

Sehchips – Hoffnung für Blinde

Von Eberhart Zrenner und Hugo Hämmerle

Seit mehr als einem Jahrzehnt arbeiten Wissenschaftler an der Entwicklung von elektronischen Prothesen, die es erblindeten Menschen ermöglichen sollen, wieder ausreichend zu sehen. Jetzt brachte ein neuer, in Deutschland entwickelter „aktiver Sehchip“ erstmals einen Durchbruch.

Zu erblinden zählt für die meisten Menschen zum Schrecklichsten, was sie sich vorstellen können. In der Realität ereilt dieses Schicksal allein in Deutschland alljährlich rund 17.000 Menschen. Ihnen kann die Medizin trotz zahlreicher therapeutischer Neuentwicklung nicht helfen – wohl aber künftig die Technik.

Die Miniaturisierung der modernen Elektronik und die Erfolge mit Herzschrittmachern oder mit Cochlea-Implantaten zum Wiederherstellen des Hörens haben die Entwicklung elektronischer Netzhautimplantate, so genannter Sehchips, bereits vor mehr als zehn Jahren weltweit angestoßen. Die Resultate waren zunächst enttäuschend.

Die mittlerweile erarbeiteten Fortschritte versprechen jedoch Implantate, die es blinden Menschen tatsächlich wieder ermöglichen, in gewissen Umfang zu sehen. Die Forscher erproben derzeit verschiedene Ansätze, abgestimmt auf die Ursache der Erblindung. Prinzipiell bestehen bei Ausfällen entlang der „Sehbahn“ drei Möglichkeiten, Sehchips anzukoppeln: am Gehirn, an den Sehnerven oder an der Netzhaut, der Retina.

Ist der Sehnerv defekt, bleibt nur die direkte elektrische Stimulation der Sehrinde. Erste Versuche hierzu erfolgten bereits in den 1970er Jahren, schlugen jedoch fehl. Es waren keine stabilen Sehempfindungen

zu erzeugen. Zurzeit entwickeln mehrere Gruppen in den Vereinigten Staaten und in Portugal Elektrodenfelder, die an der Sehrinde am hinteren Pol des Gehirns ankoppeln und mit einer Digitalkamera angesteuert werden. William Dobbelle vom Dobbelle-Institut in Lissabon (Portugal) berichtete 2002 von einzelnen Parteien, bei denen rund hundert in die Gehirnoberfläche eingepflanzte Elektroden zumindest grobe Seheindrücke von Hell-dunkel-Feldern vermitteln konnten. Gegenstände oder Gesichter zu erkennen, gelang ihnen jedoch damals nicht. Nadelelektrodenfelder aus Silizium (siehe kleines Foto S. 2 im Kasten) entwickelt ein Team um Richard Norman von der Universität von Utah in Salt Lake City. Die feinen Nadeln werden mit Pressluft so weit in die Sehrinde hineingeschossen, dass die Spitzen direkt die Eingangsschichten der Sehbahnfasern berühren. Das Verfahren hat die Forschergruppe zwar bisher nur bei Versuchstieren erprobt. Doch ist nicht auszuschließen, dass damit eines Tages erblindeten Menschen brauchbare Bilder vermittelt werden können.

Den zweiten Ansatz – die Ankopplung an den Sehnerv – versucht beispielsweise eine Gruppe um Claude Veraart von der Universität Löwen in Belgien. Über eine um den Sehnerv gewickelte Manschette wollen die Forscher vier bis acht Elektroden so ansteuern, dass einzelne Nervenfaserbündel darin gereizt werden und daraufhin verschiedene räumliche Erregungsmuster an das Gehirn weiterleiten. Allerdings lassen sich mit nur acht Elektroden die 1,2 Millionen Fasern des Sehnervs nicht spezifisch reizen, daher reicht die räumliche und zeitliche Auflösung

nicht wirklich aus. Immerhin: Eine blinde Patientin, die ein solches Sehnervenimplantat erhalten hatte, konnte – nach zwanzig Sekunden Suchbewegungen der ansteuernden Videokamera – eine weiße Vase auf einem schwarzen, schachbrettartig gerasterten Tisch lokalisieren.

