Jede Halbwelle eines ► Sinustons kann einzelne Salven auslösen, was zu einem quasiperiodischen Impulsmuster führt. Diese Muster sehen ganz ähnlich aus wie das Klicken der synchronisierten Metronome (vgl. Abbildung 2 in [5]). Durch neuronale Synchronisationsprozesse im auditorischen System wird so die zeitliche Struktur des Reizes übertragen.

Die Information steckt dabei nicht in der Impulsrate, sondern in der Phase, im Entladezeitpunkt der einzelnen Impulse. Dieser Prozess der Phasenkopplung wirkt beim Menschen bis hinauf zu etwa 1000 Hz. Allerdings wird mit zunehmender Signalfrequenz die Synchronisation der Reize immer schlechter. Es kann bei einzelnen Neuronen über mehrere Perioden hinweg zu Aussetzern kommen.

ABB. 4 NEURONALE SYNCHRONISATION



Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar erklärt.

GLOSSAR

diskrete Systeme: Systeme, die sich nur stufenweise „in gleichen Portionen“ verändern können.

Einhüllende: Kurve, die sich an die Maximalwerte einer Schar von Kurven anschmiegt.

Hochpassfilter: Ein Filter, das alle Frequenzen über einer Grenzfrequenz durchlässt.

Oberschwingungen: Komponenten eines periodischen Signals, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind.

prästabilisierte Harmonie: In der Leibniz'schen Philosophie die perfekte Abstimmung von Geist und Körper ohne physische Wechselwirkung.

Sinuston: Ein periodisches Signal, das nur eine einzige Frequenz enthält.

thermisches Rauschen: Schwankungserscheinungen, die durch die Wärmebewegung von Teilchen hervorgerufen werden.

Vibrati: Quasiperiodische Änderungen der Tonhöhe (und zum Teil auch der Lautstärke) eines gespielten oder gesungenen Tons.

Wanderwellenprozess: Frequenzerlegung im Innenohr durch eine in eine Richtung laufende Welle.

Außerdem ist die genaue Phasenlage durch Rauschprozesse „verschmiert“. Nur die Mittelung über eine größere Zahl von Neuronen ergibt ein annähernd periodisches Muster (vgl. [3]).

Bei langsam veränderlichen akustischen Signalen ist demnach das neuronale System in der Lage, der zeitlichen Struktur des Signals zu folgen. Dies ist das so genannte Periodizitätsprinzip des Hörens. Akustische Signale werden in ihrer zeitlichen Struktur vom neuronalen System praktisch in „Realzeit“ repräsentiert. Ein (tieffrequentes) periodisches Signal wird in ein neuronales Erregungsmuster umgesetzt, das die gleichen Grundfrequenzen enthält. Jenseits einer Grenze von circa 800 bis 1000 Hz kann das neuronale System nicht mehr folgen. Die zeitliche Struktur im Bereich der Grundfrequenzen wird nicht mehr im Nervensystem repräsentiert.

Die nach oben gestreckten Frequenzen der Liliutaner-Sprache befinden sich außerhalb des Bereichs, in dem die Periodizitätsanalyse arbeitet. Die neuronalen Signale der Hörbahn werden nicht mehr synchronisiert. Mit der fehlenden Periodizität bricht ein wesentlicher Kanal der Repräsentation akustischer Signale weg. Unser Gehirn (und

damit auch sehr wahrscheinlich das von Gulliver) ist mit dem Verstehen dieser Sprache überfordert. Die Satzmelodie ist, wenn auch stark verfremdet, noch nachvollziehbar, doch die Botschaft ist nicht mehr verständlich: Die neuronalen „Uhren“ ticken nicht schnell genug.

Nicht nur die Sprache, sondern auch unser Musikempfinden beruht wesentlich darauf, dass in unserem Gehirn frequenzgekoppelte neuronale Muster im Bereich der jeweiligen Grundfrequenzen in Realzeit vorhanden sind. Liliutaner-Musik ist ganz entsprechend nicht unbedingt ein Ohrenschaus. Diesbezügliche Experimente anzustellen sei dem Leser überlassen.

