

Die Entstehung der Hirn-Computer-Analogie¹

Tücken und Fallstricke bei der Technisierung des Gehirns

Markus Christen

The nervous system is a communication machine and deals with information. Whereas the heart pumps blood and the lung effects gas exchange, whereas the liver processes and stores chemicals and the kidney removes substances from the blood, the nervous system processes information. (Perkel & Bullock 1968: 227)²

Das Gehirn ist eine informationsverarbeitende Maschine, so das obige Zitat. Kaum eine naturwissenschaftlich gebildete Person würde diese Aussage heutzutage grundlegend in Frage stellen.³ Sie würde aber auch festhalten, dass mit dieser Aussage nicht viel gewonnen ist. Sie würde insbesondere bestreiten, dass mit „Informationsverarbeitung“ das gemeint ist, was tagtäglich in den immer raffinierter werdenden Prozessoren unserer Computer geschieht. Denn wissenschaftlich gesehen ist die Gehirn-Computer-Analogie tot, wenn mit dem Begriff „Computer“ die heute zum Alltag gehörenden Computersysteme gemeint sind, die noch zur Hochblüte der Kybernetik allgemein für Erstaunen gesorgt haben. Zwar ändert derzeit die Vorstellung, was ein „Computer“ ist – und hier bahnt sich die Möglichkeit an, dass diese Analogie eine neue Blüte erreichen kann. Freilich unter einem anderen Vorzeichen: der Computer ist dann nicht mehr das epistemische Erklärungsraster für neuronale Informationsverarbeitung. Vielmehr soll das Gehirn Vorbild werden für neue Arten von Computern – eine Vorstellung, die Teil einer umfassenden „Informatisierung“⁴ ganzer Wissenschaftsbereiche ist. Dieser Punkt wird uns aber erst am Schluss dieser Betrachtung beschäftigen.

Im Zentrum dieser Arbeit steht die erste Phase des Einbruchs der Informations-Metaphorik in die Neurowissenschaft, als die Begriffe „Kanal“ (*channel*), „Code“ (*code*), „Rauschen“ (*noise*), und „Informationsverarbeitung“ (*computation*) Eingang in den Begriffsapparat der Hirnforschung fanden (ich verwende dafür nachfolgend die Bezeichnung „Informatisierung“). In diesem Zeitraum, der sich grob zwischen 1940 bis 1970 lokalisieren lässt, entwickelte sich die Analogie von Gehirn und Computer, die sich auf der populären Ebene auch heute noch im Sprachgebrauch findet – etwa wenn mit „Festplatte“ das Gedächtnis bezeichnet wird. Diese Phase ist für ein Verständnis der Technisierung des Gehirns zweifellos bedeutsam, weil sie zeigt, wie widerspenstig sich die „*wetware*“ Gehirn einer Einspannung in das informa-

¹ Dieser Beitrag ist ein deutschsprachiger Zusammenzug des historischen Teils der Dissertation „*The Role of Spike Patterns in Neuronal Information Processing. A Historically Embedded Conceptual Clarification*“ von Markus Christen (2006, Diss. ETH No. 16464). Dort finden sich auch ausführlichere Literaturhinweise.

² D.H. Perkel & T.H. Bullock (1968): Neural Coding. *Neuroscience Research Progress Bulletin* 6(3): 221-348.

³ Hier sei bemerkt, dass der Begriff „Maschine“ auch im naturwissenschaftlichen Kontext Anlass zu Diskussionen geben kann, wobei aber festzuhalten ist, dass bei diesem Begriff in den vergangenen Jahren eine Bedeutungsverschiebung stattgefunden hat. In den Naturwissenschaften wird er heute auch für natürliche Systeme (z.B. „molekulare Maschinen“) angewendet, die nicht geplant, designt und konstruiert wurden, wie dies der klassische Maschinenbegriff impliziert. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die Charakterisierung des Gehirns als „informationsverarbeitende Maschine“ dieses *vollständig* charakterisiert. Die Beantwortung dieser Frage muss berücksichtigen, wie unscharf und umfassend der Informationsbegriff ist, der jeweils verwendet wird.

⁴ Gemeint ist hier nicht die Nutzung von Informatik in den Wissenschaften, sondern die Beschreibung natürlicher Vorgänge als informationsverarbeitende Prozesse, wie sich das derzeit beispielsweise in der Systembiologie ausdrückt. Eine trennscharfe Unterscheidung hinsichtlich dieser beiden Aspekte ist aber nicht möglich, zumal gerade die Simulationsforschung und -nutzung ein wichtiger Moderator dieser Entwicklung ist.

tionstheoretische Raster entzogen hat. So hat beispielsweise die Metaphorik des „Code“, die sich in der Genetik der 1950er und 1960er Jahre als sehr wirkmächtig erwiesen hat⁵, in der Neurowissenschaft bislang keine vergleichbare Karriere gemacht. So stammt das oben genannte Zitat aus einer Publikation, die gleichsam den Höhepunkt der ersten Informatisierungsphase der Hirnforschung markiert, in welcher 43 potentielle *neural codes* vorgestellt wurden – offenbar hatte der Begriff „Code“ nicht die gewünschte vereinheitlichende Funktion.

Dieser Beitrag zeigt die Eckpunkte der Entstehung der Gehirn-Computer-Analoge im Zug der Informatisierung der Hirnforschung anhand dreier Schritte: In einem ersten Schritt wird der Kontext skizziert, in welchem diese Entwicklung stattfand. Von besonderem Interesse ist hier die aufkommende Kybernetik, deren kulturgeschichtliche Bedeutung in jüngster Zeit in zahlreichen Publikationen genau untersucht worden ist.⁶ Im zweiten Schritt werden die (primär naturwissenschaftlichen) Voraussetzungen dargelegt, deren Klärung Voraussetzung für die Anwendung der Informations-Begrifflichkeit war. Drittens wird anhand der wissenschaftlichen Begriffe *code*, *noise*, *channel* und *computation* aufgezeigt, mit welchen Schwierigkeiten die Forscher der damaligen Zeit kämpften, um diese aus der Informationstheorie und Kybernetik stammende Begrifflichkeit für ihre Fragestellungen nutzbar zu machen. Dies zeigt exemplarisch die Tücken und Fallstricke, denen sich auch die heutigen Versuche zur Technisierung des Gehirns nicht entziehen können. Schlussfolgerungen, die sich aus dieser Entwicklung für die jetzt sehr prominent vorangetriebene Informatisierung der Lebenswissenschaften schließen lassen, bilden den Abschluss dieser Betrachtung.

