

Vortrag Robert Zatorre

... zwar habe ich noch einige Textbrocken aus den Kantaten von Bach im Hinterkopf, jedoch erschöpfen sich damit auch schon meine Deutschkenntnisse. Und da auch mein Computer sich zur Ruhe begeben hat, werden wir uns selbst ein wenig rühren müssen. Ich hoffe, dass Sie alle hellwach sind – eingeschlafen dürfen Sie sein, wenn ich mit meinem Vortrag am Ende bin. (Zumindest jetzt sollten Sie alle wach sein). Ich möchte Pamela Rosenberg und Linda Reisch sehr herzlich danken für diese wunderbare Gelegenheit zu einem Aufenthalt in dieser Stadt der Musik. Und ich will nicht unerwähnt lassen, dass Ihr hier in der musikalischen Erziehung und Ausbildung eine ganz großartige Arbeit leistet.

[00:43]

Dazu möchte ich heute einen Beitrag leisten. Allerdings bin ich nicht Pädagoge, sondern Entwicklungspsychologe und Neurowissenschaftler. Und so werde ich Ihnen einige der wissenschaftlichen Grundlagen und Prinzipien vorstellen, um Ihnen ein besseres Verständnis um diejenigen Merkmale und Fähigkeiten des Gehirns zu ermöglichen, die Musik überhaupt geschehen lassen. Das wird Ihnen womöglich ein tieferes Verständnis der Funktionsweise von Musik an sich ermöglichen. Wenn wir Wissenschaftler uns für die Musik interessieren, dann deshalb, weil sie uns die Funktionsweisen des Gehirns besser verstehen lässt. Das Ganze ist nämlich alles andere als eine Einbahnstraße.

(Inzwischen ist mein PC leider vom Schlaf in ein tiefes Koma übergewechselt, was meinen Vortrag nicht gerade einfacher macht)

[01:53]

[Pause wegen Computerproblem] ... wahrscheinlich braucht mein PC etwas Musik, um wieder zu sich zu kommen.

[Pause wegen Computerproblem]

[03:21]

Man kann auch allzu gut vorbereitet sein – ich wollte alles so einrichten, dass es gleich losgehen kann, und nun geht es uns hier so wie mitunter auch mit der Musik: man übt ein Stück einfach zu oft ein, und wenn's soweit ist, bemerkt man, dass man überzogen hat anstatt die Noten zur Seite zu legen, wenn am Ende der Probe alles stimmt.

(Also, wenn wir nun das Video haben könnten, dann kann es in einer Sekunde losgehen. Gut. Vielleicht ist es auf diese Weise sogar besser. Können Sie alle gut sehen und lesen? Ich hoffe, dass das Sonnenlicht nicht allzu sehr stört.)

[04:21]

Hier also meine erste Aussage – Vom Standpunkt der Neurowissenschaft aus betrachtet, bedient die Musik sich sehr weitgehend der raffiniertesten Schaltkreise, die das Gehirn anzubieten hat. Andererseits ist sie aber auch ein völlig banales und natürliches Geschehen. Vielleicht wird Professor Fritz, der später eingreifen wird, ein wenig darauf eingehen. Jedenfalls stammt ein Teil der Hinweise und Belege, die wir über die Rolle und den festen Platz der Musik in der menschlichen Gesellschaft haben, aus der Archäologie

[05:02]

Hier sehen sie ein paar vorzeitliche Flöten, die im Donautal, im heutigen Deutschland, gefunden wurden. Sie stammen aus dem Jungpaläolithikum, als in Teilen Europas noch die Eiszeit herrschte. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, dass die damaligen Menschen, die angesichts der harten Klimabedingungen und bei jeder nennenswerten Technik Mühe hatten, überhaupt zu überleben, offenbar viel Zeit und Mühe investierten, um diese bemerkenswerten Flöten herzustellen.

(Nein – das brauchen wir hier nicht...)

[05:42]

(Vielleicht ist es nicht so genau zu erkennen – aber) Diese Flöten sind wahre Präzisionsinstrumente. Die Löcher sind in ihrer Größe äußerst sorgfältig eingearbeitet, wahrscheinlich genau passend für die Finger des Spielers, und die Abstände zwischen ihnen entsprechen ziemlich genau dem, was wir heute als Tonleiter bezeichnen. Wenn diese Menschen solche Instrumente bauten, muss Musik für sie eine große Bedeutung gehabt haben. Und es muss sie bereits gegeben haben, lange bevor der Mensch diese Instrumente – wahrscheinlich ausgehend von seinen Liedern, seinem Gesang - fertigen konnte.

[06:21]

Ich folgere daraus, dass unsere Spezies seit den Anfängen ihrer Existenz mit der Musik gelebt hat, und so stellt sich die Frage: ‚warum und wozu überhaupt Musik, und wo kommt sie her?‘ Auch Darwin brütete bereits über dieser Frage, und seine bekannteste Aussage zum Thema stammt aus seinem Hauptwerk ‚Die Abstammung des Menschen‘: „Da weder die Freude an der Musik noch die Fähigkeit zu musizieren irgendeine praktische Nutzenanwendung aufweisen, gehören beide zu den geheimnisvollsten Zügen der Spezies Mensch“. Er hatte also eigentlich nicht die geringste Ahnung, wozu Musik überhaupt diente. Er nennt sie einfach mysteriös – mehr wissen wir nicht.