Das Ergebnis scheint der üblichen Harmonielehre zu widersprechen, denn eine Melodie kann man bekanntlich transponieren. Die Transposition entspricht dabei der Multiplikation aller Frequenzen mit einem konstanten Faktor. Liliutaner-Musik müsste vermutlich anders komponiert und orchestriert werden, wie uns die hochfrequente, aber dennoch wohlklingende Vogelstimmen-Musik zeigt.

Fast Zauberei: Geisterhafte Grundtöne ergänzen

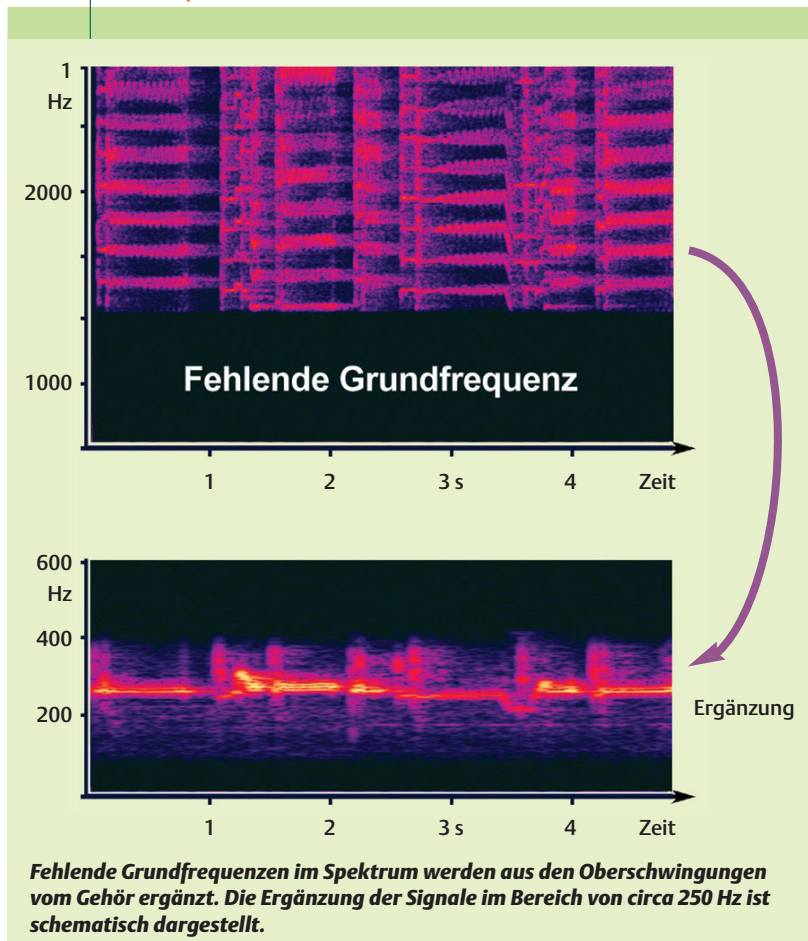
Das Periodizitätsprinzip ist eine Säule unseres Hörsystems. Ein weiteres Experiment zeigt jedoch, dass wir mit der Synchronisation von neuronalen Signalen und dem darauf aufbauenden Periodizitätsprinzip noch nicht alle relevanten Funktionsprinzipien unseres Gehörs ergründet haben.

Experiment 4: Man definiert ein geeignetes Hochpassfilter, das nur Frequenzen über 1000 Hz durchlässt. Dieses Filter wendet man auf Sprach- oder Musikaufnahmen an. Nach den vorhergehenden Überlegungen würde man erwarten, dass man die Sprache nicht versteht und die Melodie nicht heraushört, weil alle Frequenzen unter 1 kHz fehlen. Doch die gefilterte Aufnahme klingt nur „dünner“, man kann die Signale richtig interpretieren. Man versteht das Gesprochene und erkennt die Grundtöne einer Melodie, obwohl im Spektrum die entsprechenden Grundfrequenzen fehlen. Man ist in der Lage, die fehlenden Grundfrequenzen herauszuhören, obwohl sie physikalisch gar nicht vorhanden sind.

Das Wahrnehmungsexperiment gibt uns eine harte Nuss über das Wesen von Wahrnehmung und Wirklichkeit zu knacken. Wie „wirklich“ und wie „faktisch“ ist das, was uns ganz offensichtlich und selbstverständlich erscheint?