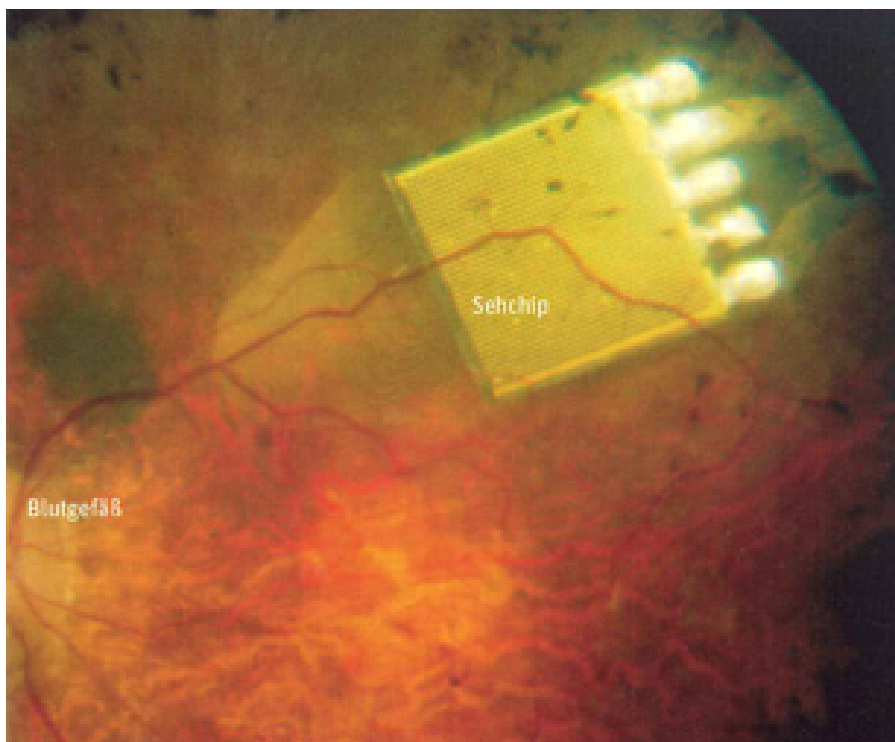
Der wohl vielversprechendste und von den meisten Forschergruppen favorisierte Ansatz aber ist, Implantate direkt an die Netzhaut anzuschließen. Dies bietet sich nicht zuletzt deshalb an, weil die Sehnervenfaserbündel an der Oberfläche der Retina noch flach auseinandergezogen sind – ähnlich wie das Ende eines aufgefächerten, dicken Telefonkabels, das zum „Anzapfen“ einlädt (siehe Kasten S. 3).

Dass solche elektrisch angesteuerten retinalen Implantate einen Seheindruck vermitteln können, wurde schon vor einigen Jahren nachgewiesen. Joe Rizzo von der Harvard-Universität in Boston, John L. Wyatt vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge sowie Mark Humayun und Eugene de Juan vom Doheny-Augen-Institut der Universität von Südkalifornien in Los Angeles setzten blinden Patienten auf die Netzhaut einzelne Elektroden auf, die über eine Drahtverbindung mit Strom versorgt wurden. Je nach Ort der Reizelektrode und abhängig von der Stärke und Dauer der Stimulationsströme konnten einigen Patienten geometrische Muster vermittelt werden. Dies gelang selbst bei Personen, die bereits seit Jahren erblindet waren.

Der retinale Ansatz ist also prinzipiell machbar. Ein großes Problem besteht aber darin, die Elektroden dauerhaft und schädigungsfrei an das neuronale Gewebe anzukoppeln. Für die „Biokompatibilität“ ebenso wichtig ist eine Art der Stimulation, die es erlaubt, über längere Zeit zu reizen, ohne die Nervenzellen zu schädigen. Schließlich gilt es auch die „Biostabilität“ sicherzustellen, also dass die Elektronik den Angriffen von Körperflüssigkeiten und Zellen jahrelang standhält. Das subretinale Implantat ist samt Schutzhülle immerhin etwa 50.000-mal kleiner als ein Herzschrittmacher.

In Kürze

- Blinde sehend machen können elektronische Sehprothesen auch in Zukunft nicht generell. Bei bestimmten, relativ häufigen Erkrankungen, die zur Erblindung führen, bieten sie jedoch berechtigte Hoffnung.
- Sehchips können auf oder unter die Netzhaut implantiert werden. Fachleute sprechen von epiretinalen und subretinalen Implantaten.
- Die Anforderungen: Sie sollen den Patienten ein ausreichendes Sehen ermöglichen, haltbar sein und die Netzhaut nicht schädigen.



Blick durch die Pupille eines der ersten Patienten mit einem so genannten subretinalen Implantat wenige Wochen nach der Operation: Der Sehchip und seine Trägerfolie sind durch die klare Netzhaut (Retina), die von Blutgefäßen durchzogen ist, ausgezeichnet zu erkennen.

Bei der Entwicklung von Sehchips, die an Nervenzellen der Netzhaut angeschlossen werden können, sind Deutschland und USA führend. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung beschäftigen

sich seit 1995 mehrere deutsche Gruppen mit zwei unterschiedlichen Ansätzen: dem so genannten epiretinalen und dem subretinalen Implantat. Ersteres liegt von der Pupille aus betrachtet auf der Netzhaut,

Letzteres unter ihr (siehe Kasten S. 3). Mittlerweile werden beide Ansätze auch in den Vereinigten Staaten und in Japan intensiv erforscht, sodass eine Art Wettlauf um ein wirklich brauchbares Netzhautimplantat entstanden ist.

