

Klänge, Strukturbildung und Selbstorganisation

Das Tönen einer Orgelpfeife resultiert aus dem Zusammenwirken von Generator- und Resonatorprozess. Der instabile Luftstrom im Labium der Pfeife treibt als Generator die Schwingungen der Luftsäule im Pfeifenrohr an. Das Rohr der Pfeife wirkt als Resonator, in dem sich durch Überlagerung von hin- und zurücklaufenden Schallwellen stehende Wellen ausbilden. Die Strömung in der Pfeifenlippe reagiert höchst sensibel: Winzige Anstöße lenken sie nach innen oder außen. Die resultierenden Druckschwankungen regen Schwingungen der Luft im Rohr an, die wiederum auf den Luftstrom steuernd zurückwirken. Geschieht diese Rückkopplung im richtigen Takt, so beginnt die Pfeife zu „sprechen“. Der Generatorprozess führt die abgestrahlte Energie wieder zu. Dies geschieht selbsttätig ohne das Zutun einer externen Steuerungsinanz. Die tönende Orgelpfeife ist ein vergleichsweise einfaches Beispiel für Selbstorganisation.

Ganze Zahlen kommen insofern ins Spiel, als bei den stehenden Wellen nur ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge in den Resonator passen und stabile Muster ausbilden. In einem offenen Rohr können so die verschiedenen Töne der Naturtonreihe angeregt werden. Ihre Frequenzen sind ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz f , also $2f$, $3f$, $4f$ usw. Mit Naturtönen lassen sich Zweiklänge bilden, deren Frequenzverhältnisse exakt im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen: z.B. die Oktave (2:1), die Quinte (3:2) oder die Quarte (4:3). Kleinere Abweichungen von diesen besonders einfachen rationalen Frequenzverhältnissen machen sich als Schwebungen bemerkbar, stärkere Differenzen als Rauigkeit. Auch das musikalisch untrainierte Gehör ist in der Lage, diese Intervalle herauszuhören. Dabei wirken Prozesse der Anpassung, Verstärkung, Wandlung und Wechselwirkung von Signalen sowie der Musterbildung und Mustererkennung zusammen. Analoge Vorgänge der Selbstorganisation, die es ermöglichen, dass die Orgelpfeife tönt, tragen in uns dazu bei, dass wir ihre universelle Klangsprache wahrnehmen können.

Von zwei Signalströmen zum akustischen Raum

Zur Konstruktion unserer inneren Klangwelt analysiert das auditorische System die beiden Schallsignalströme, die im rechten und linken Ohr ankommen. Die erforderlichen Verarbeitungsstrategien lassen sich in folgendem Modell veranschaulichen: Angenommen, man will feststellen, was auf einem See geschieht. Dazu stehen nur die Wellen zur Verfügung, die sich auf der Seeoberfläche ausbreiten. Man kann zwei Kanäle mit dem See verbinden und die in die Kanäle hineinlaufenden Wellen mit einer Reihe von Sensoren erfassen. Die beiden raumzeitlichen Wellenmuster werden anschließend in einem Rechner verglichen. Ganz ähnlich analysiert und vergleicht das Gehör die Wellenmuster in zwei getrennten Kanälen im rechten und linken Ohr. Unser Gehirn konstruiert aus der Verknüpfung der beiden Signalströme den inneren auditorischen Raum. Neuronale Netzwerke lösen das inverse Problem und rekonstruieren die Schallquellen aus der Analyse des Wellenfelds. Sie erkennen Muster und kategorisieren Schallereignisse, die sie zeitlich und räumlich zuordnen. Hören lässt sich auffassen als ein unbewusstes inneres Sehen raum-zeitlicher Strukturen, die vom auditorischen System aus dem Schallwellenfeld des Außenraums in mehreren Wandlungsschritten gebildet werden [2].