Was unser Gehör bei dieser geisterhaften Ergänzung leistet, lässt sich an einem gefilterten Spektrum klar machen. Abbildung 5 zeigt das Spektrum einer Musikaufnahme, bei der die „Frequenzleiter“ der Oberschwingungen für die einzelnen Töne gut erkennbar ist. Die „Leiterstufen“ der tiefen Frequenzen sind jedoch herausgefiltert worden. Es handelt sich um ein Violinkonzert, und man sieht in den Harmonischen sehr schön die Vibrati der Solistin (A.S. Mutter). Das auditorische System stellt die Ganzheit des Klanges wieder her. Es „bastelt“ gewissermaßen aus den oberen Leiterstufen (Oberschwingungen im Spektrum) die fehlenden Grundfrequenzen zusammen. Diese Konstruk-

ABB. 5 | HÖREN, WAS PHYSIKALISCH NICHT EXISTIERT



Fehlende Grundfrequenzen im Spektrum werden aus den Oberschwingungen vom Gehör ergänzt. Die Ergänzung der Signale im Bereich von circa 250 Hz ist schematisch dargestellt.

tion fällt uns visuell und manuell relativ leicht. Im Frequenzspektrum lässt sich die „Leiter“ einfach nach unten extrapolieren, doch wie macht es das Ohr?

Um dieses Rätsel aufzulösen, betrachten wir die Funktionsprinzipien des Hörens im Rahmen einer „See-Metapher“. Diese wird auch den Unterschied zwischen Frequenz und Periodizität weiter aufklären, zwei Begriffe, die physikalisch eigentlich etwas Gleichwertiges ausdrücken. Die Frequenz f in Hertz ist nichts als der Kehrwert der Periodendauer T in Sekunden: $f=1/T$. Warum ist für ein tieferes Verständnis des Hörens eine Unterscheidung nötig?

Hören als inneres Sehen

Stellen Sie sich vor, Sie hätten die Aufgabe, alles zu überwachen, was sich auf der Oberfläche eines Sees abspielt, und zwar ausschließlich anhand von Wellenmustern [1]: Ein ins Wasser geworfener Stein erzeugt ein anderes Muster als eine schwimmende Ente oder ein plätschernder Springbrunnen. Die Klassifikation von Ereignissen anhand ihrer charakteristischen Wellenmuster entspricht akustisch dem Klang, der uns das Erkennen einer Stimme oder eines Musikinstruments ermöglicht.

Neben der zeitlichen Mustererkennung erfordert die See-Überwachung auch eine räumliche Zuordnung der Quellen. Das lässt sich durch zwei Kanäle erreichen, die an den See angeschlossen sind (Abbildung 6). Je nach Richtung, aus welcher eine Wellenfront ankommt, werden im rechten oder linken Kanal zuerst Wellenbewegungen registriert. Aus einer Verrechnung von Zeit- und Intensitätsdifferenz lassen sich Richtung und Abstand der Quelle erschließen (für Details vgl. [4, 6]).

Bei Anwesenheit von mehreren Quellen wird die Situation komplizierter, da sich die jeweiligen Wellenmuster durchdringen. Dazu ist es erforderlich, die Überlagerungen der einzelnen Wellenmuster zu trennen. Im See-Modell könnte diese Trennung dadurch geschehen, dass man den Kanälen eine geeignete Form und eine abnehmende Tiefe gibt. Damit lässt sich erreichen, dass Wellen in den Kanal hineinlaufen und je nach Frequenz einen bestimmten Kanalabschnitt ins Mitschwingen versetzen. Bringt man nun längs des gesamten Kanals Sensoren an, welche die Schwingungen registrieren, so sprechen diese je nach ihrem Ort auf bestimmte Frequenzen besonders gut an.

