

Der Einbau von Technik in das Gehirn

Das Wechselspiel von Informationsbegriffen
und Technologieentwicklung
am Beispiel des Hörens

Markus Christen
Institut für Neuroinformatik
Universität / ETH Zürich

Überblick

Welche Entwicklung wollen wir verstehen?

Warum ist „Hören“ ein gutes Beispiel?

Exakte und metaphorische Information

These und Begründungsstrategie

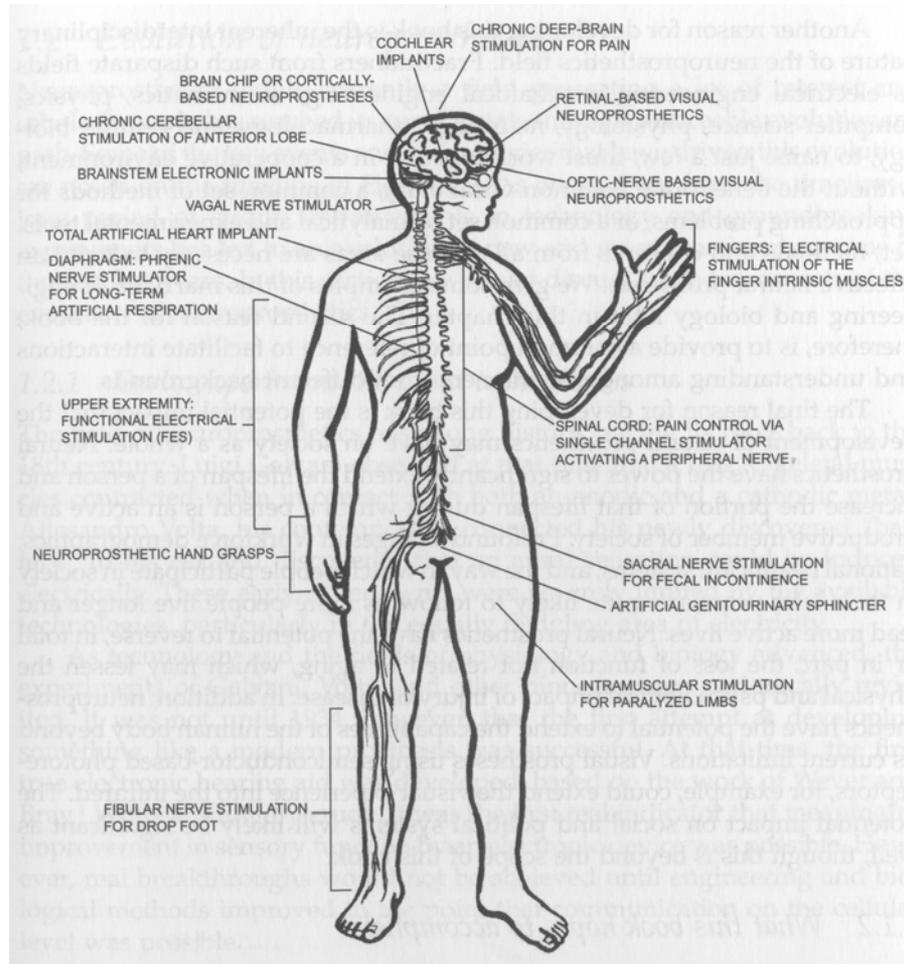
Volta und elektrophone Effekte

Warum setzte sich das Cochlea-Implantat durch?