Die beiden Kanäle entsprechen den Innenohren. Das wie eine Schnecke geformte Innenohr (Cochlea) ist die Schnittstelle zwischen außen und innen. Die Schallwellen der Luft werden über Trommelfell und Gehörknöchelchenkette in die mit Flüssigkeit gefüllte Cochlea eingekoppelt. In ihr befindet sich eine schwingungsfähige Platte (Basilarmembran). Die Schwingungen regen Wanderwellen an, die sich entlang der Basilarmembran ausbreiten und Schallsignale nach ihren Frequenzanteilen zerlegen. Mechanisch empfindliche Sinneszellen, die Haarzellen im Corti-Organ des Innenohrs, erfassen das Anregungsmuster und setzen die örtliche Auslenkung der Basilarmembran in neuronale Impulsfolgen um. Die Impulsfolgen werden in getrennten Fasern des Hörnerven zu den Zentren der aufsteigenden Hörbahn weitergeleitet und verarbeitet. Diese Projektionen sind nachbarschaftserhaltend und bilden bis in den auditorischen Cortex den hörbaren Frequenzbereich auf neuronale Karten ab.

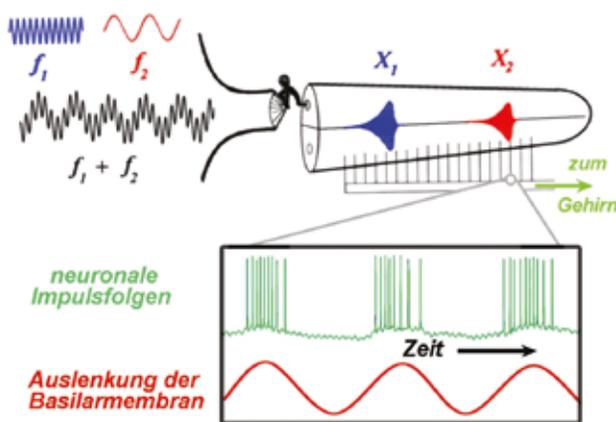


Abb. 3: Analyse und Codierung von Schallsignalen im Innenohr.

Bei der internen Repräsentation der äußeren akustischen Welt wirken zwei Prinzipien zusammen (Abb. 3). Schallsignale werden je nach Frequenz auf bestimmte Orte abgebildet (Ortsprinzip). Die Nervenimpulse sind darüber hinaus in der Lage, die zeitliche Struktur von langsam veränderlichen Signalen bis ca. 1000 Hz wiederzugeben (Periodizitätsprinzip). Dabei stellen Synchronisationsprozesse eine Kopplung zwischen den neuronalen Impulsfolgen und dem erregenden Signal her. Beide Verarbeitungsstrategien repräsentieren komplementäre Aspekte der akustischen Welt. Das Ortsprinzip erlaubt aufgrund der schnellen mechanischen Vorzerlegung durch den Wanderwellenprozess die Erfassung hoher Frequenzen. Dabei wird nur die Signalstärke codiert und nicht der genaue zeitliche Verlauf.

Wahrnehmungsprozesse am Modell der Orgelpfeife

Im Wanderwellen-Modell arbeitet das Innenohr passiv und wird vom Schall in Schwingungen versetzt. Diese Mitschwing-Theorie hat jedoch einen Schönheitsfehler: Wir hören viel besser als es die passive Theorie erlaubt [3]. Innere Reibung dämpft die Schwingungen und vermindert die Empfindlichkeit und die Frequenztrennschärfe des Systems. Ein schwingungsfähiges System spricht umso selektiver auf eine Frequenz an, je weniger es gedämpft ist. Dies ist eine Konsequenz der klassischen akustischen Unschärfebeziehung (Frequenz-Zeit-Unschärfe): Je schneller eine Schwingung abklingt, desto weniger genau ist ihre Frequenz messbar. Da wir als musikalische Wesen Töne sehr gut unterscheiden können, muss unser Hörsystem die allgegenwärtige innere Reibung unwirksam gemacht haben. Das Erfolgsrezept der Natur ist verblüffend. Das Innenohr arbeitet aktiv; es tönt, allerdings nur unterschwellig und für uns normalerweise unhörbar. Über Rückkopplungsprozesse wird zusätzliche Energie in die Basilarmembran-Schwingungen gepumpt, sodass es zu einer frequenzselektiven Verschärfung des Wanderwellenmusters kommt (Abb. 4). Nur aufgrund dieser Verstärkerprozesse erreicht das Ohr sein außerordentliches Leistungsvermögen als Schallempfänger. Wir können beinahe „das Gras wachsen hören“. Wäre das Gehör nur geringfügig empfindlicher, würden wir die Wärmebewegung der Luftmoleküle als ein beständiges Rauschen wahrnehmen.

