



## Der erweiterte Mensch? Schnittstellen zwischen Maschinen und Nervensystem

*Dr. Matthias Deliano, Leibniz Institut  
für Neurobiologie / AG Neuroprothetik,  
Universität Magdeburg*

Nanotechnologien zwischen Nutzen und Risiken für Umwelt und Gesundheit - Für einen verantwortlichen Umgang mit den neuen Nanotechnologien

## Cyborgs

"[a] cybernetic organism, a hybrid of machine and organism"

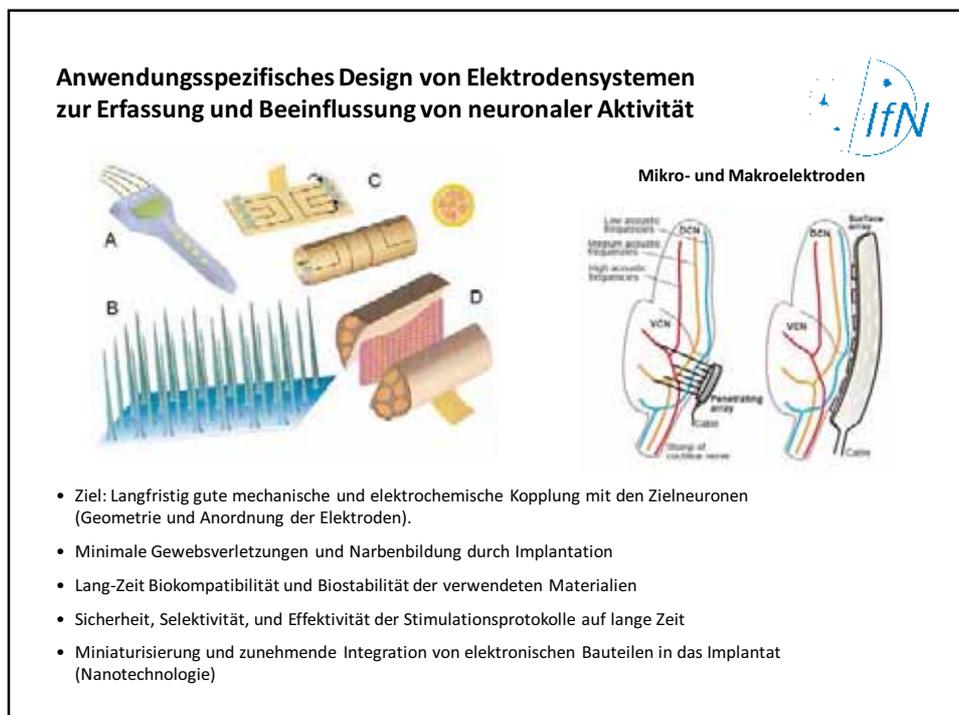
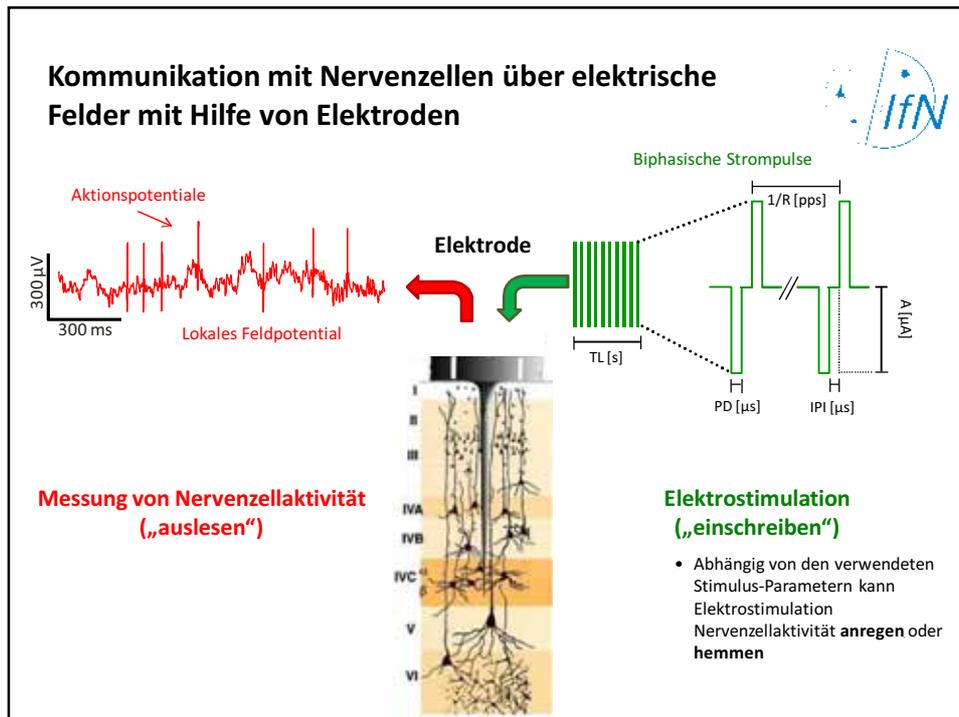


(Startrek: Lieutenant Commander Laforge)