So ist es möglich, die Wellenmuster von verschiedenen Quellen je nach ihrer Frequenz örtlich getrennt zu erfassen. Eine Verrechnung von Laufzeit- und Intensitätsunterschieden der getrennten Einzelmuster erlaubt die Lokalisierung einzelner Quellen, sofern deren Klangspektren (Muster im Frequenzbereich) hinreichend verschieden sind. Ganz ähnlich analysiert unser Gehör die Wellenmuster in zwei getrennten Kanälen in ihrem räumlichen und zeitlichen Verlauf und konstruiert daraus ein inneres Bild der akustischen Umgebung, in welchem Ereignisse kategorisiert und räumlich und zeitlich zugeordnet werden. In diesem Sinn ist das Hören ein inneres Sehen raum-zeitlicher Muster. Für die in-

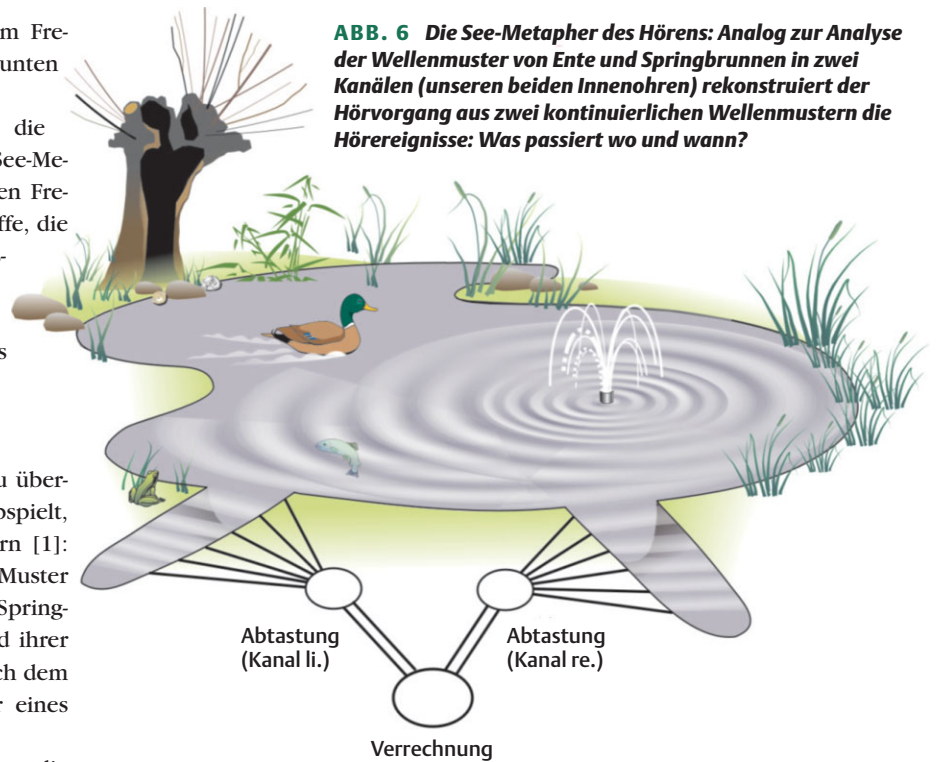


ABB. 6 Die See-Metapher des Hörens: Analog zur Analyse der Wellenmuster von Ente und Springbrunnen in zwei Kanälen (unseren beiden Innenohren) rekonstruiert der Hörvorgang aus zwei kontinuierlichen Wellenmustern die Hörereignisse: Was passiert wo und wann?

nere Repräsentation von Zeit und zeitlicher Veränderung sind Synchronisationsprozesse fundamental.

Orts- und Periodizitätsprinzip

Die beiden „Kanäle“ entsprechen unseren beiden Innenohren. Das wie eine Schnecke geformte Innenohr (Cochlea) ist die Schnittstelle zwischen außen und innen, das Interface zwischen der physikalischen Welt der Schallsignale und der biologischen Welt der Nervensignale. Die Schallwellen der Luft werden über Außenohr, Trommelfell und Gehörknöchelchenkette in die mit Flüssigkeit gefüllte Cochlea übertragen. In ihr befindet sich eine schwingungsfähige Membran (Basilarmembran), welche die Schallsignale grob nach ihren Frequenzen zerlegt (► Wanderwellenprozess, vgl. [3]). Ihre Schwingungsmuster werden von mechanisch empfindlichen Sinneszellen erfasst, als Impulsmuster in getrennten Fasern des Hörnerven codiert und zu den Zentren der aufsteigenden Hörbahn weitergeleitet.