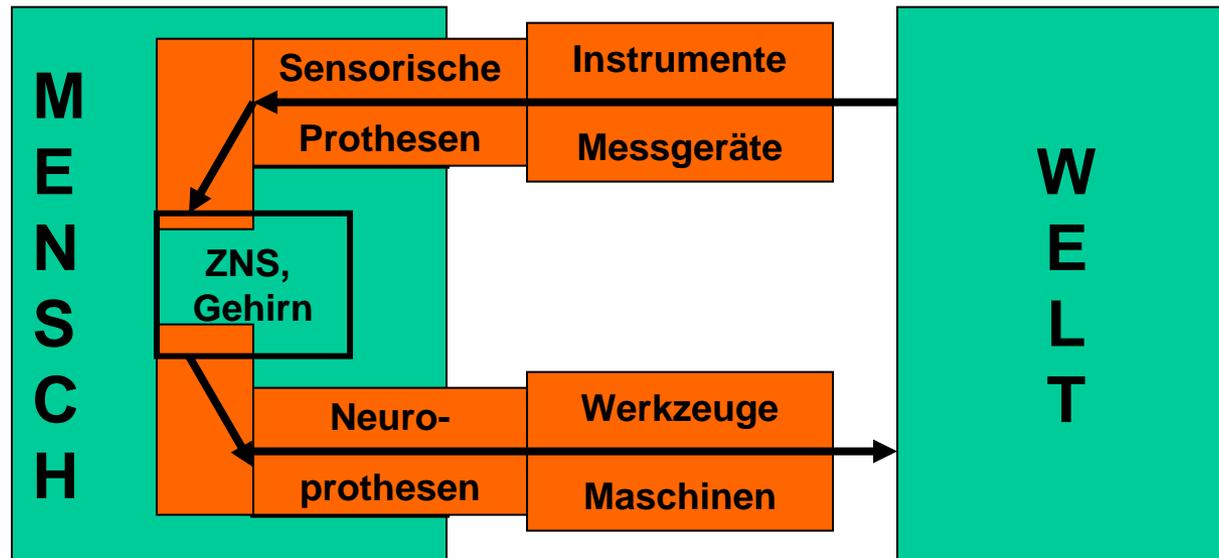
Hirnstamm-Implantate – der Vormarsch ins Gehirn