[06:56]

Zehn Jahre später allerdings reflektierte er in seiner Autobiografie über den eigenen Alterungsprozess und seine großen Schwierigkeiten mit der Musik gegen Ende seines Lebens und kam zu dieser Überlegung: "Hätte ich mein Leben erneut zu leben, so würde ich es mir zur Regel machen, mindestens einmal in der Woche Gedichte zu lesen und Musik zu hören. So hätte ich womöglich die inzwischen atrophierten Gehirnbereiche aktiv und brauchbar gehalten." Eine ganz bemerkenswerte Aussage – finden Sie nicht? Und er sagt weiter, der Verlust seiner (emotionalen) Sinne sei ein Verlust von Freude und Glück und schade womöglich dem Intellekt und der sittlichen Integrität, indem er die emotionale Seite unseres Wesens schwäche.

[07:38]

Für mich ist diese Aussage Darwins nicht weniger als die Antwort auf seine eigene, zehn Jahre zuvor gestellte Frage. Ihm selbst war dies womöglich gar nicht so recht bewusst. Und doch legt er damit den Finger auf die entscheidende Stelle: genau aus diesem Grunde ist Musik so eminent wichtig. Sie lässt uns das emotionale Geschehen in uns erfassen, das, was er als „moral character“ bezeichnet, als unsere sittliche Verfassung. Daher meine Hypothese, meine Hypothesen genau genommen:

Die Musik ist fester Bestandteil dessen, was uns erst zu Menschen macht, sie gehört zu unserer "geistigen Grundausstattung". Sie ist zwar ein Abstraktum, aber ich behaupte, dass sie nur der menschlichen, aber eben der gesamten menschlichen Spezies gegeben ist, dass sie uns eine Möglichkeit zur Kommunikation gibt und uns unsere emotionale Erregung steuern und Vergnügen erzeugen lässt.

[08:28]

Wenn wir zu diesen Dingen befähigt sind, so verdanken wir dies der entsprechenden Hardware. Hätten wir nicht das Gehirn bekommen, das wir besitzen, so hätten wir auch die Musik nicht. Ich betrachte unser Gehirn als eines, das auf die Kreation von Musik spezialisiert ist. Für mich haben wir es hier mit einem spezies-typischen und spezies-spezifischen Verhalten zu tun, das ich zum Beispiel mit der spezies-spezifischen Echoortung von Fledermäusen vergleichen würde. Fledermäuse müssen im Flug Insekten fangen können, um zu überleben. Wir haben die Musik – sie lässt uns kommunizieren und unsere Emotionen steuern. So überleben WIR.

[08:58]

Im Übrigen lässt sich diese Ausstattung, diese Hardware durch Training weiter verbessern. Obwohl wir alle über sie verfügen, beanspruchen und trainieren wir sie nicht alle nach den sich bietenden, spezifischen Ansätzen, was mir den Vergleich mit dem Gehen aufdrängt. Gehen ist etwas absolut Natürliches, das jedes Kind ohne besonderes Training beherrscht. Aber zum Olympiateilnehmer, zum Trapezkünstler auf dem Drahtseil oder auch zum Ballettkünstler reicht es allein mit der natürlichen Ausstattung nicht.

[09:29]

Die genannten Fähigkeiten bedürfen demnach eines ganz besonderen Trainings, obwohl sie auf einer Grundfähigkeit beruhen, die wir alle besitzen. Schauen wir uns das Gehirn an, einige der beteiligten „Schaltungen“ – genau dies tun wir seit etwa dreißig Jahren in unserem Labor -, um diejenigen Komponenten der Gehirnstruktur- und funktion besser zu verstehen, die für das Hören, das Wahrnehmen und das Verstehen von Musik und natürlich für das Schaffen von Musik relevant sind.

[10:01]

Natürlich reicht die Zeit nicht für eine umfassende Lektion zur Anatomie, aber hier sehen Sie (- gut, wie ich hoffe –) die Bereiche des Gehirns, auf die ich Ihre Aufmerksamkeit lenken möchte. Sie liegen im temporalen Kortex – hier finden sich die für das Hören relevanten Strukturen, die für den Empfang von Toninformationen zuständigen Zielbereiche. Hier ein "pathway", eine Leitungsbahn in die vorderen Bereiche, die sogenannte vordere, ventrale Nervenbahn. Hier dagegen die nach hinten gerichtete hintere dorsale Nervenbahn. Diese Bahnen haben unterschiedliche Aufgaben, und obwohl ich Sie nicht mit Details langweilen möchte, will ich doch kurz die unterschiedlichen Aufgaben und Funktionen dieser Strukturen erläutern.

[10:42]

Wir beginnen im auditiven Kortex, dem Gehörzentrum des Gehirns, das in Grün gezeigt wird. Die ältesten Hinweise auf die Bedeutung des in Rot dargestellten Schläfenlappens für das Hören von Musik stammen von Wilder Penfield, dem Gründer meines Instituts, der in den 40er und 50er-Jahren als Gehirnchirurg tätig war und im Jahre 1963 eine wichtige Arbeit veröffentlichte, in der er nachwies, dass ein Reiz am freigelegten Kortex, den Sie hier oben rechts sehen müssten, gelegentlich

bei dem Probanden eine musikalische Halluzination hervorruft.