Beim epiretinalen Implantat, das ein Forschungsverbund um Rolf Eckmiller von der Universität Bonn entwickelte, wird das Bild entweder von einer Kamera an einem Brillengestell aufgenommen oder von einem Sensor, den man an Stelle der natürlichen Linse einpflanzt. Die erfassten Bildinformationen müssen danach in Stimulationsimpulse umgewandelt und gezielt an Elektroden, die auf der Netzhaut liegen, übertragen werden. Dazu ist es dann erforderlich, die zungenförmigen Elektrodenfolien, die vom vorderen zum hinteren Augenpol reichen, dauerhaft zu befestigen.

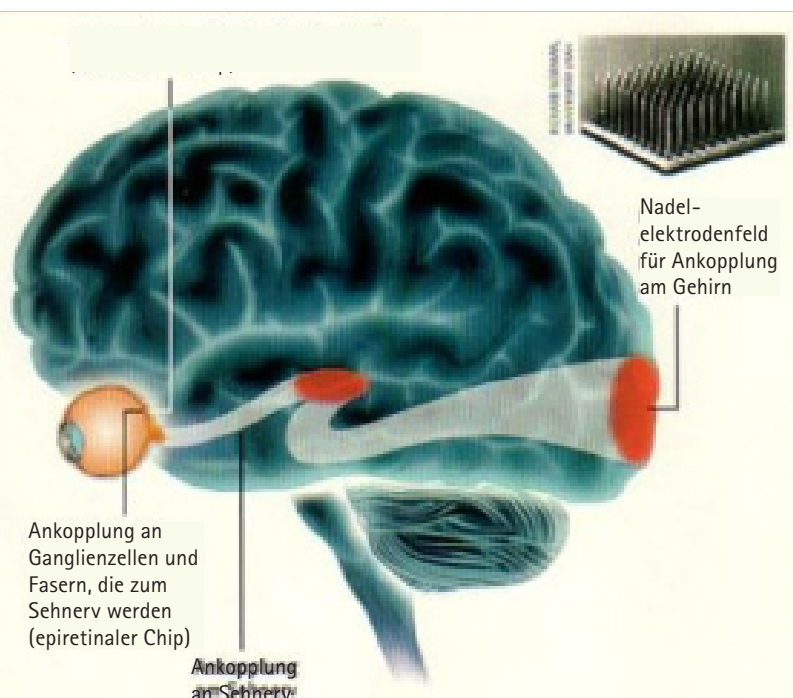
Die beteiligten Forschergruppen und Netzhautchirurgen erproben verschiedene Methoden dafür. Als nicht geeignet erwiesen sich Gewebekleber; etwas günstiger schnitten kleine Kunststoffnägeln ab, die durch die Netzhaut hindurch bis zur Lederhaut des Auges reichen. Möglicherweise wären die Folien auch zu „befestigen“, indem man Netzhautzellen in sie einwachsen lässt. Leider ist die Netzhaut sehr empfindlich und reagiert gerade auf „Störungen“ von der Glaskörperseite her oft mit ungesteuertem Zell- und Gefäßwachstum.

Ursachen dauerhafter Erblindung

Jährlich erblinden allein in Deutschland etwa 17.000 Menschen, denen die Medizin trotz zahlreicher therapeutischer Neuentwicklungen nicht helfen kann. Bei etwa einem Drittel sind Stäbchen und Zapfen – die Sehsinneszellen der Netzhaut – untergegangen. Etwa die Hälfte davon leidet an einer „Retinitis pigmentosa“, bei der schon in jungem Alter erblich bedingt die Sehzellen absterben. Die andere Hälfte leidet meist an einer „altersbedingten Makuladegeneration“; hier kann das retinale Pigmentepithel, das Sehzellen ernährt und erneuert, seine Aufgaben nicht mehr erfüllen.

Bei einem weiteren Drittel ist die „aufsteigende Sehbahn“ geschädigt; so gehen beim „Grünen Star“ die Ganglienzellen der Netzhaut zu Grunde, welche die Information der etwa 110 Millionen Lichtempfänger des Auges in verrechneter Form aufnehmen und über etwa 1,2 Millionen Fasern des Sehnervs an das Gehirn weiterleiten. Beim letzten Drittel sind auch die Zentren des Gehirns selbst geschädigt, etwa durch Tumoren oder Schlaganfälle.