Hirntechnik und Information – ein Ausblick

Brain-Machine-Interfaces und ZNS-Prothesen

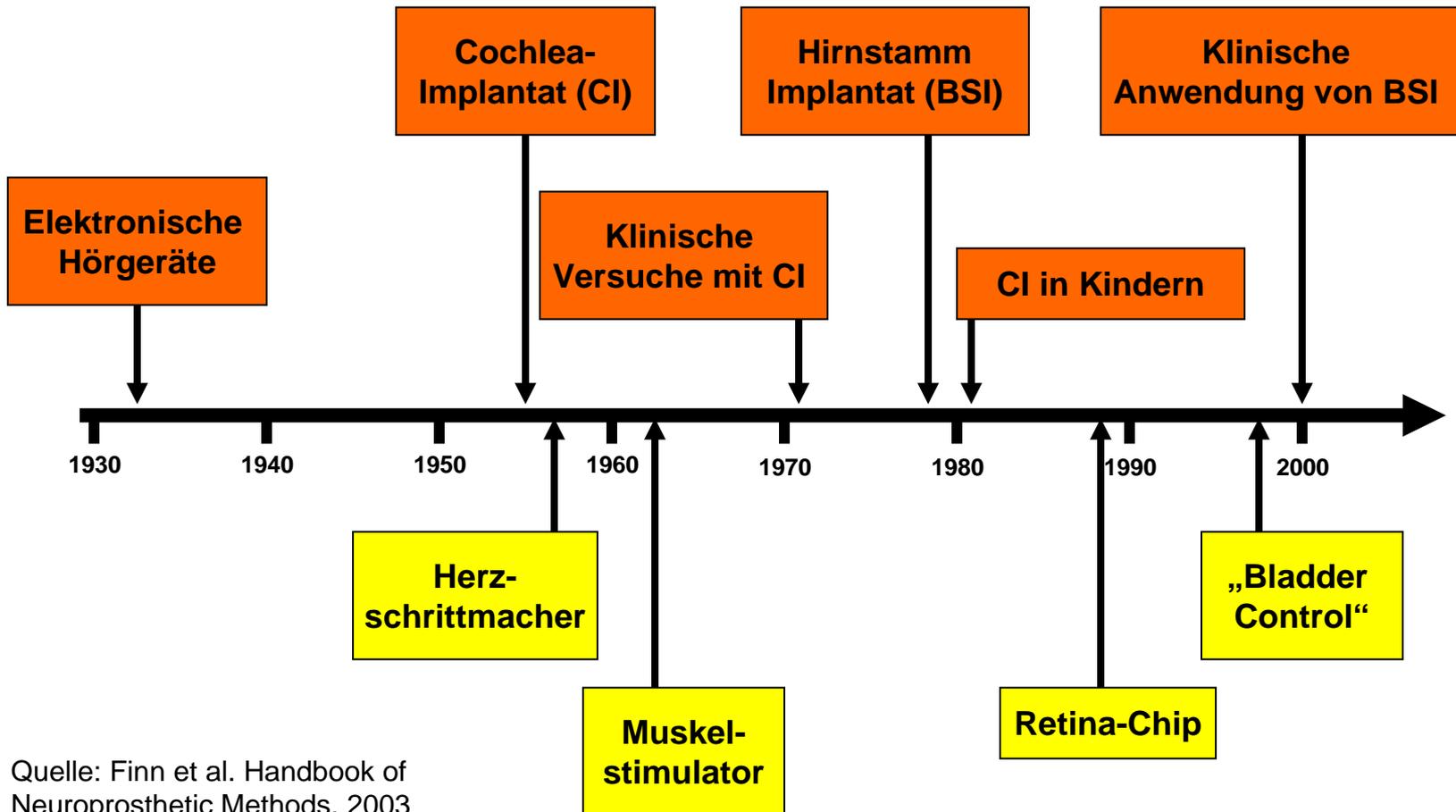


Die Invasion des Gehirns durch Technologie



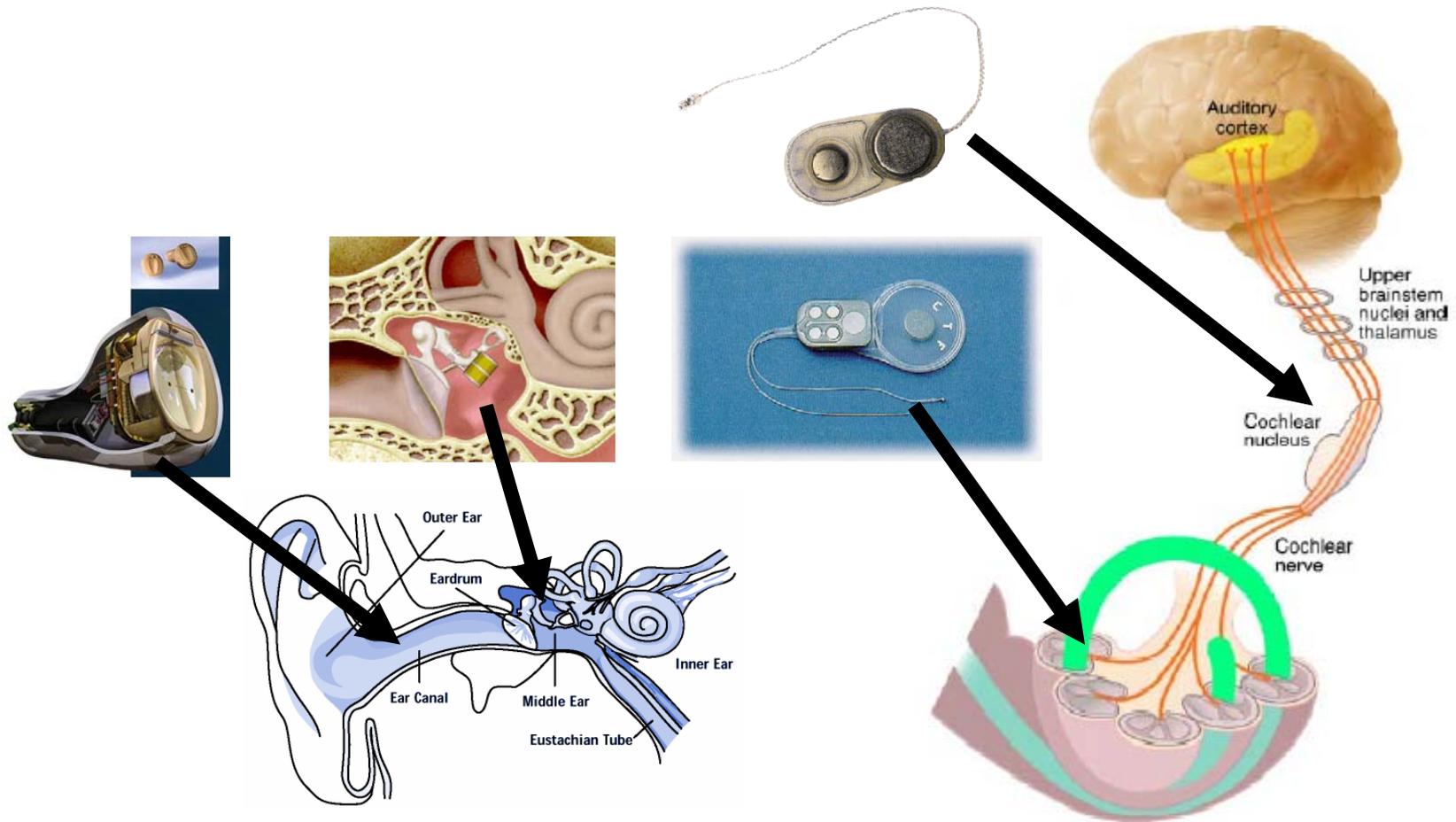
- 1) „Urzustand“
- 2) Mensch als Werkzeugnutzer
- 3) Integration von Technologie in den Körper
- 4) Integration von Technologie in das Gehirn