[11:20]

Leitet man also einen schwachen Strom auf die Kortexoberfläche, so meldet der Proband eine Hörempfindung, die deutlich nach Musik klingt. Die roten Punkte markieren das Gebiet, in dem dies vorwiegend stattfindet – im auditiven Bereich des Kortex. Dem entnehmen wir, dass dort Vorstellungen von Musik gespeichert sein müssen, die wir alle in uns tragen. Wenn Sie das Pech haben, am Gehirn operiert werden zu müssen, dann kann der Operateur also eine Elektrode und einen Strom anlegen und Ihre musikalische Vorstellung unschwer abrufen – so intensiv, dass ihre Wahrnehmung Sie tatsächlich so etwas wie Musik hören lässt.

[12:03]

Machen wir nun einen Sprung von circa fünfzig Jahren nach vorn und blicken wir auf die neuesten Studien in unserem Labor. Uns stehen dabei inzwischen die modernen Bildgebungstechniken zur Verfügung, mit denen wir die Muster der Gehirnaktivität untersuchen können, praktischer Weise ohne in den Schädel des Probanden eindringen oder Elektroden anlegen zu müssen. Mit einer neulich veröffentlichten Studie hat Michael Klein, einer meiner Doktoranden, experimentell nachweisen können, dass diese Bereiche hier im Schläfenlappen tatsächlich, wenngleich auf recht abstrakte Weise, musikalische Information enthalten und darstellen.

[12:42]

Hier haben wir es mit Tonintervallen zu tun (*Redner spielt einige Takte Musik*) hier ganz offensichtlich eine kleine Terz – aber auch hier eine solche Terz (*Redner spielt erneut einige Takte Musik*), während dies hier eine vollendete Quarte sein dürfte. (*R. spielt erneut*). Nun haben wir gut ausgebildete Musiker diese Töne anhören lassen. Gleichzeitig maßen wir die Gehirnaktivität und ließen einen Computeralgorithmus herausfinden, ob das Muster der Hirnströme in einem gegebenen Bereich der Charakteristik der einzelnen Töne entspricht.

[13:31]

Man spricht hier von einer Multivarianz-Klassifizierung. Die Details erspare ich Ihnen, will aber festhalten, dass diese Bereiche des Hörzentrums nicht für den Ton selbst kodieren, sondern für das Verhältnis zwischen den Tönen. Der Bereich hier kann unabhängig von der Tonart alle kleinen Terzen von den großen Terzen und von den Quartan unterscheiden. Hier wird also nicht für „C“ oder für „Es“ beispielsweise kodiert, sondern für die Tatsache, dass C und Es in einer Beziehung zueinander stehen, die wir als kleine Terz bezeichnen.

[14:04]

Das Ganze ist also eine abstrakte Darstellung. Allerdings könnte es für mich so etwas wie Musik überhaupt nicht geben, wenn das Gehirn nicht fähig wäre, das Verhältnis zwischen den Tönen zu verarbeiten. Analog dazu reagiert das Gehirn, das Hörzentrum nicht nur auf die Töne an sich (obwohl es das natürlich tut), sondern es reagiert auch auf die Verletzung der erwarteten Tonmuster. Wenn ich also für Sie diese banale kleine Melodie spiele [...] dann fällt Ihnen sicher auf, dass sich dabei zwei seltsame Dinge eingeschlichen haben und dass der Hörkortex hier aktiv ist. (*Ob Sie dies hier genau erkennen können oder nicht – jedenfalls*) Er unterteilt er sich in Bereiche, die auf die erwarteten bzw. die unerwarteten Veränderungen reagieren.

[14:53]

Das Interessante daran ist die Tatsache, dass Sie diese Melodie niemals zuvor gehört haben, wenn Sie keinen meiner Vorträge gehört haben. Und nun erfahren Sie auch, warum ich Wissenschaftler und nicht Musiker geworden bin – denn diese Komposition entspricht ziemlich genau dem Niveau meiner kompositorischen Fähigkeiten. Und doch – Sie haben die Melodie nie gehört, wissen aber dank Ihres abstrakten Wissens, was Sie erwarten dürfen. Ihr ganzes Leben lang haben Sie immer wieder ähnliche Tonmuster gehört und wissen daher, welche Töne angemessen sind und welche nicht. Ich komme darauf später noch einmal zurück.

[15:30]

Das Hörzentrum ist im Übrigen von großer Bedeutung für die “musikalische Bildgebung”, und dies definieren wir als die Fähigkeit, Musik zu evozieren, sie auch dann abzurufen, wenn sie in unserem natürlichen Umfeld gar nicht vorhanden ist. Wir alle wissen ja, wie stark Beethoven in seinem späten Leben taub war. Vor zwei Tagen war ich noch im Bonner Beethoven-Haus und konnte diese riesigen Hörner bewundern, mit denen er zu arbeiten versuchte. Johann Nepomuk Mälzel hatte sie für ihn gebaut, und natürlich funktionierten sie überhaupt nicht. Jedenfalls war er wirklich sehr taub und dennoch in der Lage, ganz bemerkenswerte Musik zu komponieren. Er hatte halt eine innere Vorstellung von diesen Tönen.