Umfeld: das beginnende Informationszeitalter

Der Einbruch der Informationsmetaphorik in die Neurowissenschaft ist kein singuläres Ereignis, sondern gekoppelt an einen Prozess, der von William Aspray als „Konzeptualisierung der Information“ bezeichnet wurde.⁷ Innert gut einer Dekade um den Zweiten Weltkrieg hatten fünf Forscher – Warren McCulloch, Walter Pitts, Claude Shannon, Alan Turing und John von Neumann – wichtige Beiträge geliefert, die eine formale Engfassung und Quantifizierung der Begriffe „Information“ und „Verarbeitung von Information“ (*computation*) erlaubten. Sie hatten ihre Arbeiten auch als Ansatzpunkte für das Verständnis neuronaler Vorgänge angesehen, obgleich sie im Zug ihrer wissenschaftlichen Arbeit mit dem „biologischen Gehirn“ kaum in Berührung kamen.⁸ Das Wirken dieser fünf Personen ist wissenschaftshistorisch gut untersucht, so dass an dieser Stelle nur einige allgemeine Bemerkungen folgen sollen.

Ein Markstein des beginnenden Informationszeitalters war die Kybernetik, die sich ab den 1940er Jahren entwickelte und im 1948 erschienenen Buch „Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine“ von Norbert Wiener⁹ ihren Leitstern fand. Die

⁵ Vergleiche dazu L.E. Kay (2000): *Who Wrote the Book of Life? A History of the Genetic Code*. Stanford University Press, Stanford.

⁶ Vergleiche dazu beispielsweise C. Pias (2003/2004): *Cybernetics - Kybernetik: The Macy Conferences 1946-1953. Transactions/Protokolle* (Band 1) und *Essays & Documents* (Band 2). Diaphanes Verlag, Zürich, Berlin. M. Hagner & E. Hörl (2008): *Die Transformation des Humanen. Beiträge zur Kulturgeschichte der Kybernetik*. Suhrkamp, Frankfurt a.M.

⁷ W. Aspray (1985): The scientific conceptualization of information: a survey. *Annals of the History of Computing* 7(2): 117-140.

⁸ Warren McCulloch bildet hier eine Ausnahme. Er erhielt sowohl eine Ausbildung in Neurophysiologie und arbeitete dann sowohl in diesem Bereich als auch in der Psychiatrie. Seine wissenschaftliche Arbeit beeinflusste aber vorab die technischen Wissenschaften. Siehe dazu: M. Christen (2008): Varieties of publication patterns in neuroscience at the cognitive turn. *Journal of the History of the Neurosciences* 17: 207-225.

⁹ N. Wiener (1948): *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT-Press, Cambridge.

Reaktion auf dieses Werk war weitreichend; die Kybernetik trat gar mit dem Anspruch auf, „das Gravitationszentrum der verschiedenen Wissenskulturen und der Technik zu bilden“.¹⁰ Für unsere Zwecke bedeutsam ist das epistemische Ideal, das die Kybernetik hinsichtlich der Erklärung auch neurobiologischer Vorgänge bereit stellte. Am deutlichsten formulierte Wiener dieses 1950 zusammen mit dem mexikanischen Arzt und Physiologen Arturo Rosenblueth:¹¹

We believe that men and other animals are like machines from the scientific standpoint because we believe that the only fruitful methods for the study of human and animal behavior are the methods applicable to the behavior of mechanical objects as well. Thus, our main reason for selecting the terms in question was to emphasize that, as objects of scientific enquiry, humans do not differ from machines. (Rosenblueth & Wiener 1950: 320)

Ausgehend von dieser programmatischen Feststellung wurde nicht nur das Fundament gelegt, um das Nervensystem als *communication machine* anzusehen, sondern es wurde auch ein Kriterium mitgeliefert, wann man dieses System verstanden hat: wenn man es erfolgreich nachbauen kann. In zahlreichen Schriften von Kybernetikern und Neurowissenschaftlern ab den 1950er Jahren fand sich sinngemäß dieses epistemische Ideal.

Gestorben ist aber zweifellos die Kybernetik als wissenschaftliches Gebiet – unter anderem weil sie ihren Anspruch als vereinheitlichende Wissenschaft nicht einlösen konnte. Auch hinsichtlich der Informatisierung der Neurowissenschaft war die Kybernetik weniger bedeutsam als ein zweiter Eckpfeiler der Konzeptualisierung von Information, die Informationstheorie. Kristallisationspunkt für diese bildete die 1948 erschienene Arbeit „A mathematical theory of communication“¹² von Claude Shannon. Dieses Werk hatte eine mit Wieners „Cybernetics“ vergleichbare Wirkungsgeschichte, obgleich es sehr technisch geschrieben wurde, primär die Nachrichtentechnik fokussierte und in einem sehr spezialisierten wissenschaftlichen Magazin erscheinen war. Shannons konzise mathematische Beschreibung eines Kommunikationsvorgangs, die die semantischen Aspekte von Information ausklammerte, weckte das Interesse des Mathematikers Warren Weaver vom Rockefeller Institute. Er publizierte 1949 die Arbeit mit einer Einleitung versehen als Buch, das sogleich großes Interesse in unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen weckte. Diese „Popularisierung“ der Informationstheorie wurde von einer Reihe von Konferenzen begleitet, in welcher ihre Anwendungen in Gebieten wie Linguistik, Psychologie und eben auch Neurophysiologie (den Begriff Neurowissenschaft bzw. „neuroscience“¹³ gab es damals noch nicht) debattiert wurde.