Dem erstgenannten Drittel können prinzipiell retinale Sehprothesen helfen, dem zweiten Drittel corticale Sehprothesen, die an der Sehrinde, dem visuellen Cortex, ansetzen. Für das letzte Drittel wird es wahrscheinlich keinen technischen Funktionsersatz geben.



Drei Quadratmillimeter Hightech

Humayun und seine Mitarbeiter hatten einigen Patienten 16 Elektroden dieser Art eingepflanzt und über Drähte angesteuert. Es gelang damit jedoch nur, ein Hell-dunkel-Sehen sowie eine gewisse Richtungswahrnehmung zu vermitteln. Brauchbare Bilder entstanden bei der kleinen Zahl an Elektroden nicht.

Beim epiretinalen Ansatz werden die so genannten retinalen Ganglienzellen und möglicherweise auch die Output-Fasern elektrisch stimuliert. Ein Problem dabei ist, dass die Fasern stets „unterwegs“ gereizt

werden – irgendwo auf der Wegstrecke von ihrer in der Netzhaut gelegenen Ursprungszelle zum Sehnervaustritt. Nun interpretiert aber das Gehirn eine Erregung einer solchen Faser immer als einen bestimmten Lichtfleck im Sehraum. Dieser Punkt entspricht dem Ort der Ursprungszelle in der Netzhaut, aber nicht notwendigerweise dem Ort der an der Faser angekoppelten Elektrode. Deshalb muss bei dieser Methode ein Bild, bevor man es der Faserseite der Netzhaut übermittelt, erst wieder „ortsgetreu“ aufbereitet werden. Dies kann beispielsweise ein lernendes Softwaresystem, ein „Encoder“, übernehmen, das den

Reizort im Blickfeld jeweils so verschiebt, dass er zur eigentlichen Sehempfindung im Gesichtsfeld passt – eine komplexe Aufgabe, in deren Zentrum die Entwicklung eines lernfähigen Encoders steht.

Der subretinale Ansatz umgeht dieses Problem. Bei ihm wird ein Chip mit 1.500 lichtempfindlichen Mikrophotodioden, ein „MPD-Array“, unter die Netzhaut eingebracht – also direkt an die Stellen der Zapfen- und Stäbchenschichten, die bei den meisten Patienten mit altersbedingter Makuladegeneration und Retinitis pigmentosa zu Grunde gegangen sind (siehe Bilder).

Wie Sehchips an die Netzhaut ankoppeln

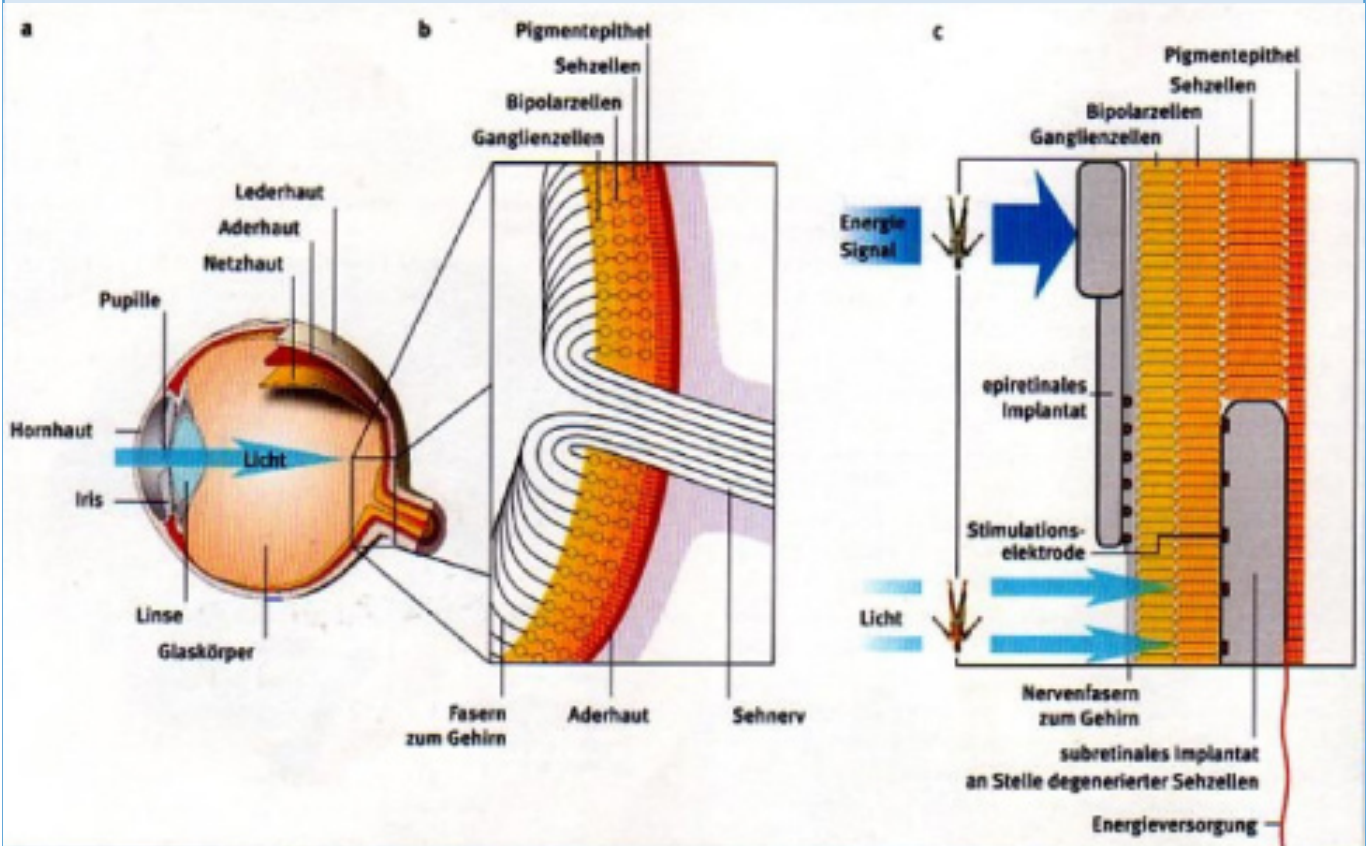
Beim gesunden Auge projizieren Hornhaut und Linse das zu sehende Objekt als umgekehrtes Abbild auf die Netzhaut, wo Sehzellen es in ein elektrisches Abbild verwandeln (a und b).