[16:14]

Obwohl wir Beethoven natürlich nicht scannen können, gibt es doch verschiedene Ansätze, um die mit der musikalischen Bildgebung einher gehenden Gehirnaktivitäten zu untersuchen. (*Ich bin mir nicht sicher, ob Sie im Gegensatz zu mir hier etwas erkennen können, aber*) Es gibt im ganzen rechten Teil dieser Darstellung zum Beispiel den in Orange markierten Bereich des auditiven Kortex, der dann aktiv wird, wenn jemand Musik hört, während der grüne Saum (*wenn Sie ihn erkennen können*) den Bereich des Kortex markiert, der nicht nur auf tatsächlich zu hörende Töne reagiert, sondern auch auf die pure Vorstellung von Tönen.

[17:01]

Damit sind wir wieder bei den Experimenten von Penfield : hat jemand in seinem Leben viel Musik gehört, so kann er Musik gedanklich abrufen. Dies bedeutet nichts anderes als dass es dafür irgendwo einen Speicher geben muss. Ruft man diese Musik nun erneut auf, nimmt man sie sozusagen in seinem geistigen Ohr wahr, (17:14 ???) dann werden diejenigen Kortexregionen reaktiviert, die schon beim ersten Anhören der Musik aktiv waren. Dies ist der Mechanismus, dank dessen wir Musik in uns tragen können. Ich sagte schon, dass die Schaltungen, welche den auditiven Kortex und den noch gar nicht erwähnten inferioren frontalen Kortex (IFC) betreffen, von großer Bedeutung für die Wahrnehmung von Musik sind. Und ebenso [more??? 17:43] sind die dorsalen Nervenbahnen für eine Reihe von anderen Reaktionen wichtig, für andere durch sie ausgelöste Gehirnaktivitäten und dabei insbesondere für eine kartographische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Tönen und physiologischen Aktionen.

[17:54]

Gemeint ist dabei dies: wenn jemand ein Instrument spielt oder singt, dann führt er mit seinen Muskeln Bewegungen aus, welche einen Ton entstehen lassen, der seinerseits wieder Einfluss auf die Aktion nimmt. Es handelt sich also um eine geschlossenen Schleife, eine Feedback-Schleife, und dies zeigt dieses Diagramm.

Und natürlich müssen wir auch diesen Mechanismus untersuchen und seine Funktionsweise erklären: wie interagieren diese beiden Systeme, von denen das eine als Motorik für die Aktion zuständig ist, während das andere die Konsequenzen der Aktion steuert und überwacht?

[18:34]

Hier sehen Sie einen Geiger bei der Arbeit – obwohl es nicht ganz einfach war, eine Geige zu scannen. Aber wir haben ein scannerfähiges Cello hinbekommen und hier ist meine fleißige Studentin Melanie Segado, die abends professionell Geige spielt und tagsüber als Neurowissenschaftlerin arbeitet. Sie spielt auf dieser Vorrichtung, die für unsere Zwecke durch Musiktechnologien von der McGill University gebaut wurde.

[19:04]

Es ist natürlich ein sehr seltsames Instrument mit einem ganz kleinen Bogen. Vielleicht erkennen Sie oben rechts Melanie im Scanner. Es geht dort recht eng zu – wenn Sie schon einmal in einem solchen Kernspintomografen gelegen haben, dann kennen Sie das. Es ist eng in dieser langen Röhre, aber wir hatten ja von einem Lautenisten einen winzigen Bogen gearbeitet bekommen [that is that big ??? 19:23]. Zuerst hat man uns angestarrt wie Gestörte, was wir ja womöglich auch sind, aber nun funktioniert dieses Teil. Man kann damit spielen – zwar nicht alles Erdenkliche, aber doch ein paar ganz vernünftige Sachen.

[19:35]

Nehmen Sie nun diese Gehirnaufnahme im linken Teil des Bildes – die grünen Felder stehen für die Bereiche, die aktiv sind, wenn Cellisten das Instrument spielen und ihre Bewegung entsprechend ausrichten. Mit der linken Hand gleichen sie Tonabweichungen aus (???:54).. Sie spielen einen Ton, wir führen eine Änderung der Tonhöhe ein, und nun müssen sie wieder anpassen und korrigieren

[20:03]

So sieht die Schleife aus zwischen Hören und Agieren, denn wenn man etwas Falsches oder Ungenaues hört, muss man sofort durch Anpassung darauf reagieren. Genau das tun Musiker, sozusagen on-line, auf permanente Weise. Während sie aktiv spielen, überwachen sie sich ebenso aktiv und sind dabei in der Lage, in äußerst kleinen Schritten ihr *fine tuning* vorzunehmen, um so mit ihrer Motorik den präzisen, den richtigen Ton zu produzieren.