Der Hörsinn: das älteste Einfallstor von Technologie in das Gehirn



Quelle: Finn et al. Handbook of Neuroprosthetic Methods, 2003

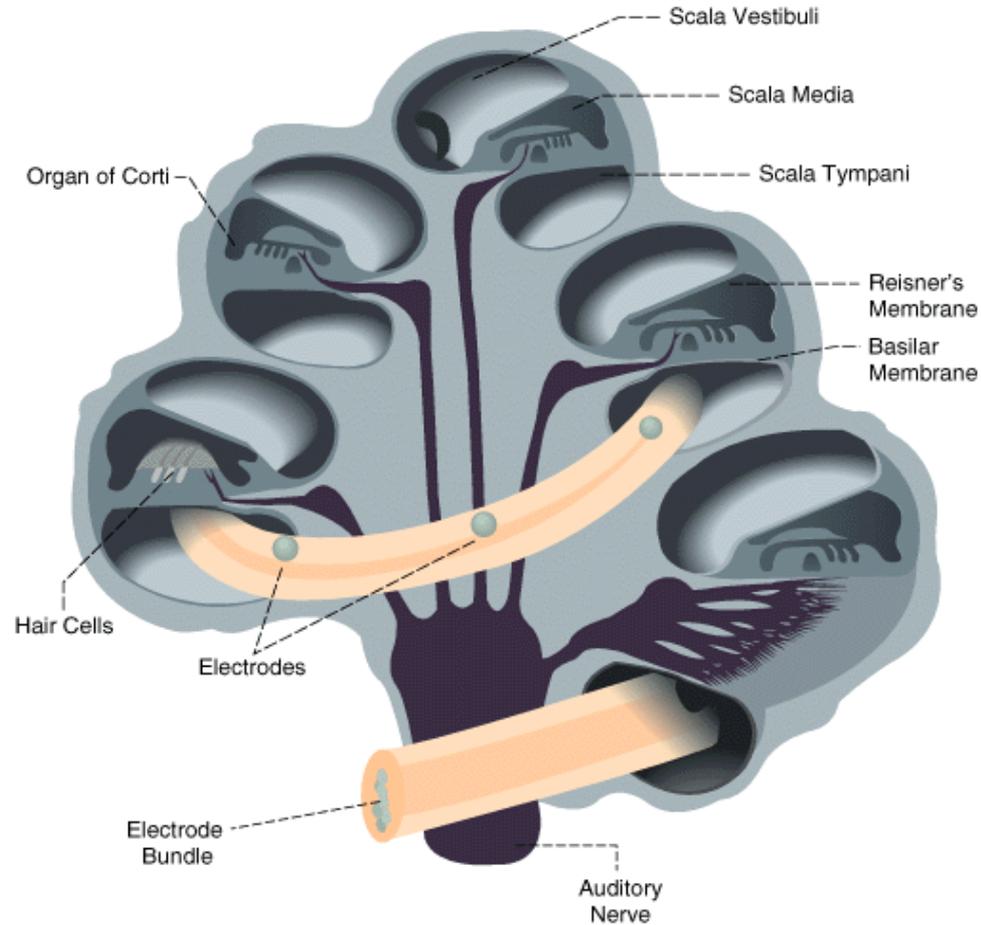
Von der Ohrmuschel in den Kortex: Stationen des technologischen Vormarschs



Quelle: NYC Department of Health website

Science 295, 2003, p. 1027

Einschub: Die menschliche Cochlea



On the brain, 3(4), 1994, p.1 (online)

Zur Unterscheidung von metaphorischer und exakter Information

(Klinische) Praktiker

Verschiedene Ebenen der Wahrnehmungsqualität:

- „Auditorische Bewusstheit“
- Erkennen raumzeitlicher auditorischer Muster
- Sprachverstehen

Semantische Aspekte der Information stehen im Vordergrund. Was „bedeutet“ das Signal für den Betroffenen, was kann er damit anfangen?

„Metaphorische Information“

(Wissenschaftliche) Theoretiker

Untersuchung des Signals und dessen Kodierung in Spikes:

- Spektrogramm
- Bitrate der Quelle
- Neuraler Code
- Redundanz

Gesucht ist eine geeignete Quantifizierung des Stimulus/ Signals, um den physikalischen Weg des Informationstransfers verstehen zu können.