Bei einem subretinalen Implantat (c, rechts außen) werden die abgestorbenen Sehzellen an der hinteren Netzhaut durch ein Silikonplättchen ersetzt, auf dem sich Tausende lichtempfindlicher Mikrophotodioden befinden. Jede ist mit einer

Stimulationselektrode versehen. Das vom Gegenstand kommende Licht steuert direkt die Mikrophotodioden an. Die Elektroden stimulieren die verbliebenen Nervenzellen wie die Bipolarzellen und Ganglienzellen der Netzhautschicht. Dafür sind nur winzige Strommengen erforderlich. Die Zellen sind durchscheinend.

Das epiretinale Implantat (c, links) besitzt hingegen keine lichtempfindlichen Flächen. Stattdessen erhält es elektrische Signale

von einem mit einer externen Kamera ausgestatteten Rechner, der außerhalb am Körper getragen wird. Die Elektroden des epiretinalen Implantats stimulieren dann direkt die Ganglienzellen oder deren zum Gehirn ziehende Fasern, die sich beim Austritt aus dem Auge zum Sehnerv formieren. Die Fasern „ortsgerecht“ anzuregen, verlangt bei diesem System einigen Rechenaufwand.



Einen solchen Chip erprobt ein Verbund der Universitätsaugenkliniken in Tübingen und Regensburg, das NMI (Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut) in Reutlingen sowie das Institut für Mikroelektronik Stuttgart (IMS) und das Institut für Physikalische Elektronik (IPE) an der Universität Stuttgart zusammen mit der aus unserem Verbund hervorgegangenen Firma Retina Implant AG, Reutlingen. Quadratisch, mit einer Kantenlänge von drei Millimetern, und nur etwa ein zehntel Millimeter dick überdeckt der Chip ein Sehfeld von etwa zwölf Grad (siehe Grafik unten links). Sein Schaltprinzip ist einem von Bernd Höfflinger am IMS entwickelten hochempfindlichen Kamerachip nachempfunden. Dank eines neuen, von der Universitätsaugenklinik Regensburg entwickelten Operationsverfahren kann er direkt von außen durch die Aderhaut unter die Netzhaut geschoben und muss nicht mehr mitten durch den Glaskörperraum und einen zusätzlich notwendigen kleinen Schnitt in der Netzhaut an den Bestimmungsort gebracht werden.

Der Chip liegt in der Position der degenerierten Sehzellen und koppelt somit direkt an die Neuronen der inneren (hinteren) und mittleren Netzhautschicht an. Diese für die Verrechnung so wichtigen Nervenzellen sind nachgewiesenermaßen selbst noch nach langjähriger Blindheit zahlreich vorhanden. Derart korrekt „verortet“ bedarf es keiner weiteren externen Elektronik. Die elektrisch angesteuerten Netzhautzellen verrechnen die Signale auf quasi natürlichem Wege und leiten ihr Ergebnis an die Ganglienzellen weiter, deren Fasern zum Gehirn führen.

