

Was wir hören, entscheidet vor allem unser Gehirn. Wie es das macht, ist eine Frage, der Forscher in der Abteilung Physiologie kognitiver Prozesse am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOLOGISCHE KYBERNETIK** in Tübingen nachgehen. Unter der Regie von

**NIKOS K. LOGOTHETIS** untersuchen die Wissenschaftler nicht nur, welche Arealen im Gehirn dabei zum Einsatz kommen, sondern auch, wie die akustische Information mit den Eindrücken kombiniert wird, die das Denkorgan sendet.



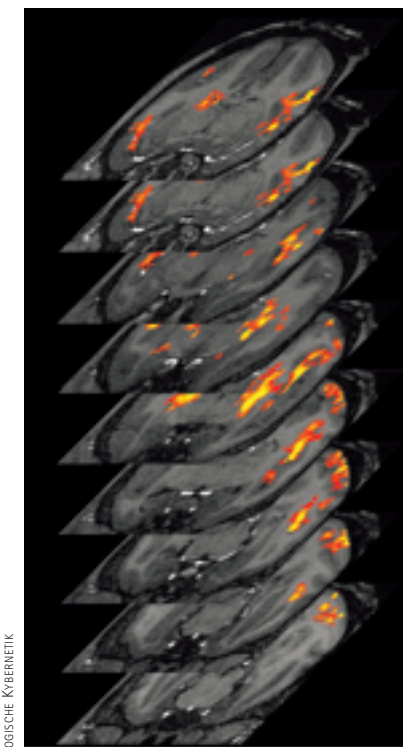
ILLUSTRATION: GROSSEVISION

# Auch die Augen hören mit

**E**s herrscht Chaos. Ich bin auf dem Weg nach Tübingen zum Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, wo ich mit Nikos K. Logothetis verabredet bin. Doch ein plötzlicher Wintereinbruch hat den Bahnverkehr völlig aus dem Takt gebracht. Der Stuttgarter Hauptbahnhof ist zum Bersten voll mit Reisenden, die verzweifelt auf Anschlusszüge warten. Alle reden durcheinander, Koffer klappern, Menschengruppen hetzen von einem Ende des Bahnhofs zum anderen und immer wieder überschallen Lautsprecherdurchsagen mit aktuellen Gleisänderungen den allgemeinen Klangteppich.

Es ist ein akustisches Tohuwabohu – und der Hall im Bahnhofsgebäude tut ein Übriges. Trotzdem schaffe ich es, aus dem allgemeinen Geräuschbrei genau die Informationen herauszupicken, die ich benötige, um doch noch pünktlich nach Tübingen zu kommen. Und gleichzeitig gelingt es mir zudem sogar, mit einer Mitreisenden zu plaudern.

Natürlich ist mir im Trubel auf dem Stuttgarter Bahnhof gar nicht bewusst, welche Meisterleistung ich gerade vollbringe – oder besser gesagt mein Gehirn. Denn das muss schließlich die Vielzahl akustischer Informationen verarbeiten, die ungefiltert an meine Ohren dringen. Es entscheidet letztlich auch, was davon in meinem Bewusstsein ankommt. Wie es das bewerkstelligt, ist noch



**Raumklang:** Die übereinandergestapelten Tomografenbilder zeigen in verschiedenen Schnittebenen die räumliche Verteilung eines im Hörkortex erzeugten Signals.

längst nicht vollständig geklärt. Weitgehend offen ist auch die Frage, wie unser Gehirn das Gehörte mit dem verknüpft, was wir sehen oder fühlen, und wie es verschiedene Sinnesreize zu einem Gesamtbild unserer Umwelt zusammenfügt.

„Als wir angefangen haben, uns für diese Fragestellungen zu interessieren, war ich wirklich erstaunt