Diese Rückkopplung ist ein Beispiel für Selbstorganisation auf neuro-mechanischer Basis. Analog zur Orgelpfeife kann man zwischen einem energieliefernden Generator- und einem energieverzehrenden Resonatorprozess unterscheiden. Dem Resonator entspricht ein Abschnitt der Basilarmembran, der zum Schwingen angeregt wird. Am Generatorprozess sind die äußeren Haarzellen beteiligt, die im Corti-Organ verankert sind. Sie nehmen passiv an der Basilarmembranbewegung teil und beeinflussen diese wiederum aktiv. Ähnlich dem Luftstrom im Labium der Orgelpfeife verbinden die Haarzellen sensorische und motorische Funktionen. Die Verbiegung von feinen Sinneshärcchen öffnet Membranschalter in den Härchenspitzen, die elektrochemische Potenzialänderungen hervorrufen und mechanisch aktive Proteine der Zelle beeinflussen. Die äußeren Haarzellen generieren auf diese Weise Kräfte, welche die Schwingungen der Basilarmembran antreiben. Mit der Aktivität des Gehörs gehen neue charakteristische Effekte einher.

Wechselwirkung, Bindung und Kombinationsprodukte

Um diese Effekte anhand der Wechselwirkungen von Schwingungen hörbar zu machen, betrachten wir im Analogversuch eine tönende Orgelpfeife, auf die zusätzlich ein Ton aus einem Lautsprecher einwirkt. Wir unterscheiden zwischen äußerem Signal (Lautsprecher) und innerem Signal (Pfeife). Bei schwacher Kopplung und geringem Frequenzunterschied nimmt man einen in seiner Lautstärke auf- und abschwelenden Ton wahr, eine Schwebung, die durch die Überlagerung der beiden Schwingungen in unserem Gehör zustande kommt. Erhöht man die Stärke des Lautsprechersignals, dann verschwindet die Schwebung plötzlich. Das externe Signal zieht die interne Schwingung an sich und synchronisiert diese. Außen- und Innenwelt agieren im Gleichtakt; das innere System vollzieht das äußere Verhalten nach.

Abbildung 5 zeigt den Vorgang anhand einer Klanganalyse der Schallsignale für verschiedene Lautsprecherfrequenzen. Man erkennt das Synchronisieren und das Mitziehen der inneren Schwingung durch das äußere Signal. Außerhalb des Einrastbereiches treten neue Frequenzen auf, die weder im Antrieb noch in der Orgelpfeife alleine vorhanden sind. Diese Kombinationsprodukte entstehen aus der nichtlinearen Wechselwirkung innerer und äußerer Prozesse. Ihre Frequenzen ergeben sich aus der Addition oder Subtraktion von ganzzahligen Vielfachen der Ausgangsfrequenzen.

Synchronisations- und in Kombinationseffekte sind generische Merkmale der Interaktion von selbstorganisierenden Systemen. Ihre innere Dynamik ist anpassungsfähig und wird durch Wechselwirkungen mit der Außenwelt moduliert. Bei ausreichend starker Kopplung kommt es zu einem aktiven inneren Nachvollziehen des äußeren Rhythmus (Phasenkopplung) und