Viele dieser Versuche zur Nutzung der Informationstheorie außerhalb der Nachrichtentechnik wurden aufgegeben, weil sich die realen Prozesse, auf denen das Vokabular der Informationstheorie angewendet wurde, als zu störrisch erwiesen hatten, um sinnvolle Fragestellungen zu generieren. Im Gegensatz zur Kybernetik hat sich die Informationstheorie aber als respektable Disziplin bis heute halten können, zumal sie in der Nachrichtentechnik klar umrissene Probleme hatte und diese auch lösen konnte.

¹⁰ Hagner & Hörl (2008): 38.

¹¹ A. Rosenblueth, N. Wiener (1950): Purposeful and non-purposeful behavior. *Philosophy of Science* 17: 318-326

¹² C. Shannon (1948): A mathematical theory of communication. *The Bell Systems Technical Journal* 27: 379-423.

¹³ Der Begriff „neuroscience“ wurde vermutlich erstmals vom Neurophysiologen Ralph Gerard in den späten 1950er Jahren verwendet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kybernetik gewissermaßen das epistemisch-kulturelle Fundament und die Informationstheorie das begriffliche Material für die Informatisierung des Gehirns geliefert haben.¹⁴ Dass, wie nachfolgend gezeigt wird, die nutzbringende Anwendung des Informationsvokabulars in der Hirnforschung im ersten Anlauf weitgehend missglückte, kann wiederum nicht auf den Niedergang der Kybernetik zurückgeführt werden. Vielmehr war es die faktische Störrigkeit des Gehirns und des neuronalen Gewebes in den Laboratorien der Neurophysiologie, welche zu diesem Scheitern führte.

Voraussetzungen: Neuronen und ihre Botschaften

Die Informatisierung des Gehirns ist nicht allein die Folge geeigneter Rahmenbedingungen und neu aufkommender Theorien, deren Anwendung auf neue Gebiete die Forscher reizt. Auch im potentiellen Anwendungsfeld selbst müssen die wissenschaftlichen Objekte, welche mit den von der Theorie geforderten Entitäten in Bezug gesetzt werden können, zuerst geschaffen werden. Diese Anwendungsbedingungen sollen hier kurz diskutiert werden.

Vorab zwei Objekte wurden in den ersten drei Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts als funktionale „Grundelemente“ des Nervensystems etabliert. Zum einen die Nervenzelle als Baustein des Nervensystems, zum anderen der Nervenimpuls (*spike*) als Grundelement der „Botschaften“, welche Nervenzellen austauschen. Die Durchsetzung der „Neuronendoktrin“ ist gut untersucht,¹⁵ so dass ich mich nachfolgend auf letzteren Punkt beschränke.

ABBILDUNG 1

LEGENDE Links: Ein „action current“ gemessen 1915 mit dem Saitengalvanometer, die untere Sinuskurve markiert Zeitintervalle von 10 ms (A. Forbes, A. Gregg (1915): Electrical studies in mammalian reflexes 1. The flexion reflex. *American Journal of Physiology* 37: 118-176). Rechts ein Nervenimpuls gemessen mit einem Röhrenverstärker und abgezeichnet von einem Oszilloskop, die Punkte markieren ein Zeitintervall von 1 ms (H.S. Gasser, J. Erlanger (1922): A study of the action currents of nerve with the cathode ray oscillograph. *American Journal of Physiology* 62: 496-524).

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in der wissenschaftlichen Literatur die elektrische Aktivität von Nervenzellen mit Begriffen wie „Nervenenergie“ oder „action current“ beschrieben. Für einen detaillierten Blick auf diese „Aktivität“ fehlte es hingegen an geeigneten Messgeräten. Erst der Saitengalvanometer erlaubte es, neuronale Aktivität zu messen und (mittels Fotoplatte) aufzuzeichnen. Ein frühes Beispiel einer solchen Messung publizierten Alexander Forbes und Alan Gregg im Jahr 1915. Das Bild zeigte die neuronale Aktivität keineswegs als ein „diskretes“ Ereignis, sondern eher als ein sich über beinahe 20 Millisekunden erstreckendes elektrisches Phänomen, das in einer ganzen Nervenfasern gemessen wurde (siehe Abbildung 1a). Die Verbreitung der Elektronenröhre ermöglichte dann den Bau von Verstärkern, welche die Auflösung zur Untersuchung des Phänomens deutlich verbesserte. In Kombination mit einem Oszilloskop gelang es zu Beginn der 1920er Jahre mehreren Forschergruppen, die „Nervenenergie“ nun tatsächlich wie ein scharfer Impuls aussehen zu lassen, so beispielsweise Herbert Spencer Gasser und Joseph Erlanger (Abbildung 1b).

Ein derart visualisiertes, klar umrissenes Ereignis erlaubte es, eine Verbindung zwischen dem Nervenimpuls und dessen Bedeutung wissenschaftlich anzugehen. Die hier entscheidende

¹⁴ Dies gilt vorab für die Begriffe „channel“, „noise“ und „code“, während man die Begriffe „computation“ bzw. „information processing“ eher der Kybernetik zuordnet.

¹⁵ Siehe dazu beispielsweise G.M. Shepherd (1991): *Foundations of the Neuron Doctrine*. Oxford University Press, Oxford.

Figur war der britische Physiologe Edgar Adrian (1889-1977). In zahlreichen Experimenten maß er in den 1920er Jahren die elektrische Aktivität in sensorischen Nervenzellen des Froschs, um den Zusammenhang zwischen Stärke des Stimulus und der dadurch erzeugten neuronalen Aktivität zu bestimmen.¹⁶ Er führte dabei die Begriffe „message“ und „information“ in Zusammenhang mit der messtechnischen Erfassung neuronaler Aktivität ein¹⁷, wobei er die linguistische Konnotation durchaus ernst nahm: „(...) the message may be like a succession of numbers, or words, sentences.”¹⁸ Eine solche Betrachtungsweise stieß aber auf Kritik. Charles Scott Sherrington, einer der bedeutendsten Neurophysiologen jener Zeit, wandte sich noch 1940 dagegen, Begriffe wie „message“ oder „signal“ zur Beschreibung der neuronalen Aktivität zu verwenden.¹⁹