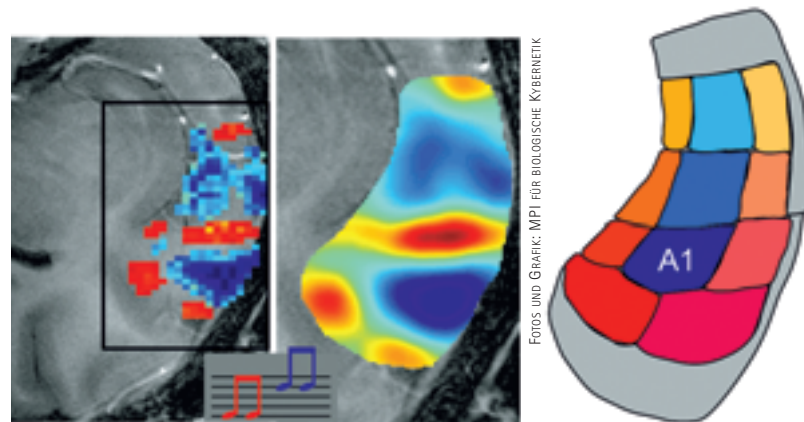
darüber, wie wenig man über die Verarbeitung akustischer Signale weiß“, erinnert sich Nikos K. Logothetis, Direktor der Abteilung Physiologie kognitiver Prozesse. Denn im Gegensatz zum Hören sei die Leistung des Gehirns in Sachen Optik – der ursprünglich das Interesse des Wissenschaftlers galt – schon recht gut erforscht. Und er hat auch eine Erklärung dafür parat: „Die meisten Menschen mit Hörproblemen leiden an einer Störung in der Cochlea, also der Hörschnecke, und nicht an einem Defekt im Gehirn.“ Da sei die Erforschung der Vorgänge im Denkorgan eben immer zweitrangig gewesen – aber nicht weniger spannend, wie er findet.

## Wo Töne im Gehirn ihren Platz finden

Logothetis hat die Erkundung der auditorischen Wahrnehmung in die Hände eines jungen Mitarbeiters gelegt: Christoph Kayser. Der Max-Planck-Forscher studierte Mathematik und theoretische Physik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Dort war er bei einem Seminar am Institut für Neuroinformatik erstmals mit der Hirnforschung in Berührung gekommen – und hängen geblieben. An den Neurowissenschaften reizte ihn damals wie heute vor allem das Zusammenspiel von analytischen und experimentellen Ansätzen. „Die analytische Herangehensweise, die ich mir in meinem Studium angeeignet habe, ist sehr von Vorteil, wenn man sich dem spannenden und komplexen Thema Gehirn widmet“, so seine Überzeugung.

Im ersten Schritt zu einem besseren Verständnis der Hörleistung unseres Gehirns erstellten Kayser und sein amerikanischer Kollege Christopher Petkov eine exakte Karte des Hörkortex, der auch Hörrinde heißt und sich im Schläfenlappen befindet. Anatomische Untersuchungen legten





Töne hoher (blau) und tiefer (rot) Frequenz aktivieren verschiedene Teile der Hörrinde. Durch Vergleich unterschiedlicher Frequenzen lässt sich jedem Bildpunkt seine bevorzugte Frequenz zuordnen und eine Frequenzkarte erstellen. Mithilfe dieser Karte und auf der Basis anatomischer Studien können die Wissenschaftler die einzelnen Areale des Hörsystems voneinander trennen (so steht rechts in der Illustration A1 für den primären auditorischen Cortex).

nahe, dass das Hörzentrum – ähnlich wie man es bereits vom Sehzentrum kennt – in mehrere Areale unterteilt ist. Um dies genauer zu überprüfen, untersuchten Kayser und Petkov mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) die Gehirne von Rhesusaffen.

„Diese Tiere sind für solche Analysen hervorragend geeignet“, erklärt Kayser. „Ihr Gehirn ist dem des Menschen sehr ähnlich und wurde in den vergangenen Jahrzehnten anatomisch sehr gut untersucht.“ So können die Forscher kontrollieren, ob die gemessenen Aktivitäten zur anatomischen Struktur passen. „Außerdem können wir beim Affen unsere Ergebnisse auf elektrophysiologischer Ebene überprüfen, also durch direktes Messen der Nervenzellaktivität im Gehirn, was beim Menschen so nicht möglich ist.“ Um den Hörcortex zu kartieren, spielten die Forscher ihren Versuchstieren Töne aus unterschiedlichen Frequenzbereichen vor. Gleichzeitig sahen sie deren Gehirne mittels der fMRT quasi bei der Arbeit zu. Dabei identifizierten sie elf verschiedene auditorische Felder, die jeweils alle das komplette akustische Spektrum repräsentieren. An-

ders ausgedrückt: In den einzelnen Bereichen ist für sämtliche Schallfrequenzen jeweils eine Gruppe von Nervenzellen zuständig.

#### WIE DAS SEHEN DAS HÖREN BEEINFLUSST

Das deutet darauf hin, dass die Bereiche unterschiedliche Aufgaben erfüllen, ähnlich wie im Sehzentrum. Auch hier wird ein Bild, das die Netzhaut im Auge aufnimmt, Punkt für Punkt in jedes einzelne Areal übertragen. Und es ist bekannt, dass diese Felder unterschiedliche Aufgaben bei der Weiterverarbeitung übernehmen. Doch während Neurowissenschaftler bei der Sehrinde eine Vorstellung davon haben, was die verschiedenen Areale leisten (manche sind für die räumliche Anordnung zuständig, andere für Farbe oder komplexere Strukturen), ist über die Funktion der einzelnen Hörfelder kaum etwas bekannt.

