

Werden wir ewig leben?
Gespräche über die Zukunft
von Mensch und Technologie.

Tobias Hülswitt
Roman Brinzanik

edition unseld
SV

»Wenn beide versuchen, sich anzupassen« – Von Mensch-Maschine-Schnittstellen, Cyborgs und dem Nachbau des Gehirns

Im Gespräch mit dem Hirnforscher Ad Aertsen
(Freiburg, 19. August 2009)

Computational Neuroscience

Tobias Hülswitt: Was fasziniert Sie an dem Feld, in dem Sie arbeiten, persönlich am meisten?

Ad Aertsen: Das Gehirn ist das komplexeste Organ, das es überhaupt gibt. Und das möchte ich verstehen. Wie kann es sein, dass sich so etwas entwickelt hat? Und insbesondere: Wie funktioniert es? Wäre ich in der Lage, es mit unseren minimalistischen Ansätzen nachzubauen? Das ist sozusagen die letzte große Entdeckungsreise, die wir als Menschen noch machen können. Ich denke zwar nicht, dass es in meiner Zeit dazu kommen wird, dass wir es komplett begreifen können, aber ich würde gerne sehen, wie weit wir es voranbringen.

Hülswitt: Aber es heißt ja, die Entwicklung der Technologie, die man vermutlich dafür braucht, also die der Computertechnologie, verlaufe exponentiell. Vielleicht erleben Sie es doch noch?

Tatsächlich sieht man die Technik heute nicht als das große Hindernis an. Wir können schon jetzt Netzwerke von mehreren 100 000 Nervenzellen simulieren. In einem Kubikmillimeter Gehirn befinden sich etwa 100 000. Das können wir jetzt fast in Echtzeit machen. Eine Maus hat insgesamt gar nicht mal so viel mehr Nervenzellen, vielleicht zehnmal, hundertmal mehr, das heißt, wir sind fast dran. Die Grenze, an die wir jetzt allerdings stoßen, ist eine ganz andere: Wir verstehen zu wenig. Das heißt,

um die Simulation wirklich so hinzubekommen, dass man mit Recht behaupten könnte, das ist eine Maus, dafür gibt es zu viele Unbekannte, was die Anatomie, die Physiologie angeht. Da ist unser Wissen in all den Jahren viel zu wenig vorangekommen.

Hülswitt: Das Wissen über die Interaktion der Zellen?

Genau. Was für Verbindungen werden hergestellt, sind sie eher spezifisch oder zufällig? Wie entwickelt sich das? Wie ist Lernen implementiert in so einer Maschine? Wir verstehen noch zu wenig davon, um es gut nachbauen zu können.

Roman Brinzanik: Sie sind Physiker und waren wissenschaftlicher Mitarbeiter des Kybernetikers Valentino Braitenberg. Was hat Kybernetik mit Hirnforschung zu tun?

Kybernetik ist ein Terminus, der auf den Mathematiker Norbert Wiener zurückgeht, der sehr stark beigetragen hat zur Entwicklung der Systemtheorie. Da ging es zunächst um technische Probleme. Wie kann ich Maschinen bauen, denen man ein Ziel vorgibt und die dann sozusagen mehr oder weniger autonom dorthin kommen? Aber dann kam die Idee auf, dass man biologische Organismen, Tiere, Menschen, auf die gleiche Art und Weise als Systeme betrachten könnte, die letztlich so etwas wie autonome Thermostate sind, die sich selbst regulieren. Und Braitenberg hat ein Buch verfasst mit dem Titel *Vehikel*, der Untertitel der englischen Ausgabe, *Vehicles*, lautet: *Experiments in Synthetic Psychology*. In dem Buch beschreibt er, was man im Gehirn an Zellen und Drähten alles vorfindet und was das leistet. Dann fragt er: Was kann ich nachbauen? Und als Nächstes: Wenn man einmal bewusst vergisst, was man als Techniker eingebaut hat, und nun als Beobachter von außen betrachtet, was dieses System alles kann, was wird man dann in das System hineininterpretieren? Und das ist Synthetische Psychologie. In jedem Kapitel fügt er dem System neue Elemente hinzu, zum Beispiel Speicher, und sieht dann

von außen, dass das Ding auf einmal mehr kann als zuvor. Und so kommt dann der Psychologe aufgrund seiner Verhaltensversuche dazu, dieser Maschine immer mehr Intelligenz anzudichten, bis er letztlich sagen muss, sie verfüge über freien Willen. Aber andererseits weiß er, diese »höheren« Sachen wie der freie Wille sind nie eingebaut worden, die Maschine ist nur immer komplexer geworden. Und von außen gesehen leistet sie dann Dinge, aufgrund deren man sagen muss, ja, jetzt ist sie wirklich intelligent. Braitenbergs Büchlein illustriert auf wunderschöne Weise, was eine auf Konzepte hin orientierte Hirntheorie leisten sollte: komplexes Verhalten »entzaubern« und auf minimale Erklärungsprinzipien zurückführen – alles weitere ist Barock.

Brinzanik: Der Computational Neuroscientist Henry Markram vom Blue Brain Project in Lausanne schreibt 2006 in der Fachzeitschrift *Nature Reviews Neuroscience*: »Alan Turings Ziel war es, das Gehirn nachzubauen, und er erfand den Computer. Aber womöglich stellte uns Turing damit das Mittel zur Verfügung, mit dem sich das Gehirn nachbauen lässt.« Ist das eine gute Beschreibung Ihres Forschungsgebietes?