„Exakte Information“

Informationskonzepte: Eine Strategie für den Vorstoss in den Kortex

Eine sinnvoll scheinendes und in der wissenschaftlichen Literatur zur Entwicklung von „Brain-Machine-Interfaces“ beschriebenes Vorgehen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Man gewinnt umfassende Kenntnisse über die Prozesse des Informationstransfers und -verarbeitung innerhalb des jeweiligen neuronalen Systems (im Sinn der exakten Information)
- 2) Man setzt diese Elemente der exakten Information in Beziehung zu den für den Benutzer sinnhaften Elementen im Kontext von Wahrnehmung und Kontrolle (metaphorische Information)
- 3) Man entwickelt technische Geräte, welche jene Elemente der exakten Information reproduzieren, welche die gewünschte metaphorische Information erzeugen.

These und Begründungsstrategie

Was uns interessiert:

Lässt sich die genannte Vorgehensweise im Fall der Neuroprothetik des Hörens aufzeigen?
Wenn nein, warum nicht?

Es wird sich zeigen:

Die Entwicklung der Technologie erfolgte gegen alle damaligen Kenntnisse bezüglich exakter Information im auditorischen System. Relevant war, wie die Versuchspersonen die metaphorische Information der Systeme zu nutzen vermochten.

Wir untersuchen dazu:

- Welches Konzept von Information wurde in der Kontroverse um Cochlea-Implantate verwendet?
- Welches Bild von den Versuchspersonen wurde von den Kontrahenten vermittelt?

Die Suche nach einem Übervater: Alessandro Voltas Ohr im Stromkreis

Je n'ai plus qu'à dire un mot sur l'ouïe. Ce sens, que j'avois inutilement cherché à exciter avec deux seules lames métalliques, quoique les plus actives entre tous les *moteurs* d'électricité, savoir, une d'argent, ou d'or, et l'autre de zinc, je suis enfin parvenu à l'affecter avec mon nouvel appareil, composé de 30 ou 40 couples de ces métaux. J'ai introduit, bien avant dans les deux oreilles, deux espèces de sondes ou verges métalliques, avec les bouts arrondis; et je les ai fait communiquer immédiatement aux deux extrémités de l'appareil. Au moment que le cercle a été ainsi complété, j'ai reçu une secousse dans la tête; et, quelques moments après, (les communications continuant sans aucune interruption,) j'ai commencé à sentir un son, ou plutôt un bruit, dans les oreilles, que je ne saurois bien définir; c'étoit une espèce de craquement à secousse, ou petillement, comme si quelque pâte ou matière tenace bouillonna. Ce bruit continua sans relâche, et sans augmentation, tout le tems que le cercle fut complet, &c. La sensation désagréable, et que je craignis dangereuse, de la secousse dans le cerveau, a fait que je n'ai pas répété plusieurs fois cette expérience.

Alexander Volta: On the Eletricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, 1800(2), 403-431. (p. 427)

Elektrotherapie und Scharlatanerie im 19. Jahrhundert

Trotz der „sensation désagréable“ von Volta wurde die Elektrostimulation des Gehörs im 19. Jahrhundert weiter erforscht:

- J.W. Ritter wiederholte das Experiment 1801 (mit über 100 Volt!). Seine (begreiflicherweise) sehr schlechten Erfahrungen entmutigte über Jahre weitere Forscher, sich dem Phänomen weiter zu widmen.
- In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erfolgte eine ernsthaftere Untersuchung des Phänomens (Duchenne of Boulogne, R. Brenner, Beauregard/Duprey)
- Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich eine eigentliche „Elektro-Ohrenheilkunde“ im Zug der aufkommenden „Elektrotherapie“. Sehr bald wurde der Scharlatanerie-Verdacht erhoben.

Elektrophone Effekte: Ein erster, erfolgreicher Klärungsversuch

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts folgte eine im Sinn der exakten Information erste begriffliche Präzisierung der Informationsverarbeitung im auditorischen System (Adrian 1928: neuraler Code, Fletcher 1929: „Speech and hearing“, u.a.).

- Wever/Bray (1930): Quantitative Erforschung der Hörnerv-Reizung. „Telephonic theory of hearing“ – erstmals wurde die Möglichkeit des „künstlichen Hörens“ aufgeworfen.
- Diverse russische Forscher (1930er): Die Cochlear als Ort der elektrischen Stimulation.
- Stevens/Jones (1939/40): Drei Mechanismen des elektrischen Hörens: Mittelohr als Signalwandler, direkte Effekte des Stroms auf die Basilarmembran, direkte Stimulation des Hörnervs.