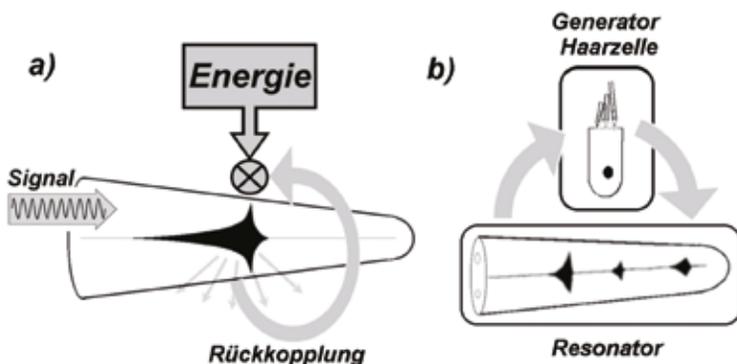


Abb. 4: Verschärfung der Frequenzabstimmung des Wanderwellenmusters (a) durch neuromechanische Rückkopplung (b).

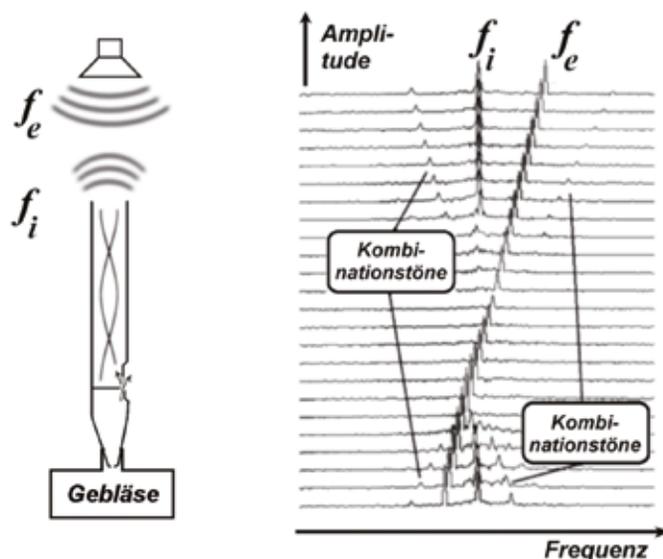


Abb. 5: Synchronisationseffekt und Kombinationstöne einer angetriebenen Orgelpfeife. Die Lautsprecherfrequenz f_e wird schrittweise erhöht. Die Orgelpfeifenfrequenz f_i passt sich an.

die Kombinationsprodukte verschwinden. In diesem Sinne kann man davon sprechen, dass die Orgelpfeife das äußere Signal wahrgenommen hat. Der innere Systemzustand hat sich in Wechselwirkung mit der Außenwelt abrupt verändert. Beide sind wie durch Geisterhand zu einer Einheit verschmolzen.

Geisterhafte Töne und innere dynamische Prozesse

Dieses Modell präzisiert den aktiven Charakter von Wahrnehmungsprozessen: Die Verschränkung von passiven, sensorischen und aktiven, handelnden Teilprozessen führt zu einer Bindung zwischen dem Wahrzunehmenden und dem Wahrgenommenen. Je nach Kopplungsgrad können dabei unterschiedliche Wechselwirkungsprodukte entstehen. Was sich bei der Orgelpfeife in einem von Menschenhand gemachten System abspielt, vollzieht sich auf ähnliche Weise in unseren Köpfen, wie man anhand der Wechselwirkung zweier Töne introspektiv erleben kann. Je nach den beteiligten Frequenzen kommt es zu ganz unterschiedlichen Eindrücken. Bei kleinem Frequenzunterschied verschmelzen die Töne. Wächst der Frequenzunterschied an, so verwandelt sich die schneller werdende Schwebung in einen Rauigkeitseindruck bis wir schließlich beide Töne getrennt wahrnehmen. Zugleich werden weitere Kombinationstöne hörbar.