Der Begriff »Computational Neuroscience« enthält zwei Definitionen in einem. Die eine: Wir möchten verstehen, welche Rechenoperationen im Gehirn ablaufen. Wie funktioniert das Gehirn im Sinne von Informationsweiterleitung, von Informationsverarbeitung? Wie wird die Information, die über die Sensoren, über die Augen, die Ohren und so weiter, reingeht, intern verarbeitet, wie wird das konfrontiert mit Plänen, die diese Maschine entwickelt, und wie führt das dann letztlich zu vernünftigem Verhalten? Die andere Definition ist: Wir setzen Computer ein, um das Gehirn nachzubauen, aber auch um die Messdaten, die in immer größeren Fluten auf uns zukommen, in endlicher Zeit zu analysieren. Computational Neuroscience bedeutet nicht, dass

man den Computer als Gehirn betrachtet, denn er ist eigentlich eine schlechte Metapher für das Gehirn. Wenn man sich anschaut, wie die momentanen Computer aufgebaut sind, dann sind sie meilenweit entfernt von den Prinzipien des Gehirns.

Brinzanik: Wo liegen die größten Unterschiede?

Wie ich schon sagte, in einem Kubikmillimeter Gehirn gibt es etwa 100 000 Zellen, und diese Zellen haben Drähte. Es gibt zwei Sorten von Drähten. Die einen heißen Dendriten, das sind die Drähte, die die Informationen zu den Zellen hinführen, und es gibt die Axone, die Drähte, die wieder von der Zelle wegführen und Informationen an andere Zellen weiterleiten. Und wo zwei solcher Drähte sich treffen, entsteht ein Kontaktpunkt, den man Synapse nennt, und an dieser Lötstelle, könnte man sagen, wird Information von der einen Zelle an die andere übergeben. Es gibt nun in diesem Kubikmillimeter Gehirn neben den 100 000 Zellen 400 Meter Dendriten, 4 Kilometer Axone und 10 000 Synapsen pro Zelle! Das heißt, jede Nervenzelle in der Maus erhält Eingänge von 10 000 Zellen und gibt selbst Informationen an 10 000, nicht unbedingt dieselben. Bei uns Menschen sind es gewöhnlich etwa 20 000 Verbindungen pro Zelle. Dies sind alles Zahlen, die wir dem vorhin genannten Neuroanatomen und Kybernetiker Valentino Braitenberg und seiner Kollegin Almut Schütz verdanken. Wenn man nun eine ähnliche Anatomie von Computern betreiben würde, käme man auf Verbindungszahlen zwischen einer und fünf pro Elementarkomponente, also pro »künstlicher Zelle«. So kann man sehen, wie groß der Unterschied zwischen Computern und dem Gehirn ist. Auch die Topologie des neuronalen Netzwerkes, also die Art der Verdrahtung, ist im Hirn völlig anders als im Computer. Ich kann im Gehirn in etwa drei bis vier Schritten von jeder Zelle zu jeder beliebigen anderen Zelle kommen – das ist ein sogenanntes »Klei-

ne-Welt-Netzwerk«. Dies wird ermöglicht durch *hubs*, Drehkreuze, wie bei Fluglinien. Die KLM hat sehr dichte Vernetzungen in Amsterdam, die Lufthansa in Frankfurt, und es gibt direkte und indirekte Verbindungen. Und das, was möglich ist in einem Netz, wird sehr stark von seiner Topologie bestimmt. Es ist also sehr wichtig zu wissen, was uns die Anatomie über das Gehirn sagt. Wie sind die einen Hirnteile aufgebaut im Vergleich zu anderen? Oftmals ist die Art der Verdrahtung anders, und das muss etwas bedeuten für die Funktion, die darin untergebracht ist.

Brinzanik: Um eine Computersimulation des Gehirns durchzuführen, braucht man mathematische Modelle der physikalisch-chemischen Vorgänge. Und dazu muss man vereinfachen, denn selbst mit den besten Computern der Welt kann man derzeit noch nicht einmal die Faltung eines einzelnen Proteins auf der atomaren Ebene berechnen, geschweige denn die gesamten Vorgänge in auch nur einer einzigen Zelle.

Stimmt, und da gibt es tatsächlich Unterschiede in den strategischen Ansätzen. Markram zum Beispiel, den Sie vorhin erwähnten, würde gerne ein sogenanntes Replika-Modell bauen, also die Zelle und alle ihre Verbindungen so detailliert wie nur möglich nachbauen, um dann letztlich eine Kolumne aus dem Cortex nachbauen zu können. Unser Ansatz ist sehr viel vereinfachender. Jede einzelne Zelle mit ihren Verbindungen wird auf zwei bis vier mathematische Gleichungen reduziert. Das heißt, wenn ich ein Netzwerk aus 100 000 Neuronen baue, dann muss ich hunderttausend mal zwei, drei oder vier solcher Gleichungen auf dem Computer implementieren, und die werden dann durchgerechnet. Und die Frage ist immer, welche Vereinfachungen lasse ich noch zu und welche lasse ich nicht mehr zu? Unser Ansatz ist: So einfach wie möglich, so komplex wie nötig – anstatt umgekehrt. Wenn ich dann eine zusätzliche Komplexität brauche,

baue ich sie später ein, denn wenn ich zu komplex anfangen, weiß ich später nicht, was ich wirklich benötige und was nicht. Das heißt, unser Ansatz ist, weil wir aus der Physik kommen, minimalistischer als der von manch anderen.