Wie frühere Versuche unserer Arbeitsgruppe mit Schweinen gezeigt haben, behält ein solcher Chip seine Lage bei. Zudem blieben

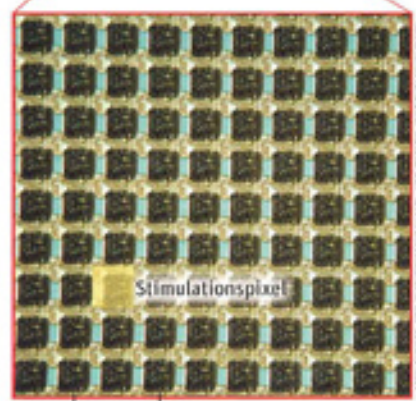
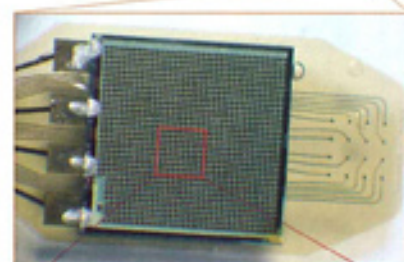
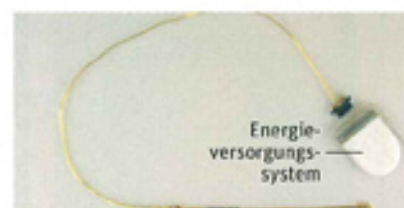
die kontaktierten inneren und mittleren Zellschichten über mehr als 28 Monate hinweg gut erhalten. Allerdings erwies sich das Licht in natürlicher Umgebung als zu schwach, um allein ausreichend Reizstrom an jeder Elektrode zu erzeugen. Die Gruppe um Alan Chow von der Universität Chicago konnte bei zunächst zehn Patienten zwar zeigen, dass solche dünnen, passiven Siliziumchips über Jahre hinweg im subretinalen Raum sehr gut vertragen werden. Es kam weder zu Entzündungen noch zu Abstoßreaktionen, Blutungen oder Netzhautablösungen. Der kleine passive Solarzellenchip konnte jedoch nicht genügend Stimulationsstrom erzeugen, um den Patienten zu einem ausreichenden Sehen zu verhelfen.

1.500 Elektroden auf Haaresbreite Abstand

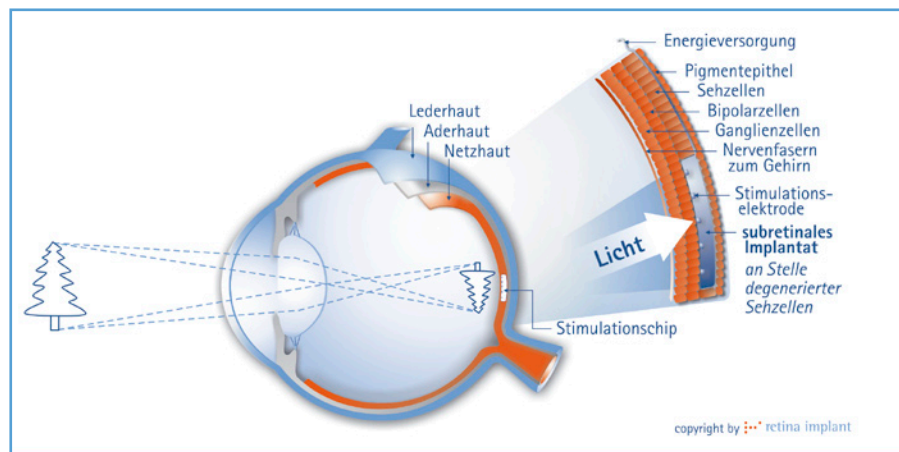
Unsere Arbeitsgruppe begann deshalb im Jahr 2000, ein „aktives“ Implantat zu entwickeln,

Das neue, aktive Implantat (rechts oben) besteht aus einem subretinalen Sehchip (Foto darunter) mit rund 1.500 Empfängern. Er ist auf einem flexiblen Folienbändchen aufgebracht, das über ein Kabel mit einem Energieversorgungssystem verbunden ist. Dieses wird hinter dem Ohr unter die Haut implantiert und bekommt seine Energie mittels elektrischer Induktion eingespeist. Der Sehchip des aktiven Implantats umfasst rund 40 mal 40 „Zellen“, sprich Stimulationspixel (Ausschnitte rechts). Darin messen Mikrophotodioden die lokale Bildhelligkeit. Das Licht eines Objekts (ganz unten) erzeugt einen kleinen „Schaltstrom“, der die extern zugeführte Energie kontrolliert auf die Nervenzellen lenkt.