Die von den Tübinger Wissenschaftlern gezeichnete Landkarte des Hörzentrums dient nun als Grundlage, um herauszufinden, welche Rolle den einzelnen Bereichen zukommt und wie sie dabei zusammenspielen. Und ob sie sich viel-

leicht von anderen Sinnesreizen beeinflussen lassen. Schließlich setzt sich die Wahrnehmung unserer Umwelt aus Informationen von verschiedenen Sinnesorganen zusammen. Das Gehirn muss zum Beispiel Gehörtes und Gesehenes miteinander verknüpfen, damit wir akustische Informationen zuverlässig und vollständig erfassen können. Was passieren kann, wenn dies nicht so ganz gelingt, wenn Auge und Ohr Informationen senden, die nicht so recht zusammenpassen, lehren uns gute Bauchredner: Wir hören eine Stimme, sehen die Mundbewegung der Puppe und es scheint so, als ob das leblose Ding tatsächlich reden könnte. Der Künstler hat unser Gehirn getäuscht.

Die Informationen, die verschiedene Sinnesorgane senden, werden also im Denkorgan verknüpft. Die Frage ist, wo, wann und wie das passiert. Da gibt es theoretisch viele Möglichkeiten. Eine gängige Hypothese lautet: Verknüpft wird erst zum Schluss – also dann, wenn jedes Gehirnzentrum bereits ein fertiges Bild von seinem Reiz hat. Das andere Extrem wäre, dass die Integration schon ganz zu Anfang, auf den ersten Stufen der sensorischen Verarbeitung, stattfindet und sich die Sinne gegenseitig ergänzen. „Wir haben eine Entdeckung gemacht, die nahelegt, dass eher die zweite Hypothese zutrifft“, berichtet Kayser. Er hat gemeinsam mit seinen Kollegen beobachtet, dass sich die Arbeit des Hörzentrums von optischen Reizen beeinflussen lässt.

Dazu spielten die Forscher ihren Versuchstieren Geräusche vor, wie sie in der natürlichen Umwelt ihrer wild lebenden Artgenossen vorkommen, also etwa das Rascheln von Blättern. Wie zu erwarten, reagierte der Hörcortex auf den Reiz, was sich im fMRT durch eine erhöhte Aktivität in dieser Hirnregion bemerkbar machte. Zeigten die Forscher den

Affen nun gleichzeitig kurze Filmsequenzen, in denen Tiere durchs Gebüsch springen, so wurde das Hörzentrum noch aktiver. Doch damit nicht genug: Selbst Filme ohne akustische Untermalung machten sich in diesem Bereich des Gehirns in Form eines leicht erhöhten Aktivitätssignals bemerkbar. Videos, die statt natürlicher Objekte nur bunte komplexe Strukturen zeigten, hinterließen keine Spuren in der Hörregion der Affenhirne.

#### FINGERSPITZENGEFÜHL FÜR DIE OHREN

„Das zeigt, dass in dieser Region offensichtlich Sinnesleistungen im Gehirn zusammengeführt werden und dass dies gleich passiert, nachdem die Information im Denkorgan ankommt“, erläutert Christoph Kayser die Bedeutung der Versuchsergebnisse. Was er und seine Kollegen mithilfe moderner bildgebender Verfahren bei Rhesusaffen sehen, fügt sich hervorragend in eine Reihe von Beobachtungen ein, die andere Wissenschaftler beim Menschen gemacht haben.

So entdeckte die Gruppe um Gemma Calvert von der University of Oxford im Jahr 2001, dass sich akustische und optische Signale bei der Sprachwahrnehmung gegenseitig verstärken. Der Anblick eines Sprechers und seiner Lippenbewegungen genügt, um auch den auditorischen Cortex der freiwilligen Probanden in Aufmerksamkeit zu versetzen – selbst wenn der Darsteller nur zusammenhangslose Fantasielaute brabbelt. Schneidet das Gesicht auf dem Monitor dagegen nur Grimassen, findet das Hörzentrum dies offensichtlich völlig uninteressant.