Brinzanik: Was ist denn das Fernziel der Computational Neuroscience?

Es gibt mehrere Ziele, die parallel angestrebt werden. Das Endziel ist noch ganz weit weg, aber in Japan wird schon in diese Richtung gedacht, nämlich einfach das ganze Gehirn nachzubauen. Ob das dann eine Software- oder eine Hardware-Realisation ist, zum Beispiel durch Nanotechnologie, das ist letztlich egal. Es geht um die Prinzipien, die man einbaut. Dabei möchte man zum Beispiel herausfinden, ob man einen nachgebauten Kubikmillimeter Gehirn als künstliche Physiologie nutzen kann. Kann man da eine Elektrode hineinstecken, und könnte uns das helfen zu verstehen, was passiert, wenn ich eine echte Elektrode in ein echtes Gehirn einführe? Da sind wir, denke ich, schon weitergekommen. Eine andere Frage, die uns beschäftigt, ist: Wie lernt das Gehirn? Auf der Ebene einzelner Synapsen ist das sehr gut verstanden. Die Funktion einer Synapse ist es, das Signal, das da über das Axon zugeführt wird, an das nachgeschaltete Neuron weiterzugeben. Wenn man sagt, eine Synapse ist plastisch, dann heißt das, dass eine Synapse, die häufiger erfolgreich benutzt wurde bei der Weiterleitung von Information, stärker wird, so dass die Weiterleitung beim nächsten Mal noch besser funktioniert. Und es gibt andere Synapsen, die weniger erfolgreich benutzt wurden und schwächer werden. Beides ändert dann die Verdrahtung. Aber nun geht man einen Schritt weiter und schaut sich das ganze neuronale Netzwerk an, wo jede Zelle 10 000 solcher Synapsen hat. Wenn die Synapsen diese Art von Plastizität besitzen, wie lernt dann das Netz? Nicht die einzelne Zelle, son-

dern das gesamte Netz. Das müssen wir wissen, um zu verstehen, wie das Gehirn schlauer wird und wie es funktioniert, dass man durch die Veränderung Abertausender Synapsen sehen lernt oder durch Üben eine Bewegung besser ausführt und ich nachher Fahrrad fahren kann, was ich vorher nicht konnte.

Intelligenz und ewiges Leben im Silizium

Brinzanik: Angenommen, man hätte eines Tages komplette physikalische Modelle der Vorgänge im Gehirn bis runter zur Ebene der Elementarteilchen und die Nanotechnologie würde uns hochparallele, atomare Supercomputer mit ausreichender Rechenleistung zur Verfügung stellen, um das menschliche Gehirn in all diesen Details zu simulieren: Was würde man dann über die menschliche Intelligenz lernen?

Man würde garantiert viele interessante Sachen entdecken, aber ich befürchte, am Ende hätte man das Problem nur verdoppelt: Man hätte das biologische Gehirn immer noch nicht verstanden, und müsste nun auch noch das nachgebaute verstehen. Deswegen ist für mich Hirntheorie etwas anderes als nur das Organ in allen Einzelheiten nachzubauen. Wirkliches Verstehen hieße, dass man eine Theorie entwickelt und dann das nachbaut, was man in dieser Theorie als notwendige Prinzipien erkannt und worauf man das Ganze reduziert hat. Und wenn sich das Gebaute so benimmt wie der Gegenstand der Untersuchung, dann hat man ihn tatsächlich verstanden. Wenn es dies nicht tut, hat man wohl die falsche Theorie. Außerdem müssen wir, wenn wir das Gehirn verstehen wollen, tatsächlich auch verstehen, wie Verhalten zustande kommt, also der Versuch, mit der Außenwelt in Verbindung zu treten, denn das ist nun mal eine der Funktionen des

Gehirns. Das Gehirn ist nicht dazu da, um in sich selbst hinein zu blicken und da eine Welt zu entwerfen, die mit der echten Welt nichts zu tun hat. Sondern das Gehirn ist essenziell dazu da, dass wir auf sinnvolle Art und Weise mit der Welt um uns herum in Interaktion treten können.

Brinzanik: Wird es Ihrer Meinung nach eines Tages möglich sein, menschliche Intelligenz und Bewusstsein nachzubauen?

Da ich selbst solche Ziele nicht habe und eher pragmatisch und von unten aufbauend denke, wüsste ich jetzt nicht, ob ich das für realistisch halte oder nicht. Die Frage ist auch: Was meint man? Bewusstsein, freier Wille – ich weiß nicht einmal, wie sich das in wissenschaftliche Termini übersetzen ließe. Was meint man eigentlich mit Intelligenz, oder anders gesagt, wann würde man nun wirklich sagen, dass eine intelligente Leistung vorliegt? Oder erfüllt die Maschine, die man gerade betrachtet, einfach nur ihre Funktion? Wenn man die Spezifikation nicht kennt, und man kuckt es sich von außen an, dann sieht das ganz intelligent aus. Aber wenn man weiß, wie die Maschine gebaut wurde, dann löst sich die Frage irgendwie auf.