(Startrek: Die Borg)

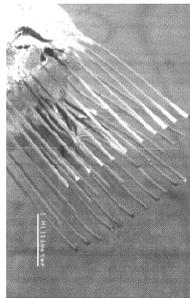




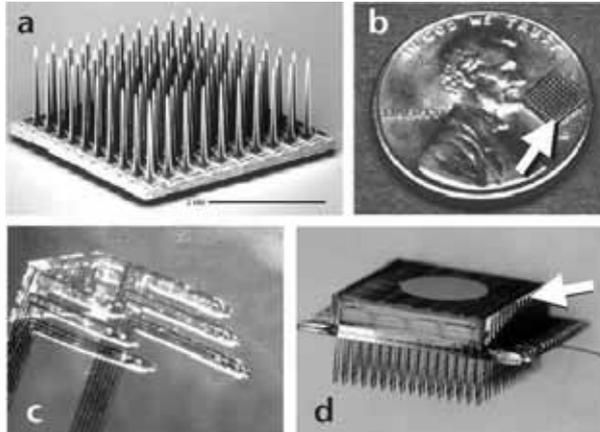
## Multiple Mikroelektrodensysteme



Mikrodrähte



Siliziumbasierte Systeme („Utah-Array“)



Elektroden auf  
Polymersubstrat

Dünnschicht „Michigan-Sonde“  
auf Siliziumsubstrat

Donoghue 2002

## Das Cochlea-Implantat: ein Beispiel für periphere „einschreibende“ Neuroprothesen

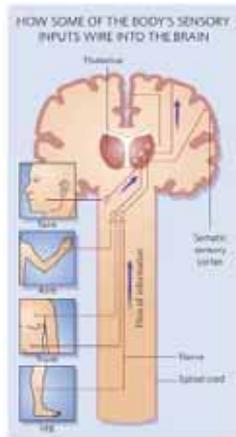


- Direkte elektrische Stimulation des Hörnervs unter Umgehung des Innenohrs (Cochlea, mit Haarsinneszellen zur Umwandlung von Schall in Nervensignale)
- Ermöglicht Gehörlosen bei Schädigung des Innenohrs wieder Umweltgeräusche wahrzunehmen und größtenteils auch wieder gesprochene Sprache zu verstehen.
- Bereits erfolgreich im klinischen Einsatz

### Simuliertes CI (Shannon 1995):

- Sprache (CI abnehmende Kanalzahl)
- Sprache (CI zunehmende Kanalzahl)
- Musik (CI)
- Musik (Original)

## Vorstoß ins Zentrum: von peripheren zu zentralen Neuroprothesen



©2005 Nature Publishing Group

### Was spricht für die Entwicklung zentraler Neuroprothesen?

- Anwendung auch bei geschädigten peripheren Nerven oder Schäden in den afferenten/efferenten Bahnen im Gehirn. Damit würden Gruppen von Patienten profitieren, denen mit peripheren Neuroprothesen nicht geholfen werden kann.
- Breite Funktionalität und damit breites Anwendungsspektrum
- Zentrale Hirnbereiche wie z.B. die Hirnrinde (Cortex) chirurgisch oft besser zugänglich als periphere Nerven
- Ausreichend Platz für Implantate
- Guter Schutz der Implantationsstelle durch den Schädel
- Langjährige klinische Erfahrung mit elektrischer Stimulation zentraler Hirnareale

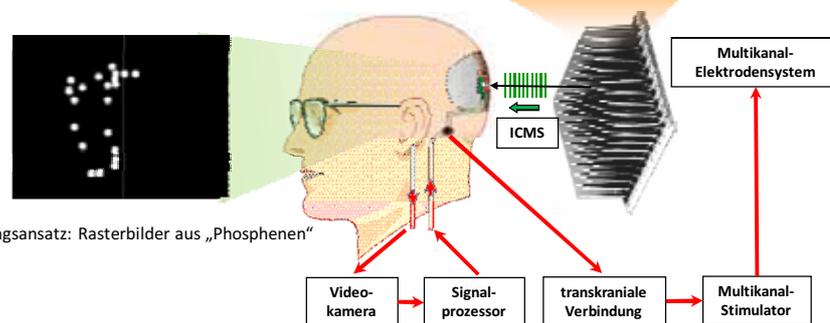
### Nachteile zentraler gegenüber peripherer Neuroprothesen

- Funktionelle Beziehung zwischen Neuroprothese und zentralem Hirngebiet oft komplexer und weniger verstanden
- Falls chirurgische Komplikationen oder Infektionen auftreten, hätte das schwerwiegendere Konsequenzen
- Mögliche Seiteneffekte durch unerwünschte Stimulation von benachbarten Teilen des Nervensystems
- Ethische Bedenken und negative gesellschaftliche Wahrnehmung

## Sensorische Cortexprothesen: ein Beispiel für zentrale „einschreibende“ Neuroprothesen (in Entwicklung)



- Konzept einer visuellen Cortexprothese: Räumlich geordnete und selektive **intracorticale Mikrostimulation (ICMS)** über ein Multikanal-Elektrodensystem