[20:28]

Diesen Prozess können wir im Labor mit Hilfe des Scanners nachverfolgen. Schauen Sie auf diese Bereiche hier im Scheitellappen, auf der Höhe des parietalen Kortex – sie entsprechen recht gut dem, was wir vorher als dorsale Nervenbahn bezeichnet haben und wo die Integration von auditiven und motorischen Stimuli stattfindet.

[20:47]

Einige Teile dieses Systems können wir noch ein wenig detaillierter untersuchen, wenn wir uns Spitzenmusiker anschauen und dazu einen anderen Ansatz zur Bildgebung im Gehirn wählen, bei dem wir die Anatomie des Gehirns vermessen. Bisher habe ich Ihnen die Gehirnaktivität vorgestellt, so wie sie de facto der Sauerstoffmenge entspricht, welche von den Neuronen verbraucht wird. Aber wir können das Gehirn auch nach seiner Anatomie vermessen, wozu wir die

Magnetresonanzbildgebung einsetzen. Das hat in meinem Labor Patrick Bermudez getan. Er verglich das Gehirn von Spitzenmusikern mit dem von Probanden, die in anderer Hinsicht vergleichbar, jedoch überhaupt nicht musikalisch ausgebildet waren (???? 21:14] . Dabei konnten wir die Dicke des Kortex erfassen.

[21:32]

Diese Darstellungen zeigen den Unterschied in der Ausprägung der grauen Zellen. Sie erkennen, dass die Musiker davon deutlich mehr haben. Bei ihnen ist der Kortex in den auditiv relevanten Bereichen starker ausgeprägt. Das ist auch durchaus logisch, da sie über so lange Zeitspannen hinweg Musik hören, und genau so ist es auch im motorischen Kortex, da ihre Motorik so sehr spezialisiert ist, und ebenso im Teilen des frontalen Kortex. Diese Ergebnisse zeigen unseres Erachtens ebenso wie die übrigen Befunde, wie mit Training das System sein *fine tuning* erhält und wie man damit eine hochspezialisierte Kontrolle über die Motorik der Hände erlangt.

[22:17]

Des Weiteren erkennen wir, dass diese Veränderungen bei der grauen Hirnmasse in hohem Maße von dem Alter abhängen, in dem jemand mit dem musikalischen Training beginnt. Hier sehen wir Ergebnisse von Jennifer Bailey aus dem Labor von Virginia Penhune. In dieser Studie wurden erwachsene Musiker untersucht, die entweder in sehr jungem Alter, also mit 4, 5 oder 6 Jahren oder später, das heißt mit 8, 9, 10 oder 11 Jahren mit dem Musizieren begonnen haben. Sie erkennen, dass dieser blau markierte Teil des frontalen Kortex höher entwickelt ist – allerdings nur bei den Probanden, die sehr früh mit ihrer musikalischen Ausbildung begonnen haben. Dies macht die Grafik sehr deutlich. Je früher ein Musiker beginnt, desto ausgeprägter fallen also die Veränderungen aus.

[23:04]

Dies erweist sich als sehr wichtig in dem Augenblick, da wir untersuchen wollen, wie präzise jemand ein Tonmuster reproduzieren kann. Der Proband hört eine Melodie, einen Rhythmus, und muss dazu passend klopfen, so dass wir erfassen können, um wie viele Millisekunden er mit seiner Reproduktion vom Original abweicht. Hier unten rechts erkennen wir, dass es gerade die Probanden mit dem stärker entwickelten frontalen Kortex sind, die das Gehörte mit größerer Genauigkeit nachvollziehen als diejenigen, deren auditive Strukturen im Frontalbereich weniger stark entwickelt sind.

[23:41]

Das Ganze erweist sich also als sehr wichtig für die Genauigkeit der Reproduktion. Einen ähnlichen Effekt sehen wir in dieser Arbeit von Chris Steele, der zeigt, dass auch die Verbindungen zwischen den motorisch relevanten Bereichen der zwei Gehirnhälften stärker ausgebildet sind. Hier haben wir es mit der weißen Gehirnsubstanz zu tun, die praktisch wie ein Faserkabel die zwei Bereiche grauer Substanz links und rechts verbindet. Auch sie ist stärker ausgeprägt, wenn jemand früher mit Schulung und Training beginnt als andere Probanden.

[24:16]

Übrigens wurde in keinem dieser Experimente die Gesamtdauer der Schulungs- und Übungsjahre nachgehalten. Es ging also anstatt des Trainingsumfangs eher um die Auswirkungen des Alters, in dem gelernt und geübt wurde.

Ich fasse diesen Teil meines Vortrags nun zusammen: Thema waren der auditive

Kortex sowie alle Verbindungen über die geschilderten Leitungsbahnen, also die von mir so genannte "hardware", dank derer wir Töne kodieren können. Ferner um die Beziehungen zwischen Tönen, aufgrund derer Erwartungen und Vorhersagen generiert werden und Vorstellungen von Tönen, von Musik abgerufen werden können. So entstehen musikalische Bildgebung und musikalisches Gedächtnis, und ebenso wichtig sind diese Prozesse für die Interaktion von Auditivem und Motorischem, die uns befähigt, Musik zu erzeugen.