Brinzanik: Der Neurowissenschaftler David Eagleman spekuliert 2009 in einem Beitrag für die Internetzeitschrift *Edge*, dass man eines Tages in der Lage sein wird, eine perfekte digitale Kopie eines menschlichen Gehirns anzufertigen und dass man dann das Bewusstsein auf einen Computer hochladen könne, wo es dann quasi unsterblich wird. Was halten Sie von dieser extremen Zukunftsvision, und welche Probleme müsste man gelöst haben, damit das überhaupt möglich wäre?

Ich denke, die wichtigsten Probleme sind konzeptioneller Art. Abgesehen von der ganzen Anatomie und Physiologie, die man erst einmal erfassen und dann genügend reduzieren können müsste, um sie nachzubauen, wird sich, wie gesagt, die Frage als sehr

wichtig herausstellen, wie man Lernen beschreiben kann. Also wie ein Netzwerk schlauer wird durch Erfahrung. Ich sehe noch nicht, dass wir dazu in der Lage sind. Was auch sehr wichtig sein wird, ist, dass man erfassen können müsste, wie Hirnzustände definiert sind. Also was ist zum Beispiel das neuronale Korrelat von »auf der Suche sein«, »motiviert sein«, »etwas wissen wollen«? Wie ist das intern repräsentiert? Oder noch eine Stufe weiter: Was passiert, wenn ich mit anderen Leuten in Verbindung trete, mit denen diskutiere oder womöglich tanze, was spielt sich dann in meinem und in deren Gehirn ab? Also, wie sind Kommunikation, Sprache, gemeinsames Handeln im Gehirn realisiert? Solche Sachen. Das müsste alles verstanden sein, bevor man so hehre Ziele wie das Bewusstsein in Angriff nehmen kann. Und ich sehe nicht, dass wir in absehbarer Zeit so weit sein werden.

Brinzanik: Setzt eine solche Vision nicht auch erkenntnistheoretisch voraus, dass ein Computermodell, das immer eine mathematische Abstraktion ist, überhaupt exakt die gleichen Eigenschaften haben kann wie ein reales Gehirn?

Hülswitt: Und wir haben hier ja auch ein logisches Problem. Wenn ich mein Bewusstsein auf die Festplatte übertrage, dann habe ich nur eine Kopie erstellt, aber mein Bewusstsein ist immer noch hier, bei mir. Die Kopie lebt vielleicht ewig in dieser Hardware, aber nicht ich.

Ja, und deswegen ist die Interaktion wichtig. Wenn man mit dem nicht in Interaktion treten kann, dann lässt sich zwar sagen, da ist etwas drin, aber wenn man nichts von ihm mitkriegt, weil sich dieses Etwas nicht mitteilen kann, dann hätte es genauso gut auch nicht da sein können. Aber ich glaube, das alles ist kein akutes Problem.

Brinzanik: Emergiert die menschliche Intelligenz durch Selbstorganisation aus der Biochemie im Gehirn?

Also, die wird sicher nicht auf dieser Ebene allein emergieren. Über und unter der Ebene der einzelnen Zellen gibt es ja weitere Ebenen. Es gibt die Ebene der Populationsaktivität, darüber wäre dann die Ebene der EEG-Aktivität, die ich dann großflächig abgreifen kann. Darunter gibt es Aktivität auf der Ebene der Proteine. Unter dieser wiederum Aktivität auf der Ebene der Moleküle und Atome. Und das Verständnis der Intelligenz wird sich nicht auf einer einzelnen dieser Ebenen finden lassen, sondern es wird letztendlich darum gehen, dass man Brücken schlagen kann von der einen Ebene zur nächsten. Und deswegen ist eine Aussage wie »Irgendwann werden wir das ganze Gehirn auf der biochemischen Ebene verstehen« nicht haltbar. Und die Tatsache, dass irgendetwas sich selbst organisiert, mag ja wahr sein, genauso wie ich sagen kann, dass sich der Verkehr in Beijing selbst organisiert, aber das heißt noch nicht, dass ich verstanden habe, wie er das macht.

Hülswitt: Könnte man das intelligent nennen, wenn der Verkehr sich selbst organisiert?

Ja, ich denke schon. Es hängt eben davon ab, wie man Intelligenz definiert. Wenn das, was da abläuft, auf eine vernünftige Art und Weise dazu führt, dass alle, die morgens irgendwo losfahren, da ankommen, wo sie hinwollen, dann ist das für das Gesamtsystem als solches schon eine intelligente Leistung – ich habe kein Problem damit, das so zu bezeichnen.

Hülswitt: Und wo ist die verortet, diese Intelligenz?

Überall. Die ist überall. Die ist dann in sich. Genauso wie bei uns im Kopf. Da sind all diese Zellen und Verbindungen und Aktivitäten, und etwas anderes gibt es nicht. Wenn wir annehmen, dass da mehr als diese Verbindungen und Aktivitäten ist, landen wir bei dieser alten Kino-Metapher, dass im Gehirn jemand sitzt und sich einen Film ankuckt, der sich auf der Leinwand abspielt. Da

frage ich immer: Ja und wer ist das? Es ist niemand da. Keiner daheim. Das ist genauso, als ob bei einer Präsidentenstichwahl ein Kandidat eine Stimme mehr bekommt als der andere. Dann kann man auch nicht fragen: Wer hat jetzt entschieden? Wer war dieser eine?