Abbildung 7 zeigt das Prinzip der mechanischen Vorzerlegung im Innenohr und die Trennung eines Signalmischs in seine Frequenzbestandteile. Akustische Signale mit zwei verschiedenen Frequenzen f_1 und f_2 werden auf zwei verschiedene Orte x_1 und x_2 auf der Basilarmembran abgebildet.

Um die äußere akustische Welt intern adäquat zu repräsentieren, wirken zwei Prinzipien zusammen:

- Die Signale werden je nach ihrer Frequenz auf einen bestimmten Ort im Innenohr abgebildet (Ortsprinzip des Hörens, Wo-Prinzip).

EXPERIMENTE IM INTERNET

Eine Präsentation mit den beschriebenen Hörexperimenten kann unter www.biuz.de in der Rubrik „Special Features“ heruntergeladen werden.

- Langsam veränderliche Muster werden in ihrem zeitlichen Verlauf vom Nervensystem repräsentiert (Periodizitätsprinzip des Hörens, Wie-Prinzip).

Beide Prinzipien sind zueinander komplementär. Sie ergänzen sich wechselseitig. Das Periodizitätsprinzip basiert auf langsamen neuronalen Prozessen. Daher kann es nur greifen, wenn die Reize sich hinreichend langsam verändern (unter circa 1000 Hz bei akustischen Signalen). Dagegen gestattet das Ortsprinzip aufgrund der schnellen mechanischen Vorzerlegung durch die Basilarmembran auch die Erfassung höherfrequenter Signale. Dabei wird allerdings nur die Signalstärke codiert, nicht der genaue zeitliche Verlauf. Insofern ist das Ortsprinzip eine Projektion, die nur gewisse Signalaspekte abbildet (Frequenz, Intensität), während andere Aspekte (zeitliche Struktur, Phase) unberücksichtigt bleiben. Dieser Unterschied in der jeweiligen Repräsentation ist ähnlich dem Unterschied zwischen einer Photographie (Abbildung der Intensität) und einem Hologramm (Abbildung eines fixierten Wellenfeldes).

Synchronisation und Rekonstruktion fehlender Grundfrequenzen

Das Zusammenwirken beider Prinzipien löst das Rätsel, wie in Experiment 4 das Gehör die fehlende Grundfrequenz rekonstruiert. Im Bereich hoher Frequenzen ist die Basilarmembran nicht mehr in der Lage, die Oberschwingungen des Spektrums so mechanisch zu trennen, wie es in

Abbildung 7 für weit auseinander liegende Frequenzen gezeigt wird.

Nehmen wir an, ein Bass singt einen 100 Hz-Ton. Dann werden die tiefen Frequenzen gefiltert. Die Oberschwingungen sind jedoch noch vorhanden. Beispielsweise liegt die 20. Oberschwingung bei 2000 Hz, die 21. bei 2100 Hz. Die Schwingungsmuster dieser beiden Signale überlappen und es kommt zu Schwebungseffekten, wie wir sie von leicht verstimmten Stimmgabeln aus dem Physikunterricht kennen. Die Schwebungsfrequenz ist die Differenz der beiden sich überlagernden Frequenzen. Die Einhüllende des Musters auf der Basilarmembran „wackelt“ mit einer Frequenz von 100 Hz. Der akustische Nerv antwortet mit Entladungsmustern, die mit diesem „Wackeln“ synchronisiert sind. Es wird ein periodisches Muster von 100 Hz weitergeleitet. Das auditorische System interpretiert diese Periodizität als Grundfrequenz, so als ob ein 100 Hz-Ton vorliegen würde. Auf diese Weise ist es möglich, die fehlende Grundfrequenz zu ergänzen. Man bezeichnet dies als Residuerton-Wahrnehmung.

Jetzt wird klar, weshalb man Frequenz und Periodizität begrifflich genau trennen muss. In unserem Experiment fehlen die tiefen Frequenzen des Spektrums. An den entsprechenden Orten der Grundfrequenz im Innenohr ist keine Energie vorhanden. Doch in unseren Köpfen wird die fehlende Frequenz draußen als Periodizität neuronaler Muster drinnen über Synchronisationsprozesse rekonstruiert.