Ein genauer Blick auf die Arbeitsweise von Adrian macht deutlich, dass die durch ihn geleistete Verknüpfung eines diskreten „alles-oder-nichts-Ereignisses“ mit „Information“ keineswegs ein schlichter Akt der Beobachtung war. Das bekannte Problem der Theoriegeladenheit von wissenschaftlichen Beobachtungen²⁰ lässt sich hier gut illustrieren. So musste Adrian beispielsweise sicher stellen, dass die von ihm gemessenen Impulse alle zur selben „Botschaft“ gehören. Die Platzierung der Elektrode war zu ungenau, um sicher zu sein, dass nur ein Nervenstrang gemessen wurde. Deshalb postulierte Adrian, dass einzelne Nervenzellen in regelmäßigen Abständen feuern würden und man demnach dann die „Botschaft“ einer einzigen Nervenzelle messen würde, wenn in der Tat ein regelmäßiges Muster erkennbar sei: “(...) it is not surprising that an end-organ should produce a regular series of discharges under a steady stimulation: it would have been much more so had the discharge been irregular.”²¹

Solche theoretischen Vorannahmen zwecks Etablierung eines wissenschaftlichen Objekts sind nicht überraschend und verschwinden auch nicht im Zug des Voranschreitens der Messtechnik.²² Adrian fehlte es aber noch am begrifflichen Apparat für eine wirkliche Informatisierung seiner Beobachtungen. Sein Reden von Botschaft und Information war nicht theoretisch gefestigt, was sich beispielsweise darin zeigt, dass er beide Begriffe austauschbar verwendete. Auch bot das zu messende System bereits damals einige Überraschungen. So fanden beispielsweise die amerikanischen Physiologen E.A. Blair und Joseph Erlanger eine erstaunliche Variabilität in der neuronalen Reaktion gleicher Neuronen auf gleiche Reize und es begann die Suche nach den Ursachen dieser Variabilität – die man vom Standpunkt eines Ingenieurs auch als „Unzuverlässigkeit“ bezeichnen könnte. Dennoch haben die Arbeiten der 1920er und 1930er Jahre die wissenschaftlichen Voraussetzungen geschaffen, dass später das informationstheoretische Vokabular einen Anknüpfungspunkt fand: Nervenzellen mit ihren Axonen als Kanal, „digitale“ Spikes als mögliche Bausteine eines Codes und Variabilität als eine Form von Rauschen.

Geburt mit Hindernissen: das informationsverarbeitende Gehirn

¹⁶ Eine erste Zusammenfassung seiner Arbeit lieferte er in: E.A. Adrian (1928): *The Basis of Sensation*. Christophers, London.

¹⁷ J. Garson (2003): The introduction of information into neurophysiology. *Philosophy of Science* 70: 926-936.

¹⁸ Adrian E.D. (1932): *The mechanism of nervous action*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, S. 17.

¹⁹ Siehe dazu C.S. Sherrington (1940/1951): *Man On His Nature*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 168.

²⁰ P. Duhem (1978): *Ziel und Struktur der physikalischen Theorie*. Meiner, Hamburg.

²¹ Adrian E.D., Zotterman Y. (1926): The impulses produced by sensory nerve-endings. Part 2. The response of a single end-organ. *Journal of Physiology* 61: 151-171, S. 157.

²² Siehe dazu beispielsweise: Hardcastle V.G., Stewart C. (2003): Neuroscience and the art of single cell recording. *Biology and Philosophy* 18: 195-208.

Kanal-Kapazitäten berechnen

ABBILDUNG 2

LEGENDE: Allgemeines Schema eines Kommunikationssystems nach Shannon (1948). Der Transmitter *kodiert* die Botschaft, so dass das Signal über einen *Kanal* zum Empfänger gelangt, wobei das Signal durch *Rauschen* verändert werden kann.

Shannons bekanntes Schema eines generalisierten Kommunikationssystems (Abbildung 2) bildete ein Raster, das in zahlreichen Forschungsgebieten, zumindest auf dem ersten Blick, interessante Forschungsfragen generierte – so auch in den Neurowissenschaften. Die erste offensichtliche Fragestellung war, welche Kanalkapazität ein „neuronaler Kanal“ hat – also wie viel Information (gemessen in Bit) pro Sekunde über einen solchen Kanal (z.B. einen Nerv) transferiert werden kann. Bereits 1950 und 1951 wurden erste Abschätzungen für den akustischen bzw. optischen „Kanal“ (Hör- und Sehsinn) des Menschen publiziert²³. Auch in den neurophysiologischen Labors wurde das Problem angegangen – und zwar von den Protagonisten einer „kybernetischen“ Sichtweise des Nervensystems. Warren McCulloch publizierte zusammen mit Donald MacKay 1952 eine erste Abschätzung, wie viel „Information“ eine einzelne Nervenzelle zu übermitteln vermag.²⁴ Das genaue Resultat interessierte McCulloch aber nicht. Vielmehr ging es ihm darum zu zeigen, dass die informationstheoretische Betrachtung auch evolutionsbiologisch Sinn macht: Das Nervensystem wird zum optimalen Informationskanal:²⁵

All living things have to find energetic Lebensraum between highly organized energy of light from the sun and ultimate heat-death – Warmetod. (...) Since the nervous system has contact with the totality of the world (...) by means of signals, I thoroughly expect that when we understand its ineluctable limitation, we will find that it maximizes the transmission of information by proper coding. (Wall et al. 1956::343)

Freilich verlangt die strikte Anwendung des informationstheoretischen Apparates die Beantwortung zentraler Fragen, was die damalige Neurophysiologie nicht leisten konnte. So musste insbesondere geklärt werden, auf welcher Zeitskala die Kodierung stattfinden soll (grob: über welches Zeitintervall soll sich ein „Symbol“ der neuronalen Botschaft erstrecken). McCulloch hatte hier klare theoretische Vorstellungen, die er bereits 1943 zusammen mit Walter Pitts publizierte.²⁶ Er dachte im Rahmen einer diskreten Welt und zerstückelte den Zeitstrahl in regelmäßige Intervalle, in welchen entweder ein Symbol (ein *spike*) vorkommt oder nicht. In dieser diskreten Welt kam er 1952 auf eine Obergrenze von 3000 bit/sec. Doch eine andere einflussreiche Figur, der theoretische Biologe Anatol Rapoport, bestritt diesen Wert später und schätzte die Obergrenze auf 4000 bit/sec.²⁷ Grund dafür war, dass Rapoports mathematische Sicht der Welt eine kontinuierliche war, also in den realen und nicht den rationalen Zahlen wurzelte. Es waren diese Unterschiede in tief greifenden theoretischen Grundannahmen,

²³ Jacobson H. (1950): The information capacity of the human ear. *Science* 112: 143-144. Jacobson H. (1951): The information capacity of the human eye. *Science* 113: 292-293.