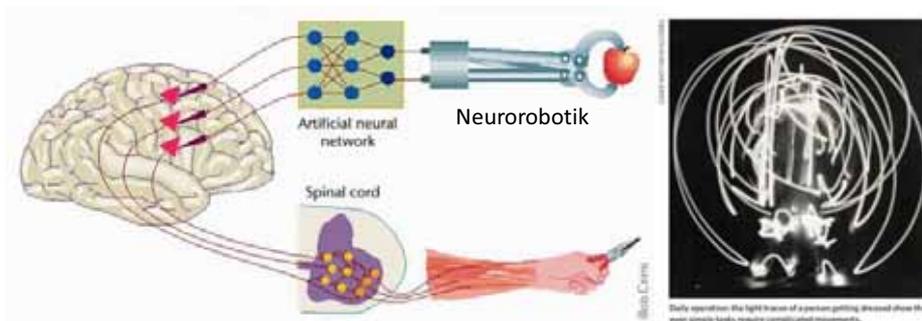


- Kodierungsansatz: Rasterbilder aus „Phosphenen“

- Nach langjährigen Versuchen am Menschen gilt dieser Kodierungsansatz jedoch als gescheitert, u. a. weil die Probanden die erzeugten Phosphengruppen nicht als sinnvolle Muster interpretieren konnten.

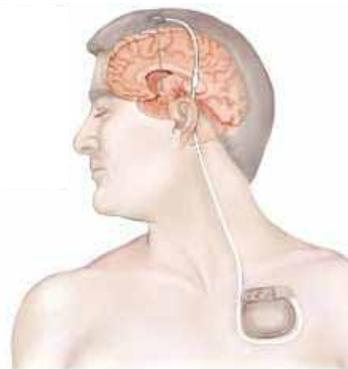
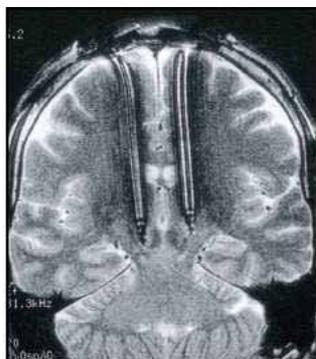
Brindley & Lewin (1968) *J. Physiol.* **196**: 479-493; Normann et al. (1999) *Vision Res.* **39**: 2577-87

## Motorische Cortexprothesen: zentrale „auslesende“ Neuroprothesen (in Entwicklung)



- Überbrückung von Rückenmarksverletzungen bei Querschnittslähmung: Vorgestellte Bewegung führt zu Hirnaktivitätsmustern die in reale Bewegung umgesetzt werden können (Steuerung eines Roboterarms oder des gelähmten Arm durch funktionelle Elektrostimulation).

## Hirnschrittmacher: „einschreibende“ zentrale Neuroprothesen zur Hemmung pathologischer Hirnaktivität (z.B. bei Morbus Parkinson)

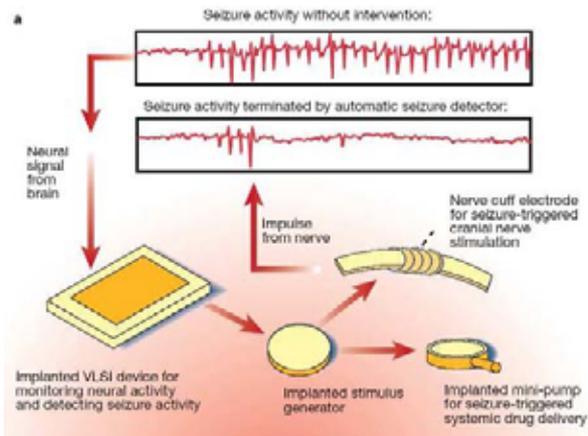


- Bereits erfolgreich im klinischen Einsatz



### Interaktive Hirnschrittmacher

- Erkennung (Vorhersage) und Hemmung epileptischer Anfälle durch Kombination einer „auslesende“ zentralen mit einer „einschreibenden“ peripheren oder zentralen Neuroprothese.

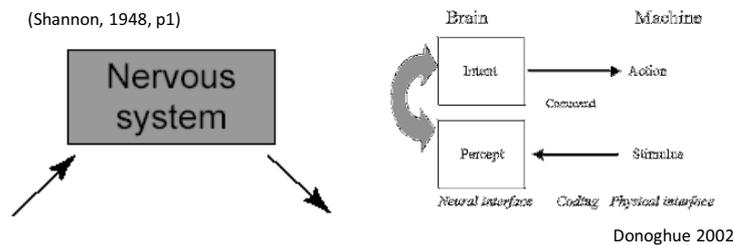


### Das Konzept vom Nervensystem als Sender und Empfänger



"The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point. Frequently the messages have meaning; that is they refer to or are correlated according to some system with certain physical or conceptual entities. These semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem"

(Shannon, 1948, p1)