Hülswitt: Das klingt ja, als sei Intelligenz etwas Ätherisches, das sich Träger sucht.

Nein, Intelligenz ist ein Label, das man gewählt hat, das man einer Maschine oder wem auch immer zuordnet, weil sie eine bestimmte Leistung erfüllt. Und wenn wir das dann Intelligenz nennen, dann hat diese Maschine damit dieses Zertifikat erworben. So etwas wie »Qualitätswein« oder »Appellation d'origine contrôlée«. Mehr ist es nicht. Es ist für mich eigentlich ein semantisches Problem.

Gehirn-Maschine-Schnittstellen

Hülswitt: Wird Ihre Arbeit irgendwie zu einem verlangsamten Altern oder einer radikalen Lebensverlängerung beitragen?

Sie könnte vor allem zu einer Verbesserung der Lebensqualität von Patienten mit bestimmten Krankheiten beitragen, zum Beispiel Patienten mit ALS, Amyotrophe Lateralsklerose, auch Motor Neuron Disease genannt, bei der eine Degeneration der Nervenzellen stattfindet, die für die Muskelbewegung zuständig sind. Oder auch zur Verbesserung der Lebensqualität von Schlaganfallpatienten. Das ist zumindest meine Hoffnung. Ich glaube aber eher nicht, dass jemand durch die Ergebnisse unserer Arbeit auch drastisch länger leben wird. Ich wäre nicht so vermessen zu sagen, dass wir Krankheiten wie die genannten heilen könnten.

Brinzanik: In der Computational Neuroscience wird auch an biome-

dizinischen Anwendungen geforscht. Man arbeitet an Neuroprothesen, die sensorische, motorische und kognitive Fähigkeiten des Nervensystems ersetzen können. Wie funktioniert das?

Im Grunde ist es eine Frechheit von Hirnforschern, jetzt auch in Richtung Anwendung zu gehen. Eine Voraussetzung dafür ist ein Verständnis des neuronalen Codes. Wenn ich in der Lage bin, die Aktivität von Nervenzellen zu messen, könnte ich dann daraus rekonstruieren, was der Inhaber dieser Zellen gerade sieht, hört oder plant? Nehmen wir zum Beispiel das motorische System, den Teil des Gehirns, der dafür sorgt, dass wir unseren Arm bewegen, oder auch, dass wir etwas greifen können. Wenn ich verstanden habe, wie eine Aktivität von Nervenzellen dazu führt, dass sich irgendwelche Muskeln anspannen, dann müsste ich auch in der Lage sein, wenn ich jetzt solche Aktivität bei einer Person beobachte, vorherzusagen, was diese Person gleich tun wird. Dann habe ich seinen motorischen Code verstanden. Und dann wäre es interessant, auch über potenzielle Anwendungen nachzudenken. Zum Beispiel, wenn im Gehirn alles noch funktioniert, aber das Rückenmark, das dafür sorgt, dass die Signale zu den Muskeln kommen, wegen Unfall oder Krankheit unterbrochen ist. Dann wäre es doch wunderbar, wenn ich dieser Person helfen könnte, indem ich sage: Ich weiß, was du willst, weil ich deine Gedanken lesen kann, zumindest die, die mit Bewegung zu tun haben, und ich kann nun dafür sorgen, dass diese Kontrollbefehle zu den Muskeln kommen. Oder wenn ich, in dem Falle, dass auch die Muskeln nicht mehr da sind, weil der Arm ab ist, die Kontrollbefehle auf einen Roboterarm leiten könnte. Ich wäre auch schon froh, wenn ich das auf den Computercursor leiten könnte, damit die Person wenigstens schreiben und wir das lesen können. Das wären Ziele einer motorischen Neuroprothetik. Als Wissenschaftler sind wir primär daran interessiert, so

etwas als Test zu benutzen und zu sehen, ob das, was wir zu verstehen glauben, auch stimmt. Aber wir schließen nicht aus, dass es auch interessante klinische Anwendungen geben kann. Einiges davon funktioniert schon, das Cochlea-Implantat zum Beispiel als akustische Prothese, die Informationen – hier: Schall, inklusive Sprache und Musik – von außen nach innen leitet. Wenn die Haarsinneszellen in der Cochlea, die man braucht, um zu hören, nicht mehr funktionieren, ersetzt man sie und geht direkt an die Nervenenden, die an ihnen hängen, und reizt diese elektrisch. Von hier aus gehen die Signale ins Gehirn, so dass den Leuten ein Höreindruck vermittelt wird. Wie gesagt, das funktioniert und wird inzwischen in HNO-Kliniken eingebaut. Was zurzeit im klinischen Test ist, ist das sogenannte Retina-Implantat, mit dem man die Netzhaut im Auge ersetzen kann.

Brinzanik: Und das funktioniert? Bei Erwachsenen, die blind auf die Welt kamen und als Babys nicht gelernt haben, mit Sehsignalen umzugehen?