²⁴ MacKay DM, McCulloch W. (1952): The limiting information capacity of a neuronal link. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 14: 127-135.

²⁵ Wall P.D., Lettvin J.Y., McCulloch W., Pitts W. (1956): Factors limiting the maximum impulse transmitting ability of an afferent system of nerve fibres. In: C. Cherry (ed.): *Information Theory*. Butterworths Scientific Publications, London: 329-344.

²⁶ Die hierzu zentrale Arbeit ist: McCulloch W., Pitts W. (1943): A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5: 115-133.

²⁷ Rapoport A, Horvath W. (1960): The theoretical channel capacity of a single neuron as determined by various coding systems. *Information and Control* 3: 335-350.

welche die voneinander abweichenden Schätzwerte generierten – nicht aber wirkliche Experimente.

McCulloch und andere wagten 1955 einen erneuten Versuch zur Messung der neuronalen Kanalkapazität.²⁸ Sie ermittelten zahlreiche Faktoren, welche solche Messungen beeinflussen könnten und verzichteten darauf, eine Abschätzung überhaupt nur zu publizieren. Dennoch war das Thema nicht gestorben. Noch bis zu Beginn der 1970er Jahre versuchten mehrere Laboratorien, neuronale Kanalkapazitäten experimentell zu bestimmen, wobei sie sich immer auf theoretische Annahmen stützen mussten, wie die Kodierung der Information vonstatten gehen könnte.²⁹ Die Mehrzahl der Neurophysiologen hielten diese Bemühungen aber für fruchtlos, so dass das Thema „Kanalkapazität“ als wissenschaftliche Fragestellung in der Hirnforschung schließlich ausstarb. Diese Problemstellung war dennoch prägend für jene Neurowissenschaftler, die sich später vertiefend mit der Frage der neuronalen Informationsverarbeitung auseinandersetzen.³⁰

Den neuronalen Code knacken

Die Frage nach dem „neuronalen Code“ stellte sich – direkt oder indirekt – bei allen praktischen Anwendungen des informationstheoretischen Vokabulars auf das Nervensystem. Das Reden von einem „Code“ tauchte erstmals im Umfeld der entstehenden Kybernetik auf. So hat John von Neumann an der Macy-Konferenz von 1950 explizit diese Begrifflichkeit verwendet – allerdings mit einem skeptischen Unterton:³¹

It seems to me that we do not know at this moment to what extent coded messages are used in the nervous system. It certainly appears that other types of messages are used, too; hormonal messages, which have a 'continuum' and not a 'coded' character, play an important role and go to all parts of the body. Apart from individual messages, certain sequences of messages might also have a coded character. (...) The last question that arises in this context is whether any of the coded ways in which messages are sent operate in any manner similar to our digital system. (von Foerster et al. 1951: 20-21).

Auch andere Teilnehmer der damaligen Besprechung sprachen vom einem eher „obskuren Charakter“ (Gregory Bateson) der Code-Begrifflichkeit im Nervensystem. Dennoch fand das Thema nachfolgend das Interesse von Neurophysiologen wie Kybernetikern – und zwar unabhängig von der Frage der neuronalen Kanalkapazität. Dabei zeigte sich von Anfang an, dass der Begriff „Code“ für unterschiedliche Formen neuronaler Informationsverarbeitung verwendet wurde. In den 1950er Jahren fanden sich vier „Kandidaten“ für solche Codes: nebst den zwei schon genannten Vorschlägen von McCulloch und Rapoport die bereits von Adrian ausformulierte Idee des „Frequenzcodes“ (die Zahl der Impulse pro Zeitintervall als Maß für die Stärke eines Reizes) und der „labelled line code“ – was nichts anderes war als die ebenfalls seit Jahrzehnten diskutierte Idee, wonach die an sich gleichen neuronalen Impulse nur durch ihr Vorkommen in unterschiedlichen sensorischen Kanälen ihre entsprechende Bedeu-

²⁸ Wall P.D., Lettvin J.Y., McCulloch W., Pitts W. (1956): Factors limiting the maximum impulse transmitting ability of an afferent system of nerve fibres. In: C. Cherry (ed.): *Information Theory*. Butterworths Scientific Publications, London: 329-344.

²⁹ Eine Übersicht dazu lieferte Färber G. (1968): Berechnung und Messung des Informationsflusses der Nervenfasern. *Kybernetik* 5(1): 17-29.

³⁰ So publizierte beispielsweise Moshe Abeles zu Beginn seiner Karriere zu Thema der neuronalen Kanalkapazität, siehe Abeles M., Lass Y. (1975): Transmission of information by the axon: II the channel capacity. *Biological Cybernetics* 19: 121-125.

³¹ Von Foerster H., Mead M., Teuber H.L. (eds.) (1951): *Cybernetics. Circular causal and feedback mechanisms in biological and social systems, transactions of the seventh conference (march 23-24, 1950)*. New York. Neu aufgelegt in C. Pias (2003).

tung erhielten. Weitere Kandidaten von „Codes“, die im Verlauf der 1960er Jahre dazu kamen, wurden ebenfalls – wie bei der Diskussion um die neuronale Kanalkapazität – aufgrund theoretischer Überlegungen eingeführt. Beispielhaft dafür ist die Bemerkung von Rapoport an einer Konferenz in Leiden, an der 1962 das Thema des „information processing in the nervous system“ breit diskutiert wurde:³²

This idea [a pattern code] is very attractive to those who would think of the operation of the nervous system in the language of digital computers, because a fixed temporal pattern, although in principle subject to a continuous deformation, has a strong resemblance to a digital code. It is in fact a generalization of the Morse code. It is also like a template of a key. The discovery of such patterns would immediately pose a challenging decoding problem. (Rapoport 1964: 21-22)