Donoghue 2002

**Annahmen:**

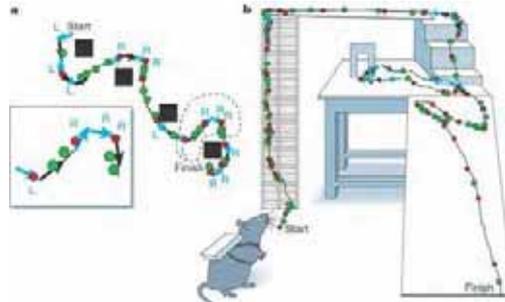
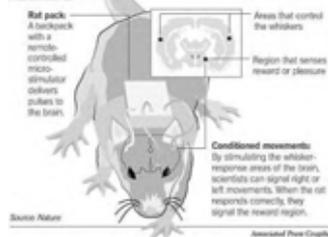
- gerichteter Informationsfluss zwischen Umwelt und Nervensystem (input -> output)
- Eindeutige Kodierung von Information aus der externen Umwelt im Nervensystem
- Unidirektionale Übertragung von externer Information an das Nervensystem („einschreibend“), oder vom Nervensystem („auslesend“) über die Neuroprothese möglich wenn Kodierung bekannt
- Externe Kontrolle und Steuerung der Zustände des Nervensystems durch eine Neuroprothese möglich

## „The remote controlled rat“ : Kontrolle und Steuerung von Wahrnehmen und Handeln über Schnittstellen zum Gehirn?



### Rat-ical innovation for remote rescue

Remote-controlled rats could be an important new aid for search and rescue teams.



- „einschreibende“ zentrale Neuroprothesen zur Kontrolle von Handlungen
- Beeinflussung limbischer Hirnstrukturen die an der Organisation affektiver Verhaltensaspekte mitwirken (z.B. Verhaltensappetenz und -bewertung)
- Erfordert aufwendiges Training und Lernen im Vorfeld

Talwar et al., Nature 2002

## Probleme eines reinen Kodierungsansatzes bei der Entwicklung zentraler sensorischer Neuroprothesen (z.B. sensorischer Cortexprothesen)

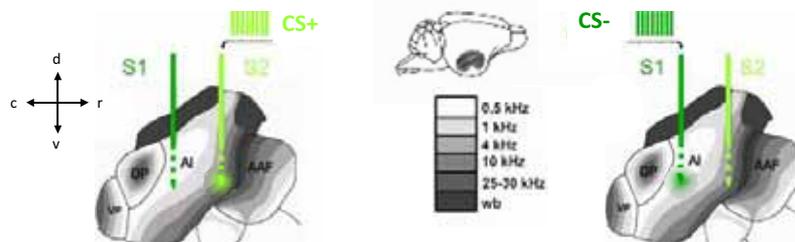
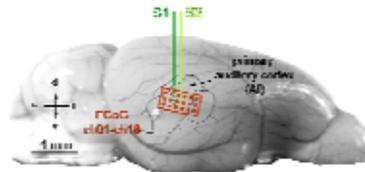


- Entscheidend für das Funktionieren einer sensorischen Neuroprothese ist die Erzeugung sinnvoll interpretierbarer Perzepte, die für Blinde oder Gehörlose in Alltagssituationen nutzbar sind.
- Reiner Kodierungsansatz bei zentralen „einschreibenden“ Neuroprothese (z.B. sensorischen Cortexprothesen) bisher gescheitert: keine Erzeugung strukturierter, reichhaltiger Wahrnehmung durch bloße Übermittlung kodierter externer Information
- Schwierigkeiten einer durch neuroprothetische Stimulation zentral „eingeschriebenen“ Information sinnvolle Bedeutung zu geben

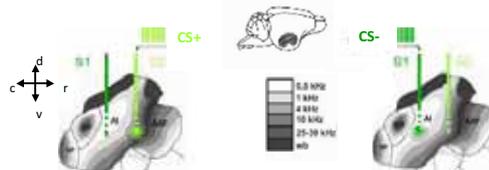
## Das Erlernen von Bedeutung neuroprothetischer Stimulation mit einer einfachen sensorischen Cortexprothese im Tiermodell



Mongolische Wüstenrennmaus  
(*Meriones unguiculatus*)



## Unterscheidung von Stimulationsorten im Hörcortex

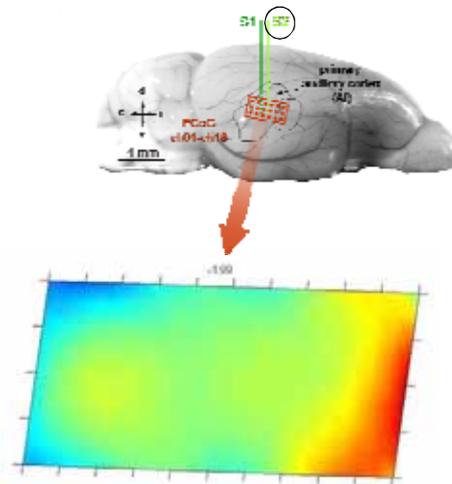


- Der „unphysiologischen“ Aktivierung des Cortex durch einfache neuroprothetische Stimulation kann zwar eine sinnvolle Bedeutung gegeben werden. Dies aber erfordert Lernen und damit verbundene plastische Veränderungen im Gehirn.
- Selbst Konditionierungslernen bei Tieren kann nicht völlig unter externe Kontrolle gebracht werden. Es ist von individuellen und subjektiven Zuständen des Tieres abhängig.