Das ist genau dasselbe wie mit dem Cochlea-Implantat. Es funktioniert im Prinzip auf dieselbe Art und Weise, und das ist gerade der Witz. Der Neurowissenschaftler Michael Merzenich, der maßgeblich an der Entwicklung der Cochlea-Implantate beteiligt war, sagte einmal: Wir haben lange Zeit am Verständnis des neuronalen Codes für Hören gearbeitet, weil wir meinten, das sei essenziell, um so ein Implantat bauen zu können. Und das stimmt auch. Aber was sich als noch wichtiger herausgestellt habe, sei, dass die Leute, die das Gerät implantiert bekommen, lernen, damit umzugehen. Natürlich ist der Höreindruck, den das Implantat vermittelt, völlig anders als das, was man normalerweise hört. Das Gehirn muss dann lernen, mit diesem neuen Eindruck umzugehen, ihn zu verstehen und aus ihm Verhalten zu generieren. Das heißt, sehr viel wesentlicher als das Verständ-

nis des neuronalen Codes ist die Adaptivität des Gehirns an dieses Maschinenteil. Und genauso, würde ich sagen, wird es bei der Retina sein. Das Gehirn wird in Interaktion treten mit dieser künstlichen Retina, mit dieser Kamera meinetwegen, und wird lernen, damit umzugehen. Es wird langsam das Ding kalibrieren, und der Träger wird erstmal an die Wand knallen, wo er das Fenster wähnte und umgekehrt, aber irgendwann wird er es kapieren. So wie auch das Gehirn eines Kindes lernt, mit der echten Retina umzugehen. Das heißt, das Lernen wird letztlich bestimmen, ob das Implantat funktioniert oder nicht. Die künstliche Retina darf nur nicht so schlecht sein, dass die Lernfähigkeit des Gehirns nicht ausreicht. Und genauso ist es mit den motorischen Prothesen. Irgendwann wird es dazu kommen, dass man die Hirnaktivität abgreift und einen Roboterarm ansteuert. Der wird am Anfang auch den Kaffee über den Tisch gießen. Aber das Gehirn wird sich darauf einlassen, es wird umdenken und umlernen. Und wenn wir schlau sind, bauen wir eine Decodiermaschine ein, die auch aus ihren Fehlern lernt. Und dann haben wir ein interessantes wissenschaftliches Problem: ein Gehirn, das versucht zu lernen und diese Maschine zu integrieren, während die Maschine versucht zu lernen, mit dem Gehirn umzugehen. Und es ist nicht gesagt, dass das kongruiert. Deswegen geht es in einem unserer Projekte um Koadaptivität, also um die Frage, wie ein biologisches Gehirn mit einem künstlichen Gehirn umgehen kann, wenn beide versuchen, sich anzupassen.

Brinzanik: Außer an diesen sensorischen und motorischen Leistungen arbeitet man auch bereits an kognitiven Prothesen.

Ja, da gibt es zum Beispiel Ted Berger an der University of Southern California in Los Angeles, der versucht, den Hippocampus zu ersetzen. Der Hippocampus ist ein Hirnteil, das eine Rolle bei der Gedächtnisbildung spielt. Wenn es da Störungen gibt, könn-

te man versuchen, ihn über ein Gerät, das seine Funktion nachahmt, einen künstlichen Hippocampus sozusagen, zu überbrücken, so dass die Gedächtnisbildung wiederhergestellt wird.

Hülswitt: Und Sie können sich auch vorstellen, dass das langfristig klappt?

Ich wüsste keinen Grund, warum das nicht möglich sein sollte. Es kann sehr lange dauern, bis man genügend verstanden hat, aber ich sehe da keine grundsätzlichen Probleme.

Enhancement

Hülswitt: Sprache ist ja eine schöne, aber doch auch recht umständliche Übersetzungstechnologie. Kann man sich vorstellen, dass es einmal eine sprachfreie Kommunikation von Hirn zu Hirn durch direkte Übertragung von Hirnaktivität geben wird?

Das weiß ich nicht. Vielleicht könnte man Sinneseindrücke vermitteln, also dass ich sehe, was Sie sehen, indem ich Ihr Gehirn dekodiere und das bei mir auf eine künstliche Retina spiele. Das hieße aber noch nicht, dass ich auch weiß, was Sie sich dabei gedacht haben. Dazu bräuchte ich noch viele andere Informationen – wenn die überhaupt greifbar sind und wenn ich überhaupt rausfinde, wohin ich dazu die Elektroden stecken muss. Es könnte gut sein, dass sich Ihre Gedanken dabei an so vielen Orten auf einmal abspielen, dass ein Abgreifen technisch gar nicht möglich ist. Das muss geklärt werden, bevor ich sagen kann, ob es eine solche Übertragung geben wird oder nicht. Und nehmen wir einmal an, es wäre möglich, irgendwelche Farbmuster, die ich mir mit meinen geschlossenen Augen vorstelle, Ihnen zu übermitteln, dann hieße das noch nicht, dass Sie dabei dieselbe Vorstellung haben, die ich hatte. Vielleicht ginge es, indem man sich ge-

gegenseitig entsprechend trainiert. Dass man sich kalibriert und mitteilt: Immer, wenn ich dieses gesehen habe, habe ich das dabei gedacht, und der andere bekommt das dann irgendwann mit. Dann könnte man sich vielleicht einigen. Aber im Grunde definiert man dabei wieder eine neue Sprache.