Während dieser Zeit war die Informatisierung der Neurowissenschaft in vollem Gang und die Suche nach neuen Codes – wie die hier genannte Idee eines „pattern code“, wonach sich wiederholende, komplexe Muster von Impulsen quasi die Botschaft bilden – beschäftigte mehrere damals bekannte Neurowissenschaftler.³³ Doch wie bereits bei Adrian (dessen Kritiker war Sherrington) zweifelten renommierte Neurowissenschaftler an der Bedeutung solcher Erkenntnisse. John Eccles bemerkte an derselben Konferenz von 1962: “There is a growing belief that significant information is carried in coded form by this temporal pattern [of impulse discharges]. However, it must be recognized that this temporal pattern is likely to be lost, or at least smeared, when several lines are converging on a neuron, each with its own temporal pattern of impulses, and I would think that several serially arranged smears give complete erasure of a pattern” (Gerald & Duyff, 1964: 142).

Die Suche nach einem neuronalen Code erreichte gegen Ende der 1960er Jahre ihren Höhepunkt, als sich 1968 die in diesem Feld aktivsten Forscher an einer „work session“ des *Neurosciences Research Program* trafen (Perkel & Bullock 1968). Mit eher ironischem Unterton fragten die Herausgeber zu Beginn “Is the code of the brain about to be broken?” (225) – um gleich danach anzufügen, dass keiner der Teilnehmer noch daran glaube, es gebe so etwas wie einen klar umrissenen neuronalen Code, den man „knacken“ könne. Die Publikation liest sich denn auch wie eine Kapitulation vor der biologischen Vielfalt:

It follows, then, that we cannot investigate ‘coding’ or representation of information in nervous systems in general but must begin by studying a multitude of specific examples with sufficient thoroughness and compass to provide a strong foundation for subsequent generalization about modes and properties of ‘neural coding’ (Perkel & Bullock 1968: 231).

Shannon selbst, ebenfalls Teilnehmer an diesem Symposium, war übrigens vom Scheitern „seiner“ Begrifflichkeit in der Neurowissenschaft nicht sonderlich überrascht. Für ihn schien klar, dass die Rede von „Information“ in der Neurowissenschaft nur Sinn mache “in its more colloquial non-Shannon sense; the information we discuss is not necessarily measurable in bits” (Perkel & Bullock 1968: 227, Fußnote).

Dem Rauschen einen Sinn abgewinnen

Kanalkapazität und Code waren theoretische Begriffe, die nur schwer mit der biologischen Realität verknüpft werden konnte. Ganz anders war dies mit der Idee des „Rauschens“ (*noi-*

³² Rapoport A. (1964): Information processing in the nervous system. In: R.W. Gerard, J.W. Duyff (eds.): *Information Processing in the Nervous System*. Excerpta Medica Foundation, Amsterdam, New York: 16-23.

³³ Zu nennen sind unter anderem Cornelius Wiersma, William Uttal, Theodore Bullock, P.D. Wall, J. Segundo.

se), welcher sich weit besser dafür eignete, als Mantelbegriff die Unbeständigkeit des biologischen Systems aufzunehmen. Zudem gab es einen von der Informationstheorie unabhängigen und biologienaheren Zugang zu diesem Problem, das – wie bereits vermerkt – in den 1930er Jahren unter dem Stichwort „neuronale Variabilität“ Thema der Neurophysiologie wurde: Paul Fatt und Bernhard Katz verwendeten den Begriff des „biological noise“ im Rahmen ihrer Untersuchungen der Funktionsweise der Synapse.³⁴ Sie nahmen den *biological noise* als Ausgangspunkt zur Entschlüsselung der (chemischen) synaptischen Funktion und nicht als Element eines kommunikationstheoretischen Problems.

Sobald aber Rauschen im Sinn von Shannon untersucht werden wollte, war der Zugang zum Problem ein anderer. Beispielhaft dafür ist die Bemerkung von Richard Fitzhug:³⁵

In the process of coding, the statistical fluctuations in the durations of the impulse intervals represent noise in engineering terminology (Fitzhug 1956: 933). To some extent, the brain becomes a communication engineer, as “the problem of the analysis of a nerve fiber message by the brain is similar to the engineering problem of detection of a signal in a noisy communication channel (939).

Das „noisy neuron“ wurde in dieser Perspektive zu einem unzuverlässigen Bauteil, mit dem das gesamte Nervensystem quasi umgehen musste³⁶ – eine Sichtweise, die mit dem evolutionsbiologischen Paradigma der Optimierung der Funktionen von Organismen an ihre Umwelt nur schwer zu vereinbaren war. Biologisch geprägte Neurowissenschaftler wie Theodore Bullock und Horace Barlow wandten sich denn auch Ende der 1960er Jahre scharf gegen eine solche kommunikationstheoretisch geprägte Vorstellung.

Vom biologischen Standpunkt aus hatte die Unterscheidung zwischen *signal* und *noise* immer ein willkürliches Moment, zumal nicht geklärt ist, welchen biologischen Sinn das Rauschen haben könnte. So erstaunt es nicht, dass bereits in den 1950ern von Neurophysiologen die Terminologie des „Rauschens“ zwar aufgenommen wurde, gleichzeitig aber nach dem biologischen Sinn von *noise* gefragt wurde³⁷ – eine Fragestellung, die im Kontext der Begrifflichkeit der Informationstheorie sinnlos ist. So ließ sich auch die Begrifflichkeit des „Rauschens“ im informationstheoretischen Sinn nicht gewinnbringend in der Neurowissenschaft anwenden. Vielmehr wurde der Begriff unpräzise verwendet, wie bereits Mary Brazier an einer Konferenz von 1962 bemerkte.³⁸

Den neuronalen Computer nachbauen

Die Nutzung des Shannon-Schemas für die Generierung sinnvoller neurobiologischer Fragestellung scheiterte demnach, sobald diese Begrifflichkeit im neurophysiologischen Labor nutzbar gemacht werden sollte. Einen solchen „Härtetest“ musste die Gehirn-Computer-Analogie³⁹ verstanden im weiteren Sinn – also als Ausdruck des epistemischen Ideals der Kybernetik – nie bestehen, denn der „Nachbau“ des Gehirns war (und ist) damals keine reali-

³⁴ Fatt P., Katz B. (1950): Some observations on biological noise. *Nature* 166: 597-598.