## Endogene Hirnaktivität und das Erlernen von Bedeutung neuroprothetischer Stimulation mit einer einfachen sensorischen Cortexprothese



Mongolische Wüstenrennmaus  
(*Meriones unguiculatus*)



## Endogene Hirnaktivität und das Erlernen von Bedeutung neuroprothetischer Stimulation



„Thus the effect of a stimulus might be likened to the additional ripples caused by tossing a stone into a wavy sea.“

(Arieli et al. 1996)

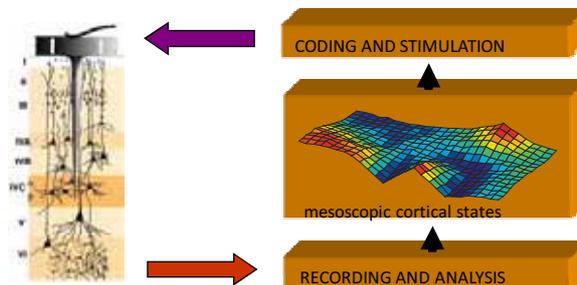


- Der Cortex ist kein passiver Informationsempfänger, sondern eine aktive Struktur mit ausgeprägter Eigendynamik. Die Hirnrinde bestimmt durch seine innere Dynamik wie eingespeiste Information verarbeitet (Zustandsabhängigkeit der Informationsverarbeitung)
- Aktivitätsmuster in der Hirnrinde spiegeln die subjektive Bedeutung wieder, die das Versuchstier der über die Neuroprothesen „eingespeisten“ Information durch Lernen zuweist
- Aufgrund der Zustandsabhängigkeit und lernabhängigen Plastizität des Gehirns existieren keine festen Kodierungs- und Kontrollschemen für das Gehirn

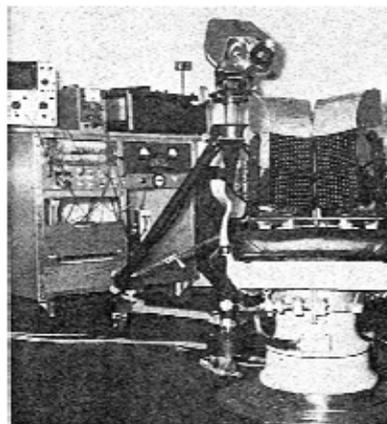
## Entwicklung eine interaktiven, bidirektionalen sensorischen Cortexprothese



- Der sensorische Cortex ist nicht nur Empfangsstation, sondern spielt eine wichtige Rolle beim Lernen und der Interpretation neuroprothetischer Stimulation
- Neuroprothetische Stimulation des Cortex interferiert mit dem Erlernen ihrer eigenen Interpretation
- Funktionieren einer sensorische Cortexprothese erfordert möglichst freie Entfaltung von Integrationsprozessen und lernabhängigen plastischen Veränderungen
- Entwicklung einer interaktiven sensorischen Cortexprothese, die mit einem aktiv/konstruktiv arbeitenden Kortex möglichst störungsfrei kommuniziert, und nicht einfach passiv Information in den Cortex „einschreibt“

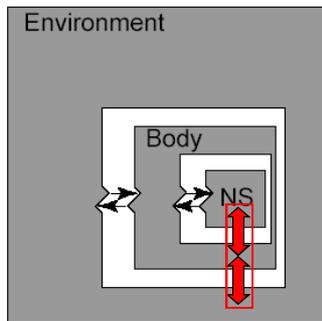


## Das Bach-y-Rita Experiment



(Bach-y-Rita et al., Nature, 1968)

### Das Konzept der verkörperten Kognition: Bedeutung entsteht aus der dynamischen Wechselwirkung zwischen Gehirn, Körper, Umwelt und Neuroprothese



(Chiel & Beer, TINS, 1997)

“Perception is situated and involves a dynamics, which “cuts across brain-body-environment divisions” (Thompson & Varela, 2001) rather than a brain-bound neural event!”

- Es gibt keine Vorzugsrichtung des Informationsflusses, keine festen Kodierungen und keine ausgewiesenen Informationskanäle (Informationsverarbeitung vom internen Zustand abhängig)
- Wahrnehmen und Handeln bedingen sich gegenseitig: was wir wahrnehmen hängt davon ab wie wir handeln und wie wir handeln bedingt was wir wahrnehmen
- Intentionalität und dynamischer Selbstbezug als Basis für die Entstehung von Bedeutung
- Wahrnehmen und Handeln unterliegen einer ständigen subjektiven Bewertung und einer daraus resultierenden Transformation durch Lernen
- **Neuroprothesen sind in diese Dynamik eingebettet, können diese nicht kontrollieren oder steuern, sondern müssen sie nutzen, um verlorene Funktionen erfolgreich zu ersetzen**