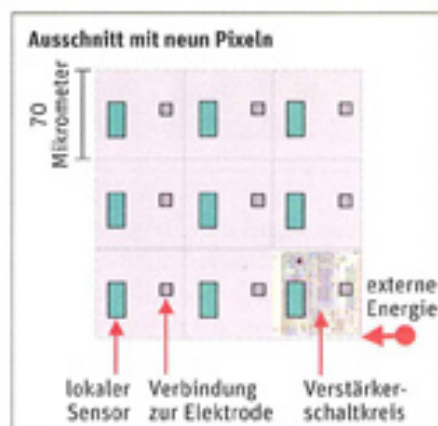
dem Energie von außen zugeführt wird. Dies geschieht durch das Einkoppeln von Energie, wie bei einem Cochlea-Implantat, oder durch die Einspeisung von Infrarotlicht, was Wilfried Nitsch vom NMI und Kei Shinoda von der Universitätsaugenklinik Tübingen eingehend untersucht haben. Wie das passive wird auch das aktive Implantat operativ unter die Netzhaut gepflanzt. Der natürliche optische Apparat des Auges – aus Hornhaut und Linse bestehend – bildet dann die visuelle Szene auf 1.500 lichtempfind-



Titannitrid-Elektroden



copyright by retina implant



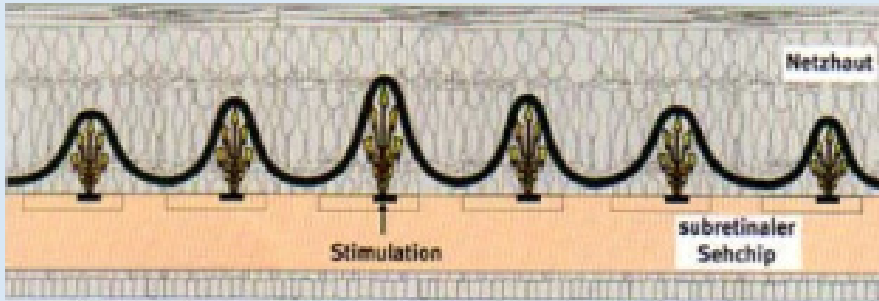
Was der Sehchip leisten könnte

Welchen Seheindruck die elektronische Prothese erzeugt, war zunächst nur durch Stimulation zu veranschaulichen. Dazu wird ein farbiges Porträt oder eine Buchstabentafel in ein zweidimensionales Erregungsmuster umgewandelt und als Anordnung von ungefähr 40 mal 40 kleinen Erregungspunkten – Pixeln – dargestellt (Bilder a der Reihen rechts). Die Qualität hängt davon ab, wie viele Neuronen der Netzhaut gemeinsam elektrisch gereizt werden. Das System stimuliert ja nicht einzelne Zellen, sondern an jedem Reiz-

punkt eine kleine Gruppe (siehe Schema unten). Die stimulierten Seheindrücke (b bis d, Bildreihen rechts) entsprechen von links nach rechts schwacher, mittlerer und starker Reizung.

Weil der Sehchip stets kleine Gruppen von Nervenzellen in der Netzhaut anspricht, kann er kein farbgereutes Bild hervorrufen. Jedes Reizfeld wird Rot, Grün und Blau übermittelnde Neuronen umfassen, die gemeinsam im Gehirn letztlich ein „farbloses“, sprich ein Schwarz-Weiß-Bild erzeugen, allenfalls ein pastelliges „Falschfarbenbild“.

Allerdings weiß man von Innenohrprothesen, die ja auch keine Sprache übertragen, wie sie dem Normalhörenden vertraut ist, dass das Gehirn verfremdete Signale sehr gut erkennen lernt. Analog braucht unser Gehirn keine fotografische Realität, um auf Strichzeichnungen oder farbverfremdeten Bildern Objekte wieder zu erkennen. Tatsächlich konnten die Patienten einer ersten Pilotstudie Lichtquellen wie Fenster und Lampen orten, teilweise auch helle Gegenstände wie Geschirr auf dunklem Grund.



Das Schema verdeutlicht, wie sich die elektrische Erregung verteilt, die durch die Elektrodenfelder eines subretinalen Implantats entsteht. Jeder Reizpunkt stimuliert eine kleine Gruppe von Nervenzellen der Netzhaut gleichzeitig.

lichen Photodioden ab. Das Licht, das vom betrachteten Gegenstand ausgeht, dient aber beim aktiven Implantat nicht mehr als Quelle der Energie, sondern generiert lediglich einen kleinen „Schaltstrom“, um die extern zugeführte Energie kontrolliert auf die Nervenzellen der Netzhaut zu lenken.