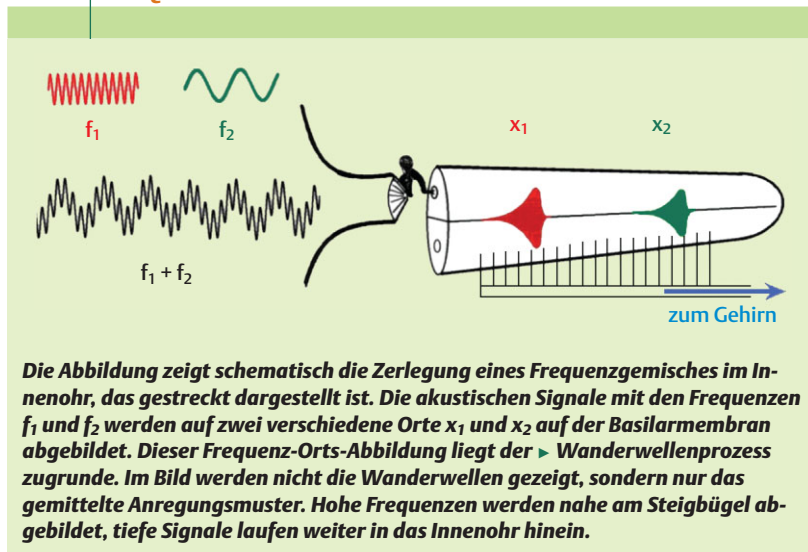
Die komplementäre Ergänzung von Raum und Zeit, von Wo und Wie, von Ort und Periodizität, wird in unserem Gehirn systematisch aufrechterhalten. In verschiedenen Zentren des auditorischen Systems werden Reize sowohl nach Frequenz als auch nach Periodizität in verschiedenen zueinander orthogonalen Karten abgebildet [8].

Synchronisation und Gehirnmetaphern: das Uhrgleichnis

Unsere Reise in das Gehirn startete in BIUZ 3/2004 aus der Innenperspektive. Die Reflexion von Wahrnehmungsexperimenten hat uns zur Vorstellung geführt, Hören als ein inneres Sehen raum-zeitlicher Muster aufzufassen. Neuronale Prozesse, die es erlauben Zeit und Zeitlichkeit intern zu repräsentieren, spielen dabei eine zentrale Rolle. Die Synchronisation von Uhren erweist sich als ein brauchbares und einfaches Basismodell für komplexe adaptive und dynamische Prozesse. Sie hilft uns verstehen, wie wir Wirklichkeit repräsentieren und konstruieren. Neben der Interpretation von Sprache und Musik ist die zeitliche Abfolge von Signalen wesentlich, um die akustische Räumlichkeit zu konstruieren (räumliches Hören).

Das Phänomen des Gleichtakts zweier Uhren hat eine nicht unerhebliche Rolle in der Philosophiegeschichte gespielt, und zwar als Metapher für die Beziehung von Geist und Materie. Leibniz diskutiert dies in seinem berühmten Uhrgleichnis (vgl. [7]). Wie der Gleichklang zweier Uhren kann seiner Argumentation nach die Verbindung von Leib und Seele nur auf dreierlei Weise zu Stande kommen:

ABB. 7 | FREQUENZ-ORTS-ABBILDUNG IM INNENOHHR



- Durch die wechselseitige Beeinflussung der beiden Uhren, die einen Gleichgang herbeiführt.
- Durch die Einwirkung eines Dritten, der sie bei Abweichung wieder in Einklang bringt.
- Durch die perfekt aufeinander abgestimmte Anfertigung der Uhren.