[25:01]

Nun sagte ich ja zu Beginn meines Vortrags, dass es bei der Musik um emotionale Erregung und um Vergnügen geht, und natürlich kann man fragen, was das Gesagte mit Vergnügen zu tun hat. Denn bisher ging es ja gar nicht um Freude und Vergnügen, sondern nur um Fragen von Perzeption und Motorik. Also fragen wir: "Wie steht's mit dem Vergnügen?" Denn natürlich wussten schon unsere Vorfahren, dass Musik uns Freude bereitet.

[25:23]

Hier sehen wir Odysseus, der an einem Mast festgebunden ist, weil der Gesang der Meerjungfrauen so angenehm und verführerisch ist, dass wer weiß was geschehen könnte, wäre er nicht angebunden. Und da die erbauliche Wirkung von Musik schon so lange erkannt wird, biete ich Ihnen dieses interessante Zitat des Heiligen Augustinus aus seinem Werk 'Bekenntnisse': „Ich schwanke zwischen der Gefahr der Verlockung durch das Vergnügen und der nachgewiesenen Bekömmlichkeit von Musik. Und ich neige dazu, das Singen in der Kirche zu bejahen. So kann der schwächere Geist durch die Freude an dem Gehörten die höhere Stufe der Demut erklimmen. Sollte es jedoch geschehen, dass der Gesang mich stärker bewegt als die Worte, so würde ich meine sträfliche Sünde bekennen und lieber keine Musik hören.“

[26:16]

Für mich ist dies eine sehr verständige Anmerkung – er erkennt, dass Musik so vergnüglich sein kann, dass sie uns am Ende in einen Zustand versetzt, in dem wir Gott vollständig vergessen. In diesem Sinne gehört die Musik zu den bösen Dingen – er schreibt ja in seinen Bekenntnissen über all' die ungueten Dinge, die er in seinem Leben getan hat. Wenn er es dabei auf 33 Bände gebracht hat, dann muss es wahrlich viel Stoff gegeben haben. Und doch spricht er der Musik die Fähigkeit zu, unsere Hingebung an Gott zu stören und selbst einen göttlichen Rang einzunehmen.

[26:53]

Eine vergleichbare Aussage kennen wir von einem Ihnen sicher bekannten Beinahe-Zeitgenossen namens Ajatollah Chomeini, der sagte: "Die Musik korrumpiert unsere Jugend. Es gibt keinen Unterschied zwischen Musik und Opium. Beide erzeugen auf unterschiedliche Weise Lethargie." Er fand die Musik also äußerst gefährlich, und wir wissen ja, dass die Taliban zur Zeit ihrer Herrschaft in Afghanistan bemüht waren, die Musik zu verbieten. Wie kommt es also, dass Musik Freude und Vergnügen bedeutet? Schauen wir uns das nun einmal an. Wobei wir als Neurowissenschaftler natürlich zuerst einmal einen Blick auf diejenigen Mechanismen im Gehirn werfen, die am Zustandekommen von Vergnügen beteiligt sind.

[27:35]

Diese Mechanismen werden seit vielen Jahren durch die unterschiedlichsten Forscher untersucht – nicht im Zusammenhang mit der Musik, sondern mit anderen Stimuli. (*Auch hier der Vorbehalt, dass man es womöglich nicht so gut erkennen kann, aber...*) Tief im Großhirn sitzen Strukturen, die als wichtigsten Teil unter anderem das Striatum bzw. das *corpus striatum* (Streifenkörper) enthalten. Genau dieser Gehirnbereich hat viel zu tun mit den unterschiedlichen Aspekten von Vergnügen, Belohnung, Motivation und zahlreichen anderen, damit zusammenhängende Mechanismen.

[28:10]

Wenn wir uns Untersuchungen der mit vergnüglichen oder erbaulichen Reizen korrelierenden Gehirnaktivitäten ansehen, dann sehen wir etwas durchgehend Gemeinsames. Namentlich das Striatum ist der Bereich, der dauernd auf die verschiedensten Stimuli reagiert. In dieser besonderen Metaanalyse von Guillaume Siskos [?] beleuchtet der Autor Studien (*ich hoffe, Sie können das erkennen*), bei denen anfangs mit monetären Belohnungen gearbeitet wird. Es geht fast zu wie beim Glücksspiel, wo die Freude durch die Auszahlung von Geld erzeugt wird. Sodann gibt es Belohnungen in Form von Essbarem – die Probanden bekommen Essen zu sehen, wenn sie hungrig sind, oder sie bekommen jeweils nur eine kleine Menge. Und in der dritten Versuchsreihe gibt es Erotik als Belohnung, und die Probanden der Studie erotischen Reizen ausgesetzt.

[28:57]

All' diese Studien haben sich im Übrigen größter Beliebtheit erfreut, und so mangelte es nicht an willigen Teilnehmern. Gemeinsam ist diesen ein jederzeit aktives Striatum. Analog dazu zeigten sich bei den Studien meiner Kollegen, die als Belohnung Rauschmittel ausgaben und die Wirkung der Verabreichung von Kokain, Amphetaminen und Alkohol untersuchten, dieselben Striatumbereiche als involviert. Aber damit nicht genug - auch das Dopamin spielte hier eine wichtige Rolle. .