Nicht alle Regionen im Hörzentrum scheinen allerdings auch auf Gesehenes anzusprechen. Kayser und seine Kollegen haben festgestellt, dass ausschließlich die Regionen im kaudalen Bereich – dem

Ende des Hörzentrums, das dem Rückenmark zugewandt ist – auf optische Signale mit erhöhter Aktivität antworten. „Das zeigt gleichzeitig wieder die Arbeitsverteilung, die im Gehirn vonstattengeht“, so Kayser. Und es gibt bereits Hinweise auf die Bedeutung dieser Sinnesverknüpfung: So ist bekannt, dass viele Neurone in ebendiesen Regionen der Hörrinde auf die Verarbeitung der räumlichen Position einer Schallquelle spezialisiert sind. Das legt die Vermutung nahe, dass visuelle Information in diesen Regionen dazu benützt werden könnte, den räumlichen Aspekt der akustischen Signale genauer zu analysieren.

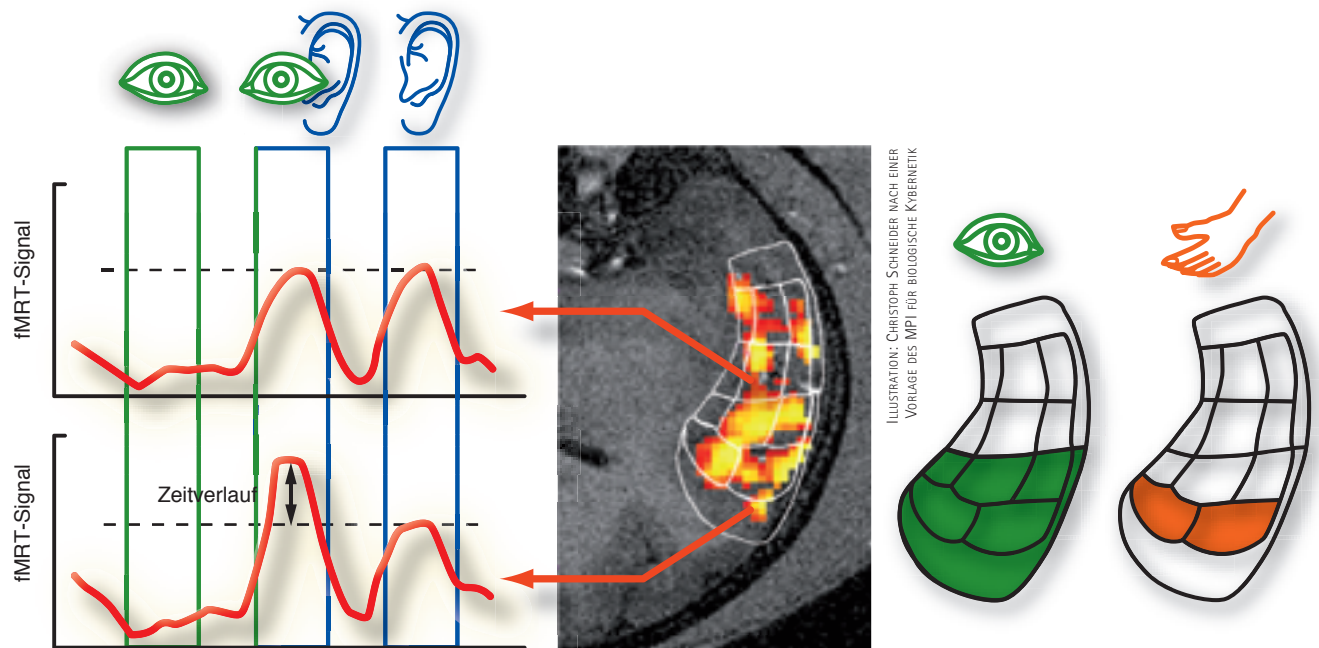
Die Bereiche im hinteren Teil des Hörzentrums scheinen aber nicht nur für optische Reize zugänglich. Sie reagieren auch auf sensomotorische Informationen – also auf solche, die unser Tastsinn liefert. Das fanden die Tübinger Forscher in

einem weiteren Experiment heraus: Sie spielten ihren Affen ein Rauschen vor und stimulierten gleichzeitig die Tastzellen der Hand- und Fußflächen der Tiere mit einer über einen Elektromotor betriebenen Bürste, die Bürsten zum Reinigen von Flaschen ähnelt.

Tatsächlich verstärkte der zusätzliche Reiz auch in diesem Fall die Aktivität im hinteren Bereich der Hörrinde. Es mag auf den ersten Blick eigenartig erscheinen, dass ausgerechnet Tastreize die akustische Verarbeitung im Gehirn beeinflussen sollen. Aus Sicht der Forscher ist das aber durchaus sinnvoll: „Stellen Sie sich einmal vor, Sie stehen vor Ihrem Auto im Dunkeln und suchen den Schlüssel, der Ihnen gerade aus der Hand gefallen ist. In diesem Fall sind Sie froh, wenn Sie die noch verbliebenen Sinnesreize kombinieren können“, sagt Christoph Kayser. ▶

Beobachten die Makaken im Versuch wild lebende Artgenossen in ihrer natürlichen Umwelt (im Bild Tiere auf Sri Lanka), so führt das zu einer erhöhten Aktivität im Hörcortex.