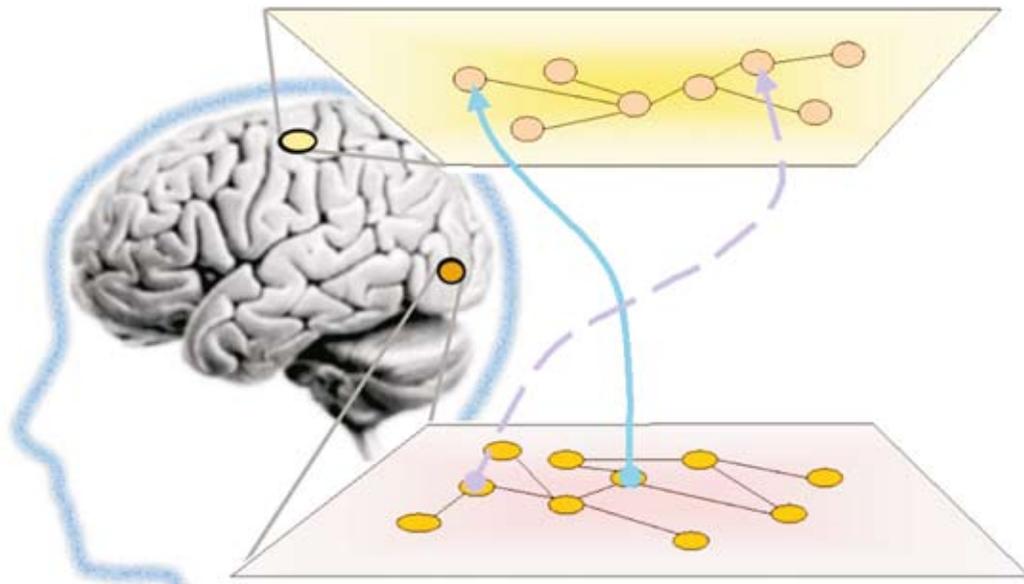
Unser dynamisches Innenleben generiert eine ähnliche Sequenz von Effekten wie die angetriebene Orgelpfeife. Die Wechselwirkungsprodukte entstehen an verschiedenen Orten in der Verarbeitungshierarchie des Systems. Aktive Verstärkerprozesse im Innenohr erzeugen analog zur Orgelpfeife Kombinationsprodukte. Diese geheimnisvollen „dritten Töne“ sind die Nebenprodukte der inneren Musik der Selbstorganisation, ein umfassendes Konzert, das alle Ebenen und Teilsysteme des wahrnehmenden Substrats einbindet. Insbesondere der sog. kubische Kombinationston ist gut hörbar und tritt bereits bei der Wechselwirkung schwacher Schallsignale auf. Andere Kombinationsprodukte wie die Differenztöne sind neuronalen Ursprungs.

Differenztöne sind Orgelbauern seit langem bekannt. Um einen tiefen Ton ohne eine lange Orgelpfeife zu erzeugen, stimmt man zwei kürzere Pfeifen so ab, dass ihre Frequenzdifferenz den gewünschten Ton ergibt. Er ist deutlich vernehmbar, obwohl im Schallfeld bei dieser Frequenz keine Energie vorhanden ist. Die gleichsam einer Geisterwelt entspringenden Differenztöne sind Produkte innerer Verarbeitungsstrategien. Das Anregungsmuster auf der Basilmembran schwingt mit der Differenzfrequenz und synchronisiert neuronale Impulsmuster, deren Periodizität von unserem Gehirn als Tonhöhe interpretiert wird. Dieser Geisterston ist physisch repräsentiert in Form kohärenter neuronaler Oszillationen, die an die Differenzfrequenz der beiden Orgelpfeifensignale gekoppelt sind. Er macht das Unerhörte unserer inneren Verarbeitungsstrategien hörbar und bewusst.