Hülswitt: Und hätte Übersetzungsprobleme neuer Natur. Wird es irgendwann Chips geben, die man ins Gehirn implantiert und die bestimmte kognitive Fähigkeiten verbessern?

Ich glaube nicht daran. Einmal abgesehen davon, dass ich nicht weiß, wer so sehr daran interessiert sein sollte, dass er einen Großteil seines Lebens diesem Unternehmen widmen wollte. Vergessen Sie nicht, schon in so eine motorische Neuroprothese fließen mehrere Jahrzehnte Forschung. Und wir reden hier von etwas ganz Einfachem, nämlich davon, einen Computercursor bewegen zu können oder eine E-Mail zu schreiben oder eine Hand ans Steuer zu bringen. Ich rede jetzt noch nicht einmal davon, dass sie auch zugreifen kann. Und es kostet haufenweise Geld, dahin zu kommen. Wer will das finanzieren?

Brinzanik: Die Entertainment-Industrie, für noch realistischere Computerspiele.

Vielleicht die Medien. Kann sein. Aber dann muss man immer noch die Verrückten finden, die bereit sind, zwanzig oder dreißig Jahre ihres Lebens darein zu investieren.

Brinzanik: Unternehmen könnten dafür Forschungslabore einrichten.

Ich weiß. Viel von der Entwicklung Künstlicher Intelligenz in Japan wird von Nintendo oder Sony gesteuert. Es bleibt aber abzuwarten, ob dabei eine vernünftige, brauchbare motorische Neuroprothese herauskommt. Es wird vielleicht dazu führen, dass wir uns EEG-Elektroden auf den Kopf setzen und damit irgendein Spielchen ansteuern können, das gibt es ja jetzt schon zu kau-

fen. Aber das sind für mich keine ernst zu nehmenden Anwendungen. Das ist Spielerei am Rande.

Hülswitt: Gibt es auch militärisches Interesse?

Das gibt es. Ein Teil der Prothetikforschung in den USA wird vom Militär gestützt. Das läuft unter Enhancement, Stichwort »Universal Soldier«¹, und man kann sich natürlich vorstellen, dass es für diese Leute toll wäre, wenn ein Pilot zusätzliche Möglichkeiten hätte. Man könnte sich auch vorstellen, nicht nur die Hände, sondern auch die Augen oder andere Hirnaktivitäten dafür zu benutzen und darauf zu trainieren, zusätzliche Geräte zu kontrollieren, im Sinne von erweitertem Multitasking. Oder dass man sensibler wird oder dass man zusätzliche Fähigkeiten kreiert wie mit Infrarot-Nachtsichtgeräten.

Cyborgisierung des Menschen

Hülswitt: Ab welchem Punkt würden Sie denn von einem Cyborg sprechen?

Da kann man sich auf jeden Moment einigen. Man kann auch sagen, dass Leute, die heute eine Prothese haben, oder Käpt'n Ahab mit seinem Holzbein, Cyborgs sind. Wenn jemand das so sieht, dann kann ich damit leben. Das ist für mich keine angsterregende Vision.

¹ Universal Soldier ist der Titel eines Films von Roland Emmerich aus dem Jahr 1992. »Universal Soldiers« sind gentechnisch manipulierte und durch Technikapplikationen aufgerüstete Supersoldaten. In dem Streifen und seinen beiden Fortsetzungen, *Universal Soldier: The Return* und *Universal Soldier: Regeneration*, kommen alle nur denkbaren Formen des Enhancement zum Einsatz. Der »Universal Soldier« ist das fiktive Paradebeispiel der Verschmelzung von Mensch und Technologie.

Hülswitt: Ab welchem Punkt gibt es ein juristisches Problem? Wer ist verantwortlich, wenn ein Unfall passiert?

Das wäre in der Tat ein schwieriges Problem. Nehmen wir einmal an, wir wären so weit, dass wir eine motorische Neuroprothese bauen könnten, wir geben sie jemandem, und der bringt damit jemanden um. Kann derjenige sich dann hinter mir verstecken und sagen, dass ich seine Gedanken falsch gelesen habe? Und ich muss mich dann vor Gericht damit auseinandersetzen? Das wird eine wichtige Frage werden. Aber noch einmal zu den Grenzen der Natürlichkeit. Ich habe eine Brille, und ohne Brille funktioniere ich deutlich schlechter. Bin ich jetzt noch natürlich? Und wäre ich nur natürlich in dem Moment, in dem ich die Brille weglege? Ich glaube, fast alle Leute würden bei einem Brillenträger noch nicht von einem Cyborg sprechen. Und ich denke, es ist eine Frage der Akzeptanz, was man zulässt und was nicht.

Ethik und Gesellschaft

Brinzanik: Machen Sie sich Gedanken über die gesellschaftlichen Implikationen Ihrer Arbeit? Grundlagenforschung und deren technologische Anwendung prägen ja sehr stark unsere Lebenswelt. Das Internet beispielsweise hat in den letzten zehn Jahren sehr viel verändert.