In der einen Region des Hörkortex (Bild in der Mitte) ist die Aktivierung für auditorische und audio-visuelle Signale gleich (fMRT-Signal links oben); in der anderen Region ist die Aktivierung für den audio-visuellen Reiz stärker (fMRT-Signal links unten, schwarzer Pfeil). In dieser Region findet sensorische Integration statt. Das rechte Schema zeigt die Areale im Hörkortex, die durch visuelle oder taktile Reize beeinflusst werden.

Optische, akustische und sensomotorische Sinne arbeiten also sehr eng zusammen, um ein möglichst realistisches Gesamtbild von unserer Umwelt zu erfassen. Und die Ergebnisse aus dem Tübinger Labor legen nahe, dass die notwendige Verknüpfung im Gehirn bereits sehr früh erfolgt und nicht erst, nachdem jeder einzelne Reiz für sich analysiert wurde. Aber sollte gerade der Hörkortex in puncto Verknüpfung von Sinnesreizen eine Sonderrolle spielen? Vermutlich nicht. „Ganz naiv könnte man davon ausgehen, dass in allen sensorischen Zentren im Gehirn Systeme zur Sinnesverknüpfung existieren“, sagt Kayser. Ob das tatsächlich so ist, sei aber derzeit keinesfalls sicher. Denkbar sei auch, dass sich ein bestimmtes Sinnessystem dabei besonders hervortut. Das sollte bei Mensch und Affe aber eher das Sehsystem sein, da die optischen Reize auch die anderen Sinnessysteme am stärksten beeinflussen.

Einen Zusammenhang zwischen Fühlen und Sehen hatten die Forscher um John Driver am University College London bereits im Jahr 2000 beobachtet. Bei ihren Versuchspersonen verstärkte sich die Aktivität

der Sehrinde, wenn die Studienteilnehmer nicht nur einen hellen Lichtblitz in unmittelbarer Nähe ihrer Hand sahen, sondern gleichzeitig auch eine Vibration an den Fingern der jeweiligen Hand spürten.

### ALLE SINNE MITEINANDER VERKNÜPFT

Unklar ist noch, welchen konkreten Nutzen wir davon tragen, dass optische und sensomotorische Signale die Aktivität im Zentrum der akustischen Wahrnehmung verstärken. Hilft es uns tatsächlich, besser zu hören? Oder lässt uns das eine Situation schneller erfassen? „Solche Fragen können wir im Moment noch nicht mit Sicherheit beantworten“, sagt Kayser und ergänzt: „Denn dass wir ein Signal messen, sagt leider noch nichts über seine Funktion aus.“ Was genau hinter der Verknüpfung von Hören, Sehen und Fühlen steckt, sollen künftige Experimente ans Tageslicht bringen.

Ideen zum Sinn und Zweck der Integration haben die Wissenschaftler genug: So könnte das Zusammenspiel von Optik und Akustik nicht nur hel-

fen, den räumlichen Ursprung eines Geräusches besser zu lokalisieren. Auch das Sprachverständnis profitiert möglicherweise davon. Jeder, der schon einmal auf einer lauten Party war, weiß, dass wir unsere Gesprächspartner weitaus besser verstehen, wenn wir gleichzeitig ihren Lippenbewegungen folgen können. „Das bedeutet, dass unser Gehirn die akustischen und die visuellen Sprachreize kombiniert. Und es liegt natürlich nahe, dass dies in Arealen der Hörrinde geschieht“, sagt Kayser. Aber das sei eine andere Geschichte, der die Forscher in der Abteilung von Nikos K. Logothetis auf den Grund gehen.

Beeindruckt mache ich mich auf den Heimweg und denke darüber nach, was ich in Tübingen gelernt habe. Es herrscht noch immer heilloses Durcheinander am Stuttgarter Hauptbahnhof. Meinen Zug zurück nach Hause habe ich auch verpasst. Als ich mich am Informationsstand nach der nächsten Verbindung erkundige, fällt mir auf: Ich kann den Erklärungen der Dame hinter dem Tresen bei dem Lärm um mich herum tatsächlich viel besser folgen, wenn ich sie auch ansehe. STEFANIE REINBERGER