Unsere Experimente mit Tieren ergaben, dass eine geringe Ladung von etwa 0,5 Nanocoulomb pro Elektrode ausreicht, um Nervenzellen der Netzhaut zu erregen. Dies entspricht typischerweise einem Strom von zirka zehn millionstel Ampere. Alfred Stett vom NMI in Reutlingen wies an isolierten, von Ratten stammenden Netzhautpräparaten nach, dass man die Netzhaut auch im Falle einer Degeneration räumlich korrekt reizen kann, wenn die Elektroden auf Haaresbreite – in einem Abstand von 70 Mikrometern – stehen. Dass die Nervenimpulse, die mit subretinalen Elektroden zu erreichen sind, in der Sehrinde von Schweinen ankommen, belegten Florian Gekeler und Helmut Sachs von den Universitätsaugenkliniken Tübingen und Regensburg. Die Gruppen um Reinhard Eckhorn in Marburg und Ulf Eysel in Bochum wiesen zudem nach, dass mit

epi- wie auch subretinaler Stimulation im Gehirn von Tieren eine räumliche Auflösung von mindestens einem Sehwinkelgrad zu erreichen ist. Dies genügt, um Bewegungen und Objekte zu erkennen.

Blick durchs Küchenfenster

Mit unserem aktiven subretinalen Sehchip lag nach Erprobung im Tierversuch erstmals ein unter die Netzhaut verpflanzbares Implantat vor, das extern mit elektrischer Energie versorgt wird und mit einer ausreichenden Zahl von Elektroden ausgestattet ist. Nach den in Tierversuchen errechneten Werten ist damit eine Auflösung möglich, wie sie etwa dem Blick durch ein Küchenfenster aus zwei Meter Entfernung entspricht, dessen Fläche in rund 1.500 kleine Pixel aufgelöst wird (#siehe Abbildung oben#). Jeder der 1.500 Bildpunkte wird von einem Lichtsensor aufgenommen. Hinter jedem der 1.500 Sensoren wiederum liegt ein Verstärker, dessen Verstärkungsgrad entsprechend der mittleren Bildhelligkeit eingestellt werden kann. Dies ermöglicht eine optimale Stimulation, sowohl bei hellem Tageslicht wie bei dämmriger Umgebung.

Welche Bildeindrücke die neuen Sehchips tatsächlich vermitteln, konnten jedoch erst diejenigen blinden Menschen beschreiben, welche die Implantate erstmals eingepflanzt bekommen sollten – nachdem sie alle zuvor zu absolvierenden Prüfungen bestanden hatten.

Das Unternehmen „Retina Implant AG“, eine Firma, die das Wissen des Verbundes verwerten soll, bereitete dazu 2004 mit sieben blinden, an Retinitis pigmentosa leidenden Patienten eine klinische Pilotstudie vor, deren Ergebnisse im Frühjahr 2007 vorgestellt wurden. Dies lieferte äußerst wertvolle Daten zur Stärke der Reizströme, ihrer optimalen Dauer und Polarität, zur zeitlichen Folge von Lichtreizen, zur räumlichen Auflösung, zur Homogenität und Stabilität der Wahrnehmungen sowie zur Verträglichkeit des Implantats beim Menschen. Und das wohl Wichtigste: Die Patienten konnten Muster sehen, Gegenstände lokalisieren und Lichtquellen beschreiben.

Bei dem verwendeten Implantat handelte es sich um ein nur für Forschungszwecke hergestelltes Muster mit Kabeln. Der Prototyp eines drahtlosen Implantats, das seine Energie extern durch Induktionsströme



erhält, ist bereits entwickelt. Eine voll funktionsfähige Version soll dann 2009 auf den Markt kommen.

Bereits in nächster Zeit, davon sind wir überzeugt, ist mit den subretinalen Implantaten, die erblindeten Menschen auf elektronischem Wege Bilder mit hoher Auflösung vermitteln, ein Durchbruch bei der Wiederherstellung des Sehens zu erwarten. Die neuen Sehchips werden Erblindeten wieder zu mehr Eigenständigkeit, zu einer besseren Orientierung, zum Greifen von Gegenständen, möglicherweise gar zum Lesen, kurz zu einem sozial erfüllten selbstständigen Leben verhelfen. ■

Literaturhinweise

- Visual resolution with retinal implants estimated from recording in cat visual cortex. Von R. Eckhorn et al. in: Vision research Bd. 48, S. 2675, 2006
- Will retinal implants restore vision? Von E. Zrenner in: Science, Bd. 295, S. 1022, 2002
- Learning retina implants with epiretinal contacts. Von R. Eckmiller in: Ophthalmic Research, Bd. 29, S. 281, 1997

Eberhart Zrenner (links) ist Ärztlicher Direktor am Department für Augenheilkunde Tübingen und Leiter der klinischen Studie mit dem

subretinalen Implantat. Hugo Hämmerle, stellvertretender Leiter des NMI (Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut) in Reutlingen, koordinierte die Retina-Implant-Projekte des BMBF. Sie haben für dieses Dossier ihren älteren Beitrag aktualisiert.