[29:29]

Das Dopamin ist unter den Neurotransmittern genau derjenige, der am engsten mit der Funktion des sogenannten Belohnungsmechanismus zusammen hängt. Wir haben nun vor einigen Jahren gefragt, ob dieses System durch Musik genauso aktiviert wird, obwohl Musik weder eine Substanz noch erst recht eine Droge ist. Sie hat keinerlei chemische Basis und ist auch nicht überlebensrelevant im Sinne von Lebensmitteln, wie Sie sicher zustimmen werden.

[29:55]

Wir haben also verschiedene Experimente durchgeführt, die ich Ihnen hier gar nicht alle im Detail schildern kann. Aber in der Studie von Valorie Salimpoor aus meinem Labor konnte die Autorin nachweisen, dass das Striatum hoch aktiviert ist, wenn jemand eine so erbauliche Musik anhört, dass er eine Gänsehaut bekommt oder ihm ein Schauern oder Prickeln über den Rücken läuft. An Beschreibungen für diesen Zustand fehlt es ja nicht - Sie wissen sicher, was ich meine.

[30:25]

Vergleichen Sie nun dieses Aktivitätsmuster mit der Reaktion des Gehirns auf Rauschmittel, in diesem Fall auf Amphetamine, dann erkennen Sie etwas Gemeinsames, das diese beiden Aufnahmen ganz deutlich machen. Dieser Befund hat natürlich Aufsehen erregt, und auch Professor Koelsch, der hier unter uns ist, hat

eine Reihe sehr schöner Arbeiten entlang dieses Ansatzes vorgelegt.

[30:52]

Aber tun wir einen Schritt weiter (*obwohl vielleicht auch dies ein wenig schwer zu erkennen ist*). und schauen wir uns den zeitlichen Verlauf der Hirnaktivität im Hinblick auf den Augenblick des größten Vergnügens an: die Probanden bringen zu diesen Experimenten Teile ihrer Lieblingsmusik mit ins Labor und hören diese Musik an, während sie in der Röhre stecken. Wir bitten sie, uns die Augenblicke des Erschauerns, des höchsten Genusses anzuzeigen.

[31:20]

Sodann untersuchten wir die Hirnaktivität unmittelbar vor und nach diesem Augenblick – dafür steht die Grafik hier im unteren Teil. Circa zehn bis 15 Sekunden lang ist die stärkste Aktivität im dorsalen Teil des Striatums, also ein wenig höher angesiedelt. Nach dem „chill“ dagegen geht es im ventralen Striatum am heftigsten zu, d.h. ein wenig weiter unten, und das erkennen Sie in dieser Grafik.

[31:49]

Das dorsale Striatum ist am aktivsten während der sogenannten "antizipatorischen Phase", während seine Aktivität im Zeitpunkt des größten Genusses zurück geht. Und genau in diesem Augenblick schießt die Kurve für das ventrale Striatum regelrecht in die Höhe. Wo liegt nun die Relevanz dieser Unterscheidung nach der anatomischen Lokalisation? Warum ist uns das wichtig? Nun, für mich gibt es zwei verschiedene Gründe für dieses Interesse. Wenn Sie einen Neuroanatomen nach der Unterscheidung zwischen dorsalem und ventralem Striatum fragen, dann wird er erklären, dass diese zwei Unterregionen mit unterschiedlichen Gehirnbereichen verknüpft und vernetzt sind.

[32:23]

So lässt das dorsale Striatum sich als die stärker kognitive Seite des Belohnungssystems beschreiben, da es mit Gehirnbereichen wie dem präfrontalen Kortex und dem cingulären Kortex (gyrus cinguli) verknüpft ist. Diese haben hohe Bedeutung für die höherrangigen kognitiven Funktionen wie zum Beispiel Vorhersagen, Antizipation, Planung und Entscheidungsfindung. Es sind dies Funktionen, deren Beteiligung man sich in der sogenannten antizipatorischen Phase vorstellen kann. Das heißt, wenn man etwas anhört, dessen weiteren Fortgang man schon kennt, wenn man antizipiert und vorausschauend plant und nach vorne denkt.

[32:59]

Auf der anderen Seite können wir uns das ventrale Striatum als den stärker affektiven Teil des Striatums vorstellen, da es mit Strukturen wie dem ventromedialen präfrontalen Kortex und verschiedenen Hirnstammkernen (nuclei) vernetzt ist, die wesentlich mehr mit den Emotionen und ihrer Steuerung zu tun haben, aber auch mit physiologischen Prozessen wie der Steuerung der Herzfrequenz, der Atmung etc.. Im Übrigen gehen ja auch momentane Glücks- bzw. Gefühlsschauer mit physiologischen Veränderungen zum Beispiel der Herz- und der Atemfrequenz einher.

[33:35]

Diese Unterscheidung zwischen den genannten Subsystemen hat für mich eine vernünftige Grundlage in der Neuroanatomie. Noch interessanter ist für Sie als

meine Zuhörer aber womöglich der Umstand, dass die Unterscheidung zwischen der Erwartung und der Erfahrung von Musik und Vergnügen sich auch sehr gut mit dem deckt, was wir aus der Musiktheorie wissen.