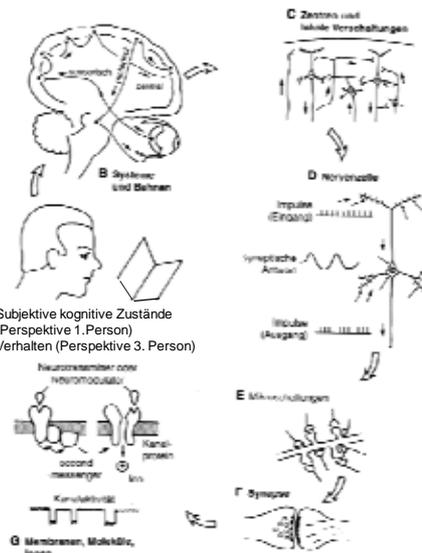
### Die Rolle des Gehirns beim Wahrnehmen und Handeln: ein Viel-Ebenen Problem



- Soziale Interaktion



- Subjektive kognitive Zustände (Perspektive 1. Person)
- Verhalten (Perspektive 3. Person)



## Eine sinnvolle Gestaltung von Schnittstellen zwischen Maschine und Nervensystem



- **Implantate** müssen auf lange Zeit **biokompatibel, biostabil** und mit **geringem Verletzungsrisiko** implantierbar sein
- **Stimulationsprotokolle** müssen auf lange Zeit **sicher, effektiv und selektiv** (ohne Nebeneffekte durch unerwünschte Stimulation benachbarter Regionen, insbesondere bei zentralen Neuroprothesen) sein
- Implantation muss weitgehend **reversibel** sein: Stilllegung und Explantation der Neuroprothese muss möglich sein, auch auf den alleinigen Wunsch des Trägers
- Das Schnittstellendesign muss auf einem **Verständnis der beeinflussten Wahrnehmungs- und Handlungsprozessen** beruhen und erfordert **Grundlagenforschung**
- Das Schnittstellendesign muss die **Eigendynamik und Selbstbezogenheit** des Gehirns berücksichtigen und die für die Integrationsprozesse sowie lernrelevanten Prozesse die der neuroprothetischen Stimulation eine sinnvolle Bedeutung geben **zur Entfaltung kommen lassen**
- **Kompensatorische oder degenerative plastische Veränderung** vor der Implantation durch die vorliegende Funktionsstörung müssen berücksichtigt werden (z.B. kreuzmodale Plastizität)
- Stimulation von Hirnarealen die die Verhaltensmöglichkeiten des Trägers einschränken, negative Gefühle auslösen (Angst, Aggression) und die Persönlichkeit stark verändern können, z.B. die **Manipulation limbischen Strukturen, nur unter grösster Vorsicht, wenn der therapeutische Nutzen klar die Risiken überwiegt.**

## Eine sinnvolle Gestaltung von Schnittstellen zwischen Maschine und Nervensystem



- Die Entwicklung von Neuroprothesen sollte nicht auf das Beheben von quantitative Defizite im Informationstransfer abzielen, sondern die **qualitativen Veränderungen von Wahrnehmung und Verhalten durch das Leben mit der Neuroprothese**, und letztendlich das subjektive Erleben des Prothesenträgers, in den Vordergrund stellen.
- Das **Lernen** im Umgang mit der Neuroprothese während der **Rehabilitation** sollte einen hohen Stellenwert einnehmen
- Für die Entwicklung einer sinnvollen neuroprothetischen Anwendung ist die **Kooperation mit den späteren Benutzern** daher von entscheidender Bedeutung
- Kostenaspekte: Zweiklassenmedizin
- Einsatz von Schnittstellen zwischen Maschine und Nervensystems außerhalb der Medizin: militärische Forschung, Unterhaltungselektronik

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



“The machine is not an it to be animated, worshipped, and dominated. The machine is us, our processes, an aspect of our embodiment.”

-Donna J. Haraway-

“Die Glorifizierung des Cyborgs als neues Lustweltreich des Menschen verkennt aber, welche Geduld, Compliance und sogar Schmerzbereitschaft schon heute der Einsatz technischer Mittel in Therapie und Rehabilitation erfordern ”