Fast alle bisherige Formen des „Elektrohörens“ entpuppten sich als elektrophone Effekte, d.h. eine intakte Cochlea ist nötig.

Die ersten Hörnerv-Stimulationen

Experimente mit Cochlea Implantate/Hörnerv-Stimulationen:

1950: Lundberg

1957: Djourno/Eyriès

1961: House/Doyle/Doyle (unpubl.)

1963: Zöllner/Keidel (lediglich ein Kommentar)

1963: Doyle/Doyle/Turnbull/Abbey/House

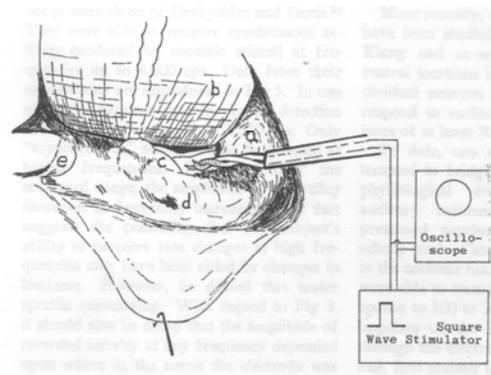
1964: Simmons/Mongeon/Lewis/Huntington

1965: Simmons/Epley/Lummis/Guttman/
Frishkopf/Harmon/Zwicker

1966: Simmons

1968: Michelson

Die Zahl der aktiven Forscher war sehr gering: James Doyle, William House, Robin Michelson, Blair Simmons als „Agitatoren“.



Arch Otoralyn
79 (1964) p 562

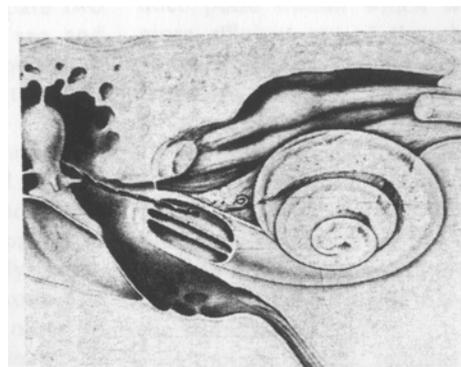


Fig. 1. Approximate configuration and location of electrode complex within the modiolus. Five, 0.003-inch (75- μ) stainless steel electrodes, insulated with Formvar, were spiraled around a 0.005-inch (125- μ) electrode, and exposed only at the tips. The drawing indicates that probably one, perhaps two electrodes, are bent away from the others. Otherwise, the tip separations were about 1 mm.

Science 148,
1965, p. 105

„Only noise“ – Theoretische Barrieren

Aufgrund des Wissens über Informationsverarbeitung und -transfers in der Cochlea war es unvorstellbar, wie durch simple Elektrostimulation des Hörnervs via einem einzigen oder nur weniger Kanäle (sonst sind es etwa 30'000):

... das tonotopische Prinzip erhalten werden kann

... vergleichbare Frequenzkodierung erreicht werden kann

Das System Ohr-Hirn reduziert die Bitrate des Sprachsignals (Schall) von rund 100'000 Bit/sec auf 50 Bit/sec derart, das Verständnis möglich ist. Die Rolle der Cochlea in diesem Prozess schien mit den Möglichkeiten von damals nicht simulierbar zu sein.

So, in conclusion, on the basis of the data that has been accumulated through years of experimental work on the ear, there is no way, regardless of the number of terminals, by means of which one can get tonotopic or specific frequency stimulation by attempting to stimulate peripheral first order neuron dendrites. All that would be produced would be a noise. True it can vary in character and presumably then the nerve trunk is being stimulated, and not specific fibers. And thirdly, even if this is stimulated, the dynamic range is liable to be most impractical."

„Menschenversuche!“ – Rolle und Darstellung der Versuchspersonen (1)

Nach Ansicht führender Neurophysiologen (z.B. Nelson Kiang) war es angesichts der Unnützlichkeit des Unterfangens und der Gefahr der irreversiblen Zerstörung von Teilen des auditorischen Systems unverantwortlich, mit CI Versuche an Menschen zu machen:

Although certain key issues can only be resolved eventually by work on humans, the present state of basic knowledge and technical competence argues strongly for additional preliminary work on animals.

Ann Otol 81, 1973, p. 729

Entsprechend wurden auch die Aussagen von Versuchspersonen in den Publikationen der „CI-Befürworter“ gewertet: Man wies regelmässig darauf hin, dass Sprachverständnis nicht erreicht wird. In (später) eigenen Versuchen wurden Versuchspersonen sehr neutral beschrieben.