Die erste Lösung verwirft Leibniz als mechanistisch, ebenso wie die zweite Alternative eines „Uhrmachersgottes“, der bei Bedarf eingreift. Er favorisiert die dritte Möglichkeit, denn sie entspricht seinem System der ► „prästabilierten Harmonie“ und der göttlichen Gnade: Leib und Seele sind im Voraus so perfekt aufeinander abgestimmt, dass es keiner physikalischen Wechselwirkung bedarf [7]. Aus heutiger Sicht mutet uns diese Vorstellung seltsam an. Sie ist nur vor dem Hintergrund seiner Philosophie verständlich: Leib und Seele sind durch den Graben des Unendlichen voneinander getrennt. Unendliches lässt sich nicht mit endlichen Mitteln überbrücken. Allerdings macht genau das Alternative 3 für uns kaum nachvollziehbar, denn perfekt gleichgehende Uhren müssten ja unendlich genau übereinstimmen. Mathematisch widerspricht dies der Idee des Kontinuums; allenfalls ► diskrete Systeme können unendlich genau übereinstimmen.

Synchronisation stellt eine Kopplung von innen und außen mit endlichen Mitteln her. An dem von Leibniz als „mechanistisch“ verworfenen Prozess kommt man, wie die Hörexperimente zeigen, nicht vorbei. Auch auf höheren Ebenen in der Funktion des Gehirns spielen Synchronisationsprozesse eine essenzielle Rolle. Doch wie aus mehr oder weniger gut synchronisierten „Uhren“, aus miteinander wechselwirkenden elektrochemischen Aktivitätsmustern von Nerven, Modulen und Gehirnarealen ein bewusstes Wesen entsteht, das sich sogar selbst hinterfragt, bleibt noch immer ein Wunder.

All dies sind durchaus Schwindel erregende Gedanken über das Denken, die an einfachen Hör- und Modellexperimenten anknüpfen! Experimente haben die vielfältigsten Funktionen im Forschungsprozess sowie für Lern- und Erkenntnisprozesse. Sie helfen, das Allgemeine einzusehen: Sie verkörpern abstrakte Prinzipien. In diesem Sinne klären die Experimente einige Hörphänomene im Rahmen von universell wirksamen dynamischen Prozessen auf, ohne jedoch die Faszination und die Magie des Ganzen zu entzaubern.

Zusammenfassung

Es werden Hörexperimente vorgestellt, die sich mit einem Computer und einem Sound-Editor-Programm leicht durchführen lassen. Sie erlauben einen Blick aus der Innenperspektive auf die konstruktive Rolle neuronaler Synchronisationsprozesse bei der Sprach- und Musikwahrnehmung. Die Synchronisation von Uhren stellt ein Basismodell für das Verständnis neuronaler Prozesse dar, die für die Konstruktion von Wirklichkeit zentral sind.

Literatur

- [1] A.S. Bregman, Auditory Scene Analysis, Cambridge, 1990.
- [2] Cool Edit, Syntrillium Software Corporation, www.syntrillium.com; die Software wird jetzt von Adobe vertrieben (Preis ca. 150 Euro); ältere Versionen (Cool-Edit 96, 2000) sind noch als Shareware im Internet verfügbar.
- [3] M. Euler, Biol. Unserer Zeit **1996**, 26, 163-172, 304-312, 313-322.
- [4] M. Euler, Praxis der Naturwissenschaften – Physik **1998**, 8/47, 2-16.
- [5] M. Euler, Biol. Unserer Zeit **2004**, 34, 180 - 185.
- [6] W. M. Hartmann, Physics Today, Nov. **1999**, 24-29.
- [7] A. Hilligus, M. Euler, Praxis der Naturwissenschaften – Physik **1998**, 8/47, 37-44.
- [8] H. Schulze, G. Langner, J. Comp. Physiol. 1997, A 181, 651-663.
- [9] D. Schwanitz, Bildung: Alles, was man wissen muss, Frankfurt, 1999.

Der Autor



Manfred Euler, geb. 1948. Diplom und Promotion in Physik an der Universität Gießen. Habilitation (Didaktik der Physik, Duisburg 1981). 1987–1991 Professor für Physik an der FH Hannover, danach Lehrstuhl für Didaktik der Physik an der Universität Paderborn, seit 1997 Direktor am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel. Derzeit vor allem im Rahmen verschiedener nationaler und internationaler Projekte zur Verbesserung der Qualität des naturwissenschaftlichen Unterrichts tätig.

Anschrift:

Prof. Dr. Manfred Euler
IPN, Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel,
Olshausenstraße 62,
24098 Kiel
Email: euler@ipn.uni-kiel.de