-Detlef Linke-

## Literatur I



- Arieli A., Sterkin A., Grinvald A., & Aertsen A. (1996) Dynamics of ongoing activity: explanation of the large variability in evoked cortical responses. *Science* 273: 1868-1871.
- Bach Y. Rita P., Collins C. C., Saunders F. A., White B., & Scadden L. (1969) Vision substitution by tactile image projection. *Nature* 221: 963-964.
- Bach Y. Rita P. (2004) Tactile sensory substitution studies. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1013: 83-91.
- Beer R. D. (2000) Dynamical approaches to cognitive science. *Trends Cogn. Sci.* 4: 91-99.
- Brindley G. S. & Lewin W. S. (1968) The sensations produced by electrical stimulation of the visual cortex. *J. Physiol.* 196: 479-493.
- Chapin J. K. & Moxon K. A. (2001) *Neural Prostheses for Restoration of Sensory and Motor Function*. CRC Press LLC.
- Chapin J. K. (2004) Using multi-neuron population recordings for neural prosthetics. *Nat. Neurosci.* 7: 452-455.
- Chiel H. J. & Beer R. D. (1997) The brain has a body: adaptive behavior emerges from interactions of nervous system, body and environment. *Trends Neurosci.* 20: 553-557.
- Clark A. (1999) An embodied cognitive science? *Trends Cogn. Sci.* 3: 345-351.
- Clynes M. E. & Kline N. S. (1960) Cyborgs and Space. *Astronautics* 26-27.
- Dobelle W. H., Stensaas S. S., Mladejovsky M. G., & Smith J. B. (1973) A prosthesis for the deaf based on cortical stimulation. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 82: 445-463.
- Dobelle W. H. (2000) Artificial vision for the blind by connecting a television camera to the visual cortex. *ASAIO J.* 46 (1): 3-9.
- Donoghue J. P. (2002) Connecting cortex to machines: recent advances in brain interfaces. *Nat. Neurosci.* 5 Suppl: 1085-1088.
- Fernandez E, Pelayo F, Romero S, Bongard M, Marin C, Alfaro A, Merabet L (2005). Development of a cortical visual neuroprosthesis for the blind: the relevance of neuroplasticity. *J Neural Eng.* 2005 Dec;2(4):R1-12.
- Förster O. (1929) Beiträge zur Pathophysiologie der Sehsphäre. *J. Psychol. Neurol.* 39: 463-485.
- Freeman W. J. (2000a) Mesoscopic neurodynamics: from neuron to brain. *J. Physiol. Paris* 94: 303-322.
- Freeman W. J. (2000c) Emotion is Essential to All Intentional Behaviors. In: *Emotion, Development, and Self-Organization: Dynamic Systems Approaches to Emotional Development* (eds. Lewis M. D. and Granic I.) pp. 209-235. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Fritsch G. & Hitzig E. (1870) Über die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns. *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medizin* 300-332.
- Graziano M. S., Taylor C. S., & Moore T. (2002) Complex movements evoked by microstimulation of precentral cortex. *Neuron* 34: 841-851.
- Haraway D. F. (1991) *Simians, Cyborgs and Women*. Routledge, New York.
- Heiduschka P. & Thanos S. (1998) Implantable bioelectric interfaces for lost nerve functions. *Prog. Neurobiol.* 55: 433-461.
- Kennedy P. R. & Bakay R. A. (1998) Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection. *Neuroreport* 9: 1707-1711.
- Le Van Quyen M., Martinerie J., Navarro V., Boon P., D'Have M., Adam C., Renault B., Varela F., & Baulac M. (2001) Anticipation of epileptic seizures from standard EEG recordings. *Lancet* 357: 183-188.

## Literatur II



- Lehnertz K., Andrzejak R. G., Arnhold J., Kreuz T., Mormann F., Rieke C., Widman A. G., & Elger C. E. (2001) Nonlinear EEG analysis in epilepsy: its possible use for interictal focus localization, seizure anticipation, and prevention. *J. Clin. Neurophysiol.* 18: 209-222.
- Lenarz M., Matthies C., Lesinski-Schiedat A., Frohne C., Rost U., Ilg A., Battmer R. D., Samii M., & Lenarz T. (2002) Auditory brainstem implant part II: subjective assessment of functional outcome. *Otol. Neurotol.* 23: 694-697.
- Lenarz T., Moshrefi M., Matthies C., Frohne C., Lesinski-Schiedat A., Ilg A., Rost U., Battmer R. D., & Samii M. (2001) Auditory brainstem implant: part I. Auditory performance and its evolution over time. *Otol. Neurotol.* 22: 823-833.
- Lenay C., Gapenne O., Hanneon S., Marque C., & Genouëlle C. (2003) Sensory substitution: limits and perspectives. <http://www.utc.fr/gsp/publi/Lenay03Sensory%20substitution.pdf>
- LeRoy C. (1755) Où l'on rend compte de quelques tentatives que l'on a faites pour guérir plusieurs maladies par l'électricité. *Hist. Acad. Roy. Sciences (Paris) M'emoires Math. Phys.* 87-95.
- Libet B. (1982) Brain stimulation in the study of neuronal functions for conscious sensory experiences. *Hum. Neurobiol.* 1: 235-242.
- Löwenstein K. & Borchardt M. (1918) Symptomatologie und elektrische Reizung bei einer Schußverletzung des Hinterhauptlappens. *Dtsch.Z.Nervenheilkd.* 58: 264-292.
- McIntyre C. C., Savasta M., Walter B. L., & Vitek J. L. (2004b) How does deep brain stimulation work? Present understanding and future questions. *J. Clin. Neurophysiol.* 21: 40-50.
- Merleau-Ponty M. (1962) Phenomenology of Perception. Humanities Press, New York.
- Nicolelis M. A. (2003) Brain-machine interfaces to restore motor function and probe neural circuits. *Nat. Rev. Neurosci.* 4: 417-422.**
- Normann R. A., Maynard E. M., Rousche P. J., & Warren D. J. (1999) A neural interface for a cortical vision prosthesis. *Vision Res.* 39: 2577-2587.**
- Nunez R. & Freeman W. J. (2000) Reclaiming Cognition: The Primacy of Action, Intention and Emotion. Imprint Academic, Thorverton, UK.**
- O'Regan J. K. & Noë A. (2001) A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behav. Brain Sci.* 24: 939-973.**
- Ohl F. W., Scheich H., & Freeman W. J. (2001) Change in pattern of ongoing cortical activity with auditory category learning. *Nature* 412: 733-736.
- Ohl F. W., Deliano M., Scheich H., & Freeman W. J. (2003a) Early and late patterns of stimulus-related activity in auditory cortex of trained animals. *Biol. Cybern.* 88: 374-379.
- Ohl F. W., Deliano M., Scheich H., & Freeman W. J. (2003b) Analysis of evoked and emergent patterns of stimulus-related auditory cortical activity. *Rev. Neurosci.* 14: 35-42.
- Ohl FW, Scheich H (2006) Neuroprothetik. *Hitech im Gehirn. Gehirn und Geist* 10(64-67).**
- Oster G. (1970) Phosphenes. *Sci. Am.* 222: 82-87.
- Penfield W. & Rasmussen T. (1950) The Cerebral Cortex in Man. Macmillan, New York.
- Penfield W. & Perot P. (1963) The Brain's record of auditory and visual experience. A final summary and discussion. *Brain* 86: 595-696.
- Peterson D. A. (2004) Stem cell therapy for neurological disease and injury. *Panminerva Med.* 46: 75-80.