„Menschenversuche!“ – Rolle und Darstellung der Versuchspersonen (2)

Ganz anders in den Publikationen der „CI-Befürworter“: Die Versuchspersonen sowie deren Beobachtungen wurden sehr eingehend vorgestellt. Die Nützlichkeit der wahrgenommenen Information wurde herausgehoben:

The first encounter with “speech sounds” may help the reader to see precisely what we mean: Toward the end of an early session, a 100/sec stimulus was introduced in a final attempt to extract a spontaneous description from the subject. After some minutes of repeated stimulation and questioning, for no special reason the intensity was varied continuously and irregularly over a range of about 10 db. The subject’s response to this irregular amplitude modulation was immediate: “Sounds like somebody trying to talk.” Stimulation in the same fashion at several other rates established that the voice was male and that it was always the same “voice.”

C. G. was perhaps a very fortunate choice. He is an ambitious and goal-oriented individual who is tenacious in his desire to maximize the use he can derive from the implant. He has enthusiastically participated in whatever studies deemed necessary. In addition, he is both articulate and an excellent observer. C. G. has been able to communicate to us much valuable information concerning his experience with the implant, and has made thoughtful suggestions concerning ways of upgrading the system.

A combination of anticipation and doubt preceded the field testing of a new electronic cochlea. Anxiety was gradually replaced by excitement as all kinds of new sounds were experienced.

Sound is so immediate, natural, conscious, etc., that it is a totally different experience from highly amplified source from a regular hearing aid.

Saturday morning I heard a persistent sound that I could not identify. My son came out into the yard and said it was a mockingbird. I asked about a quieter noise and he said it was the cat and her kittens.

Ann Otol 85 (suppl, 27), 1976, p 184

„Menschenversuche!“ – Rolle und Darstellung der Versuchspersonen (3)

Die damaligen Exponenten der CI-Forschung entschieden sich gegen den damaligen Kenntnisstand über das auditorische System (exakte Information) und für die Wahrnehmungen ihrer wenigen Patienten (metaphorische Information). William House meinte dazu im Rückblick:

At this point Jack and I were faced with a dilemma. Should we accept what the patient, Chuck Graser, was telling us, namely that the VIIIth nerve listens to the electric current it wants to hear, or should we say no we don't believe it because it makes no physiological sense.

We accepted what Chuck was telling us and thus the single-channel implant was born.

Fraysse et al. 1992, p.2

Evolution des Disput: CI-Konferenzen in den 1970er und 1980er Jahren (1)

Die Etablierung der CI-Technologie erfolgte während der 1970er Jahre. Am Beginn des Jahrzehnts empfanden die wenigen Befürworter eine eigentliche „feindselige Stimmung“ (Simmons: „(...) all but a very few basic scientists were hostile towards the entire idea“). Exemplarisch dazu der Diskussionsbeitrag von Kiang an einer der erste CI-Konferenzen 1973:

My overwhelming impression is that the current crop of workers on human auditory prostheses simply do not make use of the known results in auditory physiology.

Dr. House's results are no different from those of previous workers except that the criteria applied to the definition of success have been lowered. Enthusiastic testimonials from patients cannot take the place of objective measures of performance capabilities.

Evolution des Disput: CI-Konferenzen in den 1970er und 1980er Jahren (2)

Die Befürworter haben in einem fast schon missionarischen Ton auf diese Vorwürfe reagiert. Exemplarisch dazu House:

We are entering a new era of otology. For the past thirty years we have been in the conductive hearing loss era which was a very stimulating, interesting and wonderful time to have practiced but we are now entering the era of the sensory hearing loss. There is great urgency about this because, as was pointed out by Dr. Lurie and several other speakers, patients who are totally deaf want to hear and they have a right to hear. That is what medicine is all about. That is why we are here.

Ann Otol 82, 1973, p 517

Evolution des Disput: CI-Konferenzen in den 1970er und 1980er Jahren (3)

Ab Ende der 1970er Jahre war eine Konvergenz zwischen den klinischen Erfahrungen und dem Verständnis der Kodierung von CI festzustellen – was für das Erreichen des eigentlichen Ziels (Sprachverständnis) auch nötig war. Bis zu diesem Punkt waren aber gemäss einem Rückblick von Blair Simmons drei Faktoren für das Überleben des CI-Programms verantwortlich:

- Die Hartnäckigkeit einiger weniger CI-Enthusiasten
- Das Interesse an der Stimulation visueller (sub-)kortikaler Regionen zu Beginn der 1970er und die Erkenntnis, dass dort die Sachlage zu kompliziert war und man beim auditorischen System wohl mehr Erfolg hat.
- Ein steigendes Interesse von Ingenieuren an biomedizinischer Forschung gegen Ende der 1970er.