Aber dasselbe Internet hat uns gelehrt, wie schwierig es ist, richtige Vorhersagen zu treffen. Wenn man die Prognosen berühmter Futurologen von vor zwanzig Jahren liest, dann sieht man, dass das Internet bei ihnen nicht vorkommt. Vorhersagen sind also immer schwierig, vor allem, wenn es um die Zukunft geht – eine Weisheit, die vielen, vor allem aber Mark Twain zugeschrieben wird. Hinterher die Zukunft vorherzusagen ist jedenfalls rela-

tiv leicht. Sicher wird das Konsequenzen haben. Ich mache mir schon manchmal Gedanken, aber nicht im Sinne von: Das, was ich jetzt vorhabe, werde ich das wirklich weitermachen? Weil ich überhaupt nicht vorhersagen kann, was daraus resultiert. Ich denke, viel wichtiger ist, dass wir uns dauernd bemühen, den Leuten klarzumachen, was wir gerade treiben, warum wir das treiben und was die Implikationen sind, die wir sehen. Damit man eine vernünftige Diskussion darüber führen kann, anstatt Diskussionen, die eher von Angstvisionen und vor allen Dingen von Nichtwissen geprägt sind.

Brinzanik: Ergeben sich auch ethische Fragen aus Ihrer Forschung? Schon. Also zum Beispiel die Frage, macht man Tierversuche? Dann: Welche Versuche will man zulassen, welche will man eher nicht zulassen? Ab wann sind wir so weit, dass man uns ohne Gefahr auf Patienten loslassen möchte? Und für welche Sachen? Das sind alles Fragen, die geklärt werden müssen. Und ich diskutiere gerne mit Leuten, die darüber auf andere Art und Weise nachgedacht haben, denn ich würde das ungern alleine entscheiden müssen, und nur so kommen wir zu einem Konsens. Solange wir den nicht haben, muss man die Probleme weiter durchdenken, und eventuell lässt man sein Vorhaben eben sein. Und obwohl es aus meiner Sicht vernünftig ist, die Neuroprothetik voranzubringen, kann es durchaus sein, dass man an bestimmten Anwendungen persönlich nicht arbeiten will. Und ich bin auch dagegen, dass in so einem Fall Gemeinschaftsgeld fließt. Zum Beispiel in den »Universal Soldier«. Das Geld kann besser verwendet werden als für solche Entwicklungen.

Brinzanik: Sollte die Wissenschaft gesellschaftlich kontrolliert werden?

Das wird sie. Alle unsere Anträge werden von Gutachtergremien gelesen, die sorgfältig prüfen, ob das eine vernünftige Frage ist,

die wir stellen, und ob unsere Methoden zum Ziel führen. Und ob diejenigen, die den Antrag stellen, auch die Qualitäten haben, das Vorhaben durchzuziehen. Außerdem muss jeder Tierversuch genehmigt werden durch das Regierungspräsidium, das sehr genaue Auflagen gibt. Und vor jedem Versuch, den wir in der Klinik mit Menschen machen wollen, wird erst eine Ethikkommission eingeschaltet, die ebenfalls beurteilt, ob das zulässig ist, was wir wollen, ob es vernünftige Fragen sind und ob unsere Herangehensweise zum Ziel führt. Also diese Art von Kontrollen, was Geld und Genehmigungen angeht, greifen sehr stark. Ich mache mir keine Sorgen, dass wir unkontrollierte Verrückte wären, die tun können, was sie wollen. Ich glaube, das ist gut geregelt.

400 Jahre

Hülswitt: Wenn Sie die Möglichkeit hätten, durch Enhancements gesunde 400 Jahre alt zu werden, würden Sie das machen? Sie müssten allerdings Ihren Körper umrüsten lassen, Teile der Hardware müssten ersetzt werden durch haltbarere Materialien.

Das ist ja jetzt schon so. Ich war gerade beim Zahnarzt, da wird einiges ausgebaut und ersetzt. Aber 400 Jahre – ich weiß es nicht. Es wird natürlich auch immer voller, wenn die Alten nicht mehr gehen, es kommen ja immer mehr Neue dazu. Ich weiß nicht, ob die Lebensqualität dann bleiben kann, wie sie ist. Wenn ich mir vorstelle, dass ich dann leben muss wie in New York oder in Tokio, dann weiß ich nicht, ob ich das möchte.

Brinzanik: Sie könnten den Todeszeitpunkt immer noch selbst bestimmen.

Das würde ich lieber die Biologie für mich bestimmen lassen. Nein, ich glaube nicht, dass ich 400 Jahre alt werden möchte.

Hülswitt: Es könnte ein gewisser Druck entstehen, wenn andere Leute sich dafür entscheiden und man sieht, wie sie jung und gesund bleiben und man selber nicht.

Und es könnte zum Beispiel die Krankenkasse sein oder die Regierung, die entscheidet, wie viel in wen investiert wird. Das ganze Spektrum all dieser Technologien bekommt man natürlich nicht umsonst. Und die Frage ist, ob jeder zu ihnen Zugang haben wird oder nur bestimmte Kategorien von Leuten, die irgendwelche Tests bestehen und wichtig für die Gesellschaft sind. Das sind Fragen der Ethik, die dann kommen werden. Ich möchte nicht gerne auf dem Stuhl desjenigen sitzen, der das zu entscheiden hat. Aber ich weiß auch nicht, ob ich Leute kenne, denen ich es gerne in die Hand geben möchte. Dann entscheide ich doch lieber selbst.