## Literatur III



- Picard-Riera N., Nait-Oumesmar B., & Baron-Van Evercooren A. (2004) Endogenous adult neural stem cells: limits and potential to repair the injured central nervous system. *J. Neurosci. Res.* 76: 223-231.
- Port R. F. & van Gelder T. (1995) Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition. Bradford Books, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Prochazka A., Mushahwar V. K., & McCreery D. B. (2001) Neural prostheses. *J. Physiol.* 533: 99-109.
- Rubinstein J. T. & Miller C. A. (1999) How do cochlear prostheses work? *Curr. Opin. Neurobiol.* 9: 399-404.
- Scheich H. & Breindl A. (2002) An animal model of auditory cortex prostheses. *Audiol. Neurootol.* 7: 191-194.**
- Schmidt E. M., Bak M. J., Hambrecht F. T., Kufta C. V., O'Rourke D. K., & Vallabhanath P. (1996) Feasibility of a visual prosthesis for the blind based on intracortical microstimulation of the visual cortex. *Brain* 119 (Pt 2): 507-522.
- Schwartz A. B. (2004) Cortical neural prosthetics. *Annu. Rev. Neurosci.* 27: 487-507.**
- Science. 2002 Feb 8;295(5557)**
- Shannon C. E. (1948) A mathematical theory of communication. Bell Telephone System Tech. Publ. Monograph B-1598, 1-80.
- Szarowski D. H., Andersen M. D., Retterer S., Spence A. J., Isaacson M., Craighead H. G., Turner J. N., & Shain W. (2003) Brain responses to micro-machined silicon devices. *Brain Res.* 983: 23-35.
- Talwar S. K., Xu S., Hawley E. S., Weiss S. A., Moxon K. A., & Chapin J. K. (2002) Rat navigation guided by remote control. *Nature* 417: 37-38.**
- Tass P. A., Klosterkötter J., Schneider F., Lenarz T., Koulousakis A., & Sturm V. (2003a) Obsessive-compulsive disorder: development of demand-controlled deep brain stimulation with methods from stochastic phase resetting. *Neuropsychopharmacology* 28 Suppl. 1: S27-S34.
- Tehovnik E. J. (1996) Electrical stimulation of neural tissue to evoke behavioral responses. *J. Neurosci. Methods* 65: 1-17.
- Thompson E. & Varela F. J. (2001) Radical embodiment: neural dynamics and consciousness. *Trends Cogn. Sci.* 5: 418-425.
- Troyk P., Bak M., Berg J., Bradley D., Cogan S., Erickson R., Kufta C., McCreery D., Schmidt E., & Towle V. (2003) A model for intracortical visual prosthesis research. *Artif. Organs* 27: 1005-1015.
- Uhlig C. E., Taneri S., Benner F. P., & Gerding H. (2001) Electrical stimulation of the visual system. From empirical approach to visual. *Ophthalmologie* 98: 1089-1096.
- Varela F. J., Thompson E. T., & Rosch E. (1992) The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.**
- Varela F. J. & Shear J. (1999) The View from Within: First-person Approaches to the Study of Consciousness. Imprint Academic, Thorverton, UK.
- Volkmann J. (2004) Deep brain stimulation for the treatment of Parkinson's disease. *J. Clin. Neurophysiol.* 21: 6-17.
- Wessberg J., Stambaugh C. R., Kralik J. D., Beck P. D., Laubach M., Chapin J. K., Kim J., Biggs S. J., Srinivasan M. A., & Nicolelis M. A. (2000) Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. *Nature* 408: 361-365.
- Wilson B. S., Lawson D. T., Muller J. M., Tyler R. S., & Kiefer J. (2003) Cochlear implants: some likely next steps. *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 5: 207-249.

**The BioFuture research group**  
**"A neuroprosthesis for the auditory cortex"**