Eine Anmerkung zur Rolle der Medien

Kontrovers (wenn von mir auch nicht systematisch untersucht) wurde die Rolle der Medien im CI-Disput wahrgenommen. Ein Zeitungsbericht über die Resultate von Djournio/Eyriès brachte William House auf das Thema. Offenbar haben CI immer wieder das Interesse der Medien geweckt, so dass die Gegner unerwünschte Sensationshascherei verhindern wollten:

There will be people demanding that these procedures be done on them and I think that is one of the things we have to be very careful about because here in this Society you have listened to papers of scientific value, more or less, but they should not be released to the newspapers. Many newspapers will enlarge and expand it so that when it reaches the headlines you likely will read that "Otologists are now restoring hearing to the deaf." That is the big danger as I see it.

Implantate für den Hirnstamm: Vorstoss ins Ungewisse

Auch der nächste Vorstoss der Technologie in Richtung Kortex wurde vorgenommen (die auditorischen Hirnstamm-Implantate), ohne dass umfassende Kenntnisse über die Informationsverarbeitung im entsprechenden Hirnteil vorhanden waren. Die ersten Versuche erfolgten 1979 auf Drängen einer Patientin im House Ear Institute (also im Umfeld der gleichen Protagonisten wie bei den CI). Kennzeichnend ist erneut die enge Forscher-Patienten-Bindung. Dazu ein Zitat:

Acknowledgements

Development of an implantable neural prosthesis requires a multidisciplinary team to work on all aspects of the device. The work reported could not have been accomplished without the entire ABI team. We dedicate this paper to our 25 ABI patients, for their pioneering spirit and persistence.

CI heute: Stand der Technologie

Kernelemente der heutigen CI-Technologie:

- Multi-Kanal-Systeme erreichen eine Spracherkennungsrate (gemäss Standardtests) von über 85 Prozent (ohne visuellen Kontakt). Hirnstamm-Implantate erreichen solche Werte noch nicht.
- CI funktionieren in der Regel bei erwachsenen Ertaubten (nach dem Spracherwerb) und bei taub Geborenen (möglichst frühe Implantation vorausgesetzt).
- Schäden am auditorischen Nerv treten offenbar kaum auf.
- Die CI-Technologie hat aber auch eine heftige ethische Debatte bezüglich einer möglichen Bedrohung der Kultur der Gehörlosen ausgelöst. Insbesondere CI bei Kindern sind Gegenstand der Debatte.

Warum es geklappt hat – das unterschätzte Gehirn

Mit dem erst wenige Jahre alten Konzept der „Plastizität des Gehirns“ steht nun auch ein Schema für die Erklärung des Funktionierens der CI und Hirnstamm-Implantate zur Verfügung. Dies wird auch dadurch gezeigt, dass der Gebrauch eines CI gelernt werden muss. In den Worten von William House:

At this time in the history of cochlear implants, I have become convinced that cochlear implants are 10% hardware and 90% software. By this I mean that the central nervous system has an amazing capacity to take whatever comes in over the VIIIth nerve and makes sense out of it. Some CNSs have more capacity to do this than others. This is the 90% software problem.

Hearing aid and implant research have shown us that reshaping of the external input can result in differences in patient performance. This is the 10% hardware problem.

Wie geht es weiter? Grenzen im Gehirn

Zwei Schlussfolgerungen:

- Das Beispiel des Hörens zeigt, dass die Perspektive der „exakten Information“ nicht wirklich eingenommen werden muss, um Technologie in neurale Systeme einzubauen. Innerhalb gewisser physiologischer Grenzen besteht ein Spielraum für die Erfassung metaphorischer Information für den Nutzer solcher Technologien.
- Damit ist aber nicht gesagt, dass das „trial and error“ der klinischen Praktiker bei der Substitution von Hirnteilen durch Technik beliebig weitergehen wird. Die Grenze dieser Vorgehensweise wird erreicht, wenn die Person nicht mehr in der Lage ist, metaphorische Information aus dem Input der technologischen Substitute zu generieren. Dann wird sich die Frage stellen, welcher Aspekt der exakten Information verstanden werden muss, um diese Grenze zu überwinden.

Dank an:

Albert Kern, INI

Stefan Launer, Phonak

Ruedi Stoop, INI