³⁵ FitzHugh R. (1956): The statistical detection of threshold signals in the retina. *The Journal of General Physiology* 40(6): 925-947.

³⁶ Beispielhaft dafür ist: Burns B.D. (1968): *The uncertain nervous system*. Edward Arnold Ltd., London.

³⁷ Beispielhaft dafür ist die Arbeit von Pinneo L.R. (1966): On noise in the nervous system. *Psychological Review* 73(3): 242-247.

³⁸ Brazier M.A. (1963): How can models from information theory be used in neurophysiology? In: W.S. Fields, W. Abbott (eds.): *Information Storage and Neural Control*. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois: 230-242.

³⁹ Der erste, der diese Analogie verwendet haben soll, war Norbert Wiener, siehe Aspray (1985): 124-125.

sierbare Option. In diesem Sinn geschützt vor der Empirie konnte die Idee, das Gehirn als Computer zu verstehen, eine größere Strahlkraft erreichen.

Wichtig zu bemerken ist, dass bereits zu Beginn der Verwendung dieser Analogie nicht nur darum ging, das Gehirn mit den Konzepten der damals entstehenden Rechner erklären zu wollen.⁴⁰ Bereits damals war das Gehirn ein faszinierendes Vorbild für eine ganz neue mögliche Form von Rechner, wobei ein eigentümlicher gedanklicher Zweischnitt vollzogen wurde: Zuerst wurde mit der Begrifflichkeit der Informationstheorie festgehalten, dass die Bauteile des Gehirns „unzuverlässig“ sind. Dann aber musste die – auf dieser Grundlage erstaunliche – Tatsache erklärt werden, dass das Gehirn ja offensichtlich gut funktioniert.

John von Neumann war von dieser Idee besonders fasziniert und untersuchte bereits 1956 detailliert die Fragestellung, wie aus unzuverlässigen Komponenten ein funktionierendes System generiert werden konnte.⁴¹ Am Hixon-Symposium 1948 machte von Neumann klar, dass es deutliche Unterschiede zwischen Gehirn und Computer gab und er lieber Ersteres als Vorbild für Letzteres ansehen wollte.⁴²

It is very obvious that the brain differs from all artificial automata that we know; for instance, in the ability to reconstruct itself (as in the case of mechanical damage). It is always characterized by a very great flexibility in the sense that animals with look reasonably alike and do the same thing may do it by rather different cerebral mechanisms. Furthermore, though all humans belong to the same category and do the same things, outwardly, in some cases they are using different cerebral mechanisms for the same things, so there seems to be a flexibility of pathways (Jeffress 1951: 109).

McCulloch äußerte sich am Hixon-Symposium ähnlich, indem er die zahlreichen Vorteile des „biologischen Computers“ hervor strich:⁴³ „Neurons are cheap and plentiful. (...) They operate with comparatively little energy.“ So muss festgehalten werden, dass diese Exponenten der Konzeptualisierung von Information sich für das epistemische Ideal der Kybernetik gar nicht so sehr interessierten. Vielmehr waren sie von der bionischen Inspiration fasziniert, obgleich die Funktionen des biologischen Originals damals von keinem der zahlreichen Ansätze (wie die damals entstandenen ersten neuronalen Netzwerke) auch nur annähernd erreicht wurden.⁴⁴

Schlussfolgerung und Ausblick

⁴⁰ Freilich gab es diese Vorstellung auch. So schrieb der deutsche Kybernetiker Karl Steinbuch: „Unsere Einsicht in die Funktion unseres Denksystems ist gering. Wenn nun plötzlich durch Automaten vergleichbare Eigenschaften erzeugt werden können (‘künstliche Intelligenz’), erschliesst sich dem forschenden Geist ein neuer Weg zum Verständnis des Menschen: Nämlich über das Verständnis der Automaten” (Steinbuch K. (1961): *Automat und Mensch. Über menschliche und maschinelle Intelligenz*. Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg: v.

⁴¹ Von Neumann J. (1956): Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components. In: CE Shannon, and J McCarthy (eds.): *Automata Studies*. Princeton University Press, Princeton: 43-98.

⁴² Jeffress L.A. (ed.) (1951): *Cerebral Mechanisms in Behavior. The Hixon Symposium*. John Wiley & Sons, New York.

⁴³ McCulloch W. (1951): Why the mind is in the head. In: LA Jeffress (ed.): *Cerebral mechanisms in behavior*. John Wiley & Sons, New York: 42-57.

⁴⁴ Beispielhaft dafür ist die Bemerkung des Kybernetikers Ross Ashby: „What has been found by computer studies in the last ten years thus suggests that one central problem of the ‘higher’ functions in the brain is to discover its methods for processing information. The methods we know today tend to be inefficient to ‘astronomical’ degree: the living brain may well know better” (Ashby W.R. (1966): Mathematical models and computer analysis of the function of the central nervous system. *Annual Review of Physiology* 28: 89-106; 104.

Das Fazit dieser Betrachtungen mag auf den ersten Blick erstaunen: Die konzise Umsetzung der Informatisierung des Gehirns im Zeitraum 1940 bis ca. 1970 scheiterte. Ab den 1960er Jahren häuften sich die skeptischen Kommentare selbst jener, welcher sich der Nutzung des Informationsvokabulars verpflichtet fühlen. Bereits 1962 äußerte Mary Brazier:⁴⁵ “In closing, let me say that the application of quantitative information theory to neurophysiology lies largely in the future.“ Sie sah die Informationstheorie als einen Ansatz an, der neue Ideen gebracht hatte, aber kaum neue Fakten, wobei hier angemerkt werden muss, dass das Potential neuer Ideen gegen Ende der 1960er weitgehend erschöpft erschien. George Moore, eine zentrale Figur in der Entwicklung statistischer Methoden für die Untersuchung neurowissenschaftlicher Phänomene, bedauerte 1966 die enttäuschende Ausbeute an Resultaten aus der Nutzung der Informationstheorie in der Neurowissenschaft. Zahlreiche weitere solche Kommentare finden sich in jener Zeit, wobei das 1969 geäußerte Statement von K.N. Leibovic exemplarisch ist:⁴⁶

I submit that ‘information theory’ in the sense of Shannon or Wiener is too restrictive for our purposes. (...) Shannon’s theory is, of course, quite relevant to problems of signal transmission, including channel capacity and coding. But, when one is dealing with biological information in the broad sense, it is well not to identify ‘information’ with a narrow definition from engineering science.