Dynamische Bindung und Bewusstsein

Synchronisationseffekte spielen auch auf höheren Ebenen der neuronalen Verarbeitung eine zentrale Rolle. Neurobiologische Gehirntheorien diskutieren das synchronisierte Feuern von Neuronen und die kohärenten, im Gleichtakt erfolgenden Oszillationen von Neuronensembles im Kontext des sogenannten Bindungsproblems. Unser Wahrnehmungssystem erfasst Teilaspekte der äußeren Welt, die modalitätsspezifisch verarbeitet und in verschiedenen Gehirnarealen nach bestimmten Merkmalen analysiert werden. Mit der Analyse stellt sich das Problem der Synthese und der Integration: Wie fügen sich die vielfältigen Teile (Chunks) von Wahrnehmungsinhalten, Handlungsmustern und Erinnerungsspuren zu einem kohärenten Ganzen zusammen? Wie ordnen sich die Wahrnehmungsinhalte in einem beständigen Fluss um und gruppieren sich in zeitlicher Folge zu neuen Zuständen so, wie wir den Strom des Bewusstseins subjektiv erleben? Was setzt den Fokus unserer Aufmerksamkeit immer wieder neu? Neuronale Synchronisationseffekte gelten für Viele als der plausibelste Prozess, der diese komple-

Abb. 6: Schematische Darstellung des Entstehens und Vergehens neuronaler Verbindungen über kohärente Aktivitätsmuster.



nen Bindungen ermöglicht. Durch vielfältige Bindungsakte auf unterschiedlichen Ebenen und Raum-Zeit-Skalen erzeugt unser Gehirn dynamische Zustände, die als Korrelate bewusster **kognitiver** Akte angesehen werden (Abb. 6) [4]. Beim Menschen sind kohärente Oszillationen in den Gehirnströmen experimentell nachgewiesen, die mit dem Erkennen von Gesichtern oder von Sprache einhergehen.

Der lange Arm der Kohärenz verbindet offenbar den mentalen mit dem materiellen Bereich. Er stellt Bindungen bis hinab auf die molekulare Ebene her und ermöglicht in umgekehrter Richtung makroskopisches Verhalten durch das kohärente Zusammenwirken einer großen Zahl mikroskopischer Systeme. Dass Grundprinzipien der dynamischen Bindung und der Emergenz von kohärentem Verhalten an einfachen Modellsystemen wie der Orgelpfeife untersucht und hörbar gemacht werden können, verweist auf die Universalität der Dynamik in adaptiven Systemen. Es ist eine naheliegende Hypothese, dass diese Universalität mentale Modellbildung und unser produktives wissenschaftliches Denken ermöglicht und trotz mancher Sackgassen und Rückschläge letztlich erfolgreich macht.

Der Psychologe W. James bemerkte zur Verbindung des Physischen mit dem Psychischen vor mehr als einem Jahrhundert [5]: „The ultimate of ultimate problems ... in the study of the relations of thoughts and brains is to understand why and how such disparate things are connected at all“. Wir haben uns dieser Verbindung zwischen dem Innen- und Außenraum über die Brücke des Klangs genähert und erkannt, dass beide Bereiche durchaus nicht disparat sind. Auch materielle Systeme zeigen komplexe, adaptive Eigenschaften, die man gemeinhin eher

dem organismischen sowie dem geistigen Bereich zuordnen würde. Das „harte“ Problem der Neurowissenschaften besteht allerdings auch aus dieser Perspektive grundsätzlich weiter. Wie wandelt sich der „Wind“ der dynamischen Systeme und ihrer Wechselwirkung schließlich in das „Feuer“ des Bewusstseins? Wie entsteht aus den höchst komplexen, dynamisch vernetzten neuronalen Aktivitäten unseres Gehirns ein bewusstes Wesen, das die Wurzeln seiner Existenz und die kreativen Bindungen von Geist und Materie kritisch hinterfragt? Trotz einiger Annäherungen und Brückenschläge, die das Unerhörte hörbar machen, bleibt diese letzte Frage offen.

Anmerkungen:

- 1 F. Riedel (Hrsg.), *Die Orgel als sakrales Kunstwerk*. Mainz 1992, S. 26
- 2 M. Euler, *Biologie in unserer Zeit*, 34 (2004) 249-255
- 3 M. Euler, *Biologie in unserer Zeit*, 26 (1996) 163-172, 304-312
- 4 E. Varela et al., *Nature Reviews Neuroscience* 2 (2001) 229-239
- 5 W. James, *Principles of Psychology, Reprint, New York, 1950, Vol.1, S. 177*