[33:55]

Als ich diese Ergebnisse zum ersten Mal meinen Kollegen von der Musik-Fakultät der McGill-Universität vorstellte, fragten diese: "OK, schön, aber haben Sie denn das Buch von Leonard Meyer über Emotion und Bedeutung in der Musik von 1956 nicht gelesen, in dem der Autor darlegt, dass Emotionen durch Musik aus der Erfüllung, aber auch aus der Aussetzung von musikalischen Erwartungen entstehen?" Weiter entwickelt wurde dieser Gedanke zuletzt durch David Huron, einen Musikwissenschaftler in den Vereinigten Staaten. Der Grundgedanke, den ich hier nur oberflächlich ansprechen kann, besagt, dass man beim Anhören von Musik auf der Grundlage von Erwartungen laufend Vorhersagen entwickelt.

[34:35]

Diese Erwartungen beruhen natürlich auf unserem Wissen, auf allem zuvor Gehörten, auf der gesamten "Hörgeschichte" sozusagen, die jeder von uns, wie schon dargelegt, im Grunde in seinem Gehirn mit sich herumträgt. Alle Komponisten und Interpreten nutzen genau diese Gegebenheit, um Spannung zu erzeugen, um mitunter die Belohnung durch Freude hinaus zu zögern, womit sie die emotionale Erregung noch steigern können. In anderen Worten findet diese Vorstellung von Antizipation und Belohnung zumindest eine Entsprechung in der Musikwissenschaft.

[35:09]

Nun abschließend noch ein Detail, das nicht unerwähnt bleiben soll: im ersten Teil meines Vortrags habe ich die für die Wahrnehmung und für die Aufführung von Musik relevanten Schaltungen im Kortex geschildert und im zweiten Teil dann das Striatum mit dem Belohnungssystem. Diese Gegebenheiten lassen sich de facto verknüpfen, wozu derzeit eine weitere Studie von Valorie Salimpoor läuft. In dieser Studie schauen wir uns das Ausmaß der Aktivität im Belohnungssystem im Zusammenhang mit Bewertungen und Belohnungen an.

[35:38]

Ohne allzu sehr ins Detail zu gehen, sei gesagt, dass die Probanden beim Anhören von Musik aufgefordert wurden, den Wert anzugeben, den sie in Dollar ausgedrückt der jeweiligen Musik zuordnen würden. Ähnliches tut man ja auch, wenn man auf *iTunes* ein Stück hört und beschließt, dieses zu kaufen oder nicht zu kaufen bzw. wenn man nachdenkt, wie viel Geld man dafür ausgeben würde. Je mehr man aufwenden würde, d.h. je höher der Wert einem erscheint, desto intensiver ist die im Striatum zu beobachtende Aktivität.

[36:10]

Nun kommt aber das Wichtigste: in dem Maße, da der genannte Wert steigt, wird auch die Interaktion zwischen Striatum und auditivem Kortex intensiver. Mit anderen Worten: Die so bezeichnete funktionale Konnektivität, das Interaktionsmuster zwischen den zwei Systemen, nimmt bei höher bewerteter Musik an Intensität zu – im Gegensatz zu weniger hoch bewerteter Musik. Hier findet demnach die Begegnung von Belohnungssystem und auditivem Kortex statt.

[36:40]

Dass wir diese zwei verschiedenen Systeme im Kopf haben, hier links der Kortex und rechts das Striatum, bedeutet für mich letztlich, dass wir Menschen möglicherweise unter anderem durch Musik gelernt haben, unsere emotionale Kompetenz zu erhöhen und Zustände emotionaler Erregung zu steuern und zu regeln. Die Interaktion zwischen diesen zwei Systemen mit Kategorien wie Belohnung, Bewertung, Stellenwert und Mäßigung kennt aufgrund der Vielzahl von komplexen Funktionen viele unterschiedliche Bezeichnungen. Diese Kopplungen und Schleifen betreffen schließlich nicht nur das Striatum, sondern auch das limbische und das paralimbische System, über das ich gar nicht reden konnte.

[37:23]

Dieses System tritt also in Interaktion mit den phylogenetisch höher entwickelten, im Kortex angesiedelten Mechanismen von Wahrnehmung und Vorhersage. Andererseits ist das Belohnungssystem evolutionstechnisch betrachtet deutlich älter, so dass wir es uns mit anderen Kreaturen teilen, die natürlich ebenso auf Belohnungsreize reagieren. Was aber unsere Spezies einzigartig machen könnte, ist das Vorhandensein eines kortikalen Systems, dank dessen wir in der Lage sind, die geschilderten Beziehungen überhaupt wahrzunehmen und derartige Erwartungen aufzubauen. Es ist der Zeitpunkt des Zusammenwirkens der zwei Systeme, zu dem es eben zur Wahrnehmung der Schönheit von Musik kommt.

Damit bin ich am Ende meiner Ausführungen. Einen besonderen Dank richte ich an mein gesamtes Forscherteam und an die Studenten, aber ebenso auch an zahlreiche Kollegen, ohne die diese Arbeiten nicht hätten durchgeführt werden können.

Ihnen danke ich herzlich für Ihre Aufmerksamkeit.