Bedeutete dieses ernüchternde Fazit das Ende der Informatisierung des Gehirns? Gewiss verschob ab den 1970er Jahren ein Grossteil der Forschenden ihr Interessensfeld aufgrund der neuen Möglichkeiten der molekularen Genetik. Doch der Blick auf die jüngere Geschichte zeigt eine zweite Phase der Informatisierung. So zeigen bibliometrische Studien und eine Analyse von Zeitschriften eine deutliche Zunahme des Vorkommens der Informationsbegrifflichkeit in Publikationen und der Gründung entsprechender Zeitschriften seit etwa Mitte der 1980er Jahre.⁴⁷ Grund ist zum einen das gestiegene Interesse an so genannten neuronalen Netzwerken, die sich als Forschungsgegenstand der Computerwissenschaften etabliert haben. Zum anderen – und das ist für die Einschätzung der künftigen Entwicklung bedeutsamer – werden vermehrt Computermodelle zur Simulation der Funktion einzelner Neuronen und ganzer Neuronenverbände eingesetzt.⁴⁸ Mit der damit einhergehenden Reduktion des biologischen Systems auf komplexe Gleichungssysteme wird es gleichzeitig möglich, der von der Informationstheorie geforderten Präzision Rechnung zu tragen. *Signal* und *noise* werden abgrenzbar und kontrollierbar und die Rede von einem neuronalen Code gewinnt hier einen neuen Sinn – freilich ohne damit zu einem übergreifenden Konzept zu werden.

Dieser Simulationsansatz geht übrigens weit über die Neurowissenschaft hinaus. Zahlreiche andere biologische Prozesse (wie z.B. die Regulation des Genoms oder die Morphogenese während der Embryonalentwicklung) werden zunehmend als Prozesse verstanden, in denen „Information“ gelesen, weitergeleitet oder transformiert werden. Die gewaltige, heute zur Verfügung stehende Rechenkraft im Verbund mit der Möglichkeit, z.B. mittels Robotik biologienahe Systeme nachzubauen, verhilft heute dem kybernetischen Ideal zu neuem Glanz.

⁴⁵ Brazier M.A. (1963): How can models from information theory be used in neurophysiology? In: W.S. Fields, W. Abbott (eds.): *Information storage and neural control*. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois: 230-242.

⁴⁶ Leibovic K.N. (1969): *Information processing in the nervous system*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 335-336.

⁴⁷ Siehe Christen (2006), Kapitel 4.

⁴⁸ Ein Beispiel dafür ist das „Blue Brain Projekt“ der ETH Lausanne – der Versuch, die Struktur und Dynamik einer ganzen kortikalen Säule (rund 10'000 Neuronen) im Computer nachzubilden (siehe <http://bluebrain.epfl.ch/> (eingesehen am 10.11.2008)).

Der Nachbau biologischer Systeme *in silico* oder gar in Form ausgefeilter Automaten beschäftigt weltweit immer mehr Wissenschaftler.

Dies dürfte sowohl für die wissenschaftliche Praxis als auch für die Beurteilung der technischen Produkte, die aus dieser Wissenschaft entstehen werden (beispielsweise *brain-computer-interfaces*) Auswirkungen haben, die derzeit erst in den Ansätzen verstanden sind. So wird die Nutzung des Computers als komplexes *modeling-tool* in immer mehr natur- und auch sozialwissenschaftlichen Disziplinen die Ausbildung künftiger Wissenschaftsgenerationen mehr und mehr prägen. Für die Neurowissenschaft bedeutet das, dass die in der ersten Phase der Informatisierung des Gehirns noch klar hervorgetretene Trennung zwischen der biologischen Widerspenstigkeit des biologischen Vorbilds und dessen theoretischen Modellen verschwimmen könnte. Denkbar ist aber auch, dass sie auf der Ebene der Anwendung neu und mit noch unklaren Konsequenzen auftreten kann, denn die Nutzung beispielsweise eines *brain-computer-interfaces* wird nicht nur aufgrund der Beherrschung der signaltechnischen Herausforderungen beurteilt, sondern auch, wie diese in das innere Erleben der betroffenen Person integriert werden.⁴⁹ Ein zunehmend wissenschaftliches Verständnis des „informatisierten Gehirns“ bedeutet nicht, dass dessen Träger mit weniger Widerspenstigkeit diese Technologie auch nutzen will.

Die Forschungen von Markus Christen werden vom Projekt Nr. 100011-116725 „Die neurobiologische Untersuchung des moral agent“ des Schweizerischen Nationalfonds unterstützt.

Zum Autor: Dr. sc. ETH Markus Christen studierte Philosophie, Physik, Mathematik und Biologie an der Universität Bern und promovierte in Neuroinformatik an der ETH Zürich. Derzeit arbeitet er am Graduiertenprogramm für Interdisziplinäre Ethikforschung der Universität Zürich an einem Projekt über *moral agency*. Seine Interessen umfassen methodische Fragen der Neurowissenschaft, Autonomie und Komplexität in sozialen Systemen und Neuroethik. Daneben arbeitet er als Wissenschaftsjournalist und -publizist.

43'000 Zeichen (ohne Bildlegenden, CV).

MC, 17.11.08

⁴⁹ Vgl. dazu das Beispiel des Cochlea-Implantats: Christen M (2005): Der Einbau von Technik in das Gehirn. Das Wechselspiel von Informationsbegriffen und Technologieentwicklung am Beispiel des Hörens. In: B Orland (ed): *Interferenzen. Studien zur Kulturgeschichte der Technik* Volume 9: 197-218.