

Das 5-Dollar-Neuron.

Von biologischen Rechnern und rechnenden Biologen

Jan Müggenburg M.A.

Initiativkolleg »Naturwissenschaften im historischen Kontext«

Universität Wien

Rooseveltplatz 10/9

A-1090 Wien

jan.mueggenburg@univie.ac.at

Abstract: Der folgende Text beschäftigt sich mit der im Kontext der Kybernetik in den fünfziger und sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts überaus populären Idee, Struktur und Kalkül physischer Nervenetze könnten als Vorbild für die Konstruktion »biologischer« Computerarchitekturen dienen. So wird zunächst die Frage gestellt, warum es in den fünfziger Jahren überhaupt möglich ist, von biologischen »Rechnern« zu sprechen und von künstlichen neuronalen Netzen zu träumen. Ein Blick auf die Gründung des Biological Computer Laboratory durch den österreichischen Physiker Heinz von Foerster im Jahr 1958 und die Vorstellung eines der dort durchgeführten Projekte verweist schließlich auf die Schwierigkeiten, die bei der Übertragung biologischer Denkfiguren auf technische Systeme auftreten.

1 Einleitung: Das 5-Dollar-Neuron

»Im Prinzip«, so berichtet Heinz von Foerster im Jahr 1958 auf dem *Zweiten Internationalen Kongress zur Kybernetik* in Namur aus seiner laufenden Forschung, gäbe es »keine fundamentalen Probleme mehr bei der Entwicklung neuronaler Schaltkreise« [Fo58, 245]. Schon bald könne man mit »biologischen Computern« rechnen, die auf dem von Warren McCulloch und Walter Pitts bereits im Jahr 1943 entworfenen logischen Kalkül neuronaler Netze basierten [WP43]. Tatsächlich seien die Mitarbeiter seines neu gegründeten Biological Computer Laboratory just in diesem Moment damit beschäftigt, mit verschiedenen Prototypen »künstlicher Neuronen« zu experimentieren. »Leider«, so von Foerster weiter, hätten McCulloch und Pitts jedoch in ihrem Theorem vergessen »eine untere Preisgrenze für ihre Netze anzugeben«. Man bemühe sich aber bereits »im ganzen Land günstige Komponenten aufzustöbern« und sei zuversichtlich, künstliche Neuronen schon bald für »weniger als fünf Dollar pro Stück« herstellen zu können [Fo58, 245].

Die Geschichten des Computers werden seit jeher von biologischen und insbesondere neurophysiologischen Metaphern und Analogiebildungen begleitet. Einen Höhepunkt erreicht die Verwandtschaftsbeziehung Computer-Gehirn jedoch mit der Gründung des *Biological Computer Laboratory (B.C.L.)* am Department of Electrical Engineering an der University of Illinois in Urbana-Champaign im Jahr 1958. Heinz von Foerster konzi-

pierte das B.C.L. als ein interdisziplinäres Labor in dem die neuesten Erkenntnisse neurobiologischer Grundlagenforschung für das Design alternativer Rechnerarchitekturen fruchtbar gemacht werden sollten. Die dort durchgeführten Experimente bestanden vor allem aus der Konstruktion von Maschinenmodellen, die nach den selben »fundamentalen Prinzipien« funktionieren sollten, die man in der parallel organisierten Struktur des Gehirns und den Wahrnehmungsapparaten lebendiger Organismen vorzufinden glaubte. Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, versammelte von Foerster über die Jahre eine heterogene Forschergruppe um sich, die aus international renommierten Kybernetikern, Neurobiologen und Philosophen bestand und in ihrer Arbeit von Nachwuchsengeuren am Institut unterstützt wurde. Bis zu seiner Schließung im Jahr 1974 wurden am B.C.L. mehrere kybernetische Maschinenmodelle konstruiert, darunter ein »künstliches neuronales Netzwerk« mit dem Namen *Adaptive Reorganizing Automaton (ARA)*, die künstliche »Retina« *NumaRete* oder das künstliche »Ohr« *Dynamic Signal Analyzer*.

Gut zehn Jahre nach von Foersterns öffentlicher Vorstellung seines Forschungsprogramms in Namur wird die Begeisterung für künstliche neuronale Hardware bekanntlich durch das vernichtende Urteil der zwei ehemaligen Weggefährten Marvin Minsky und Seymour Papert bezüglich der tatsächlichen Potentiale künstlicher neuronaler Netze jäh unterbrochen [MP69]. Und erst Mitte der achtziger Jahre finden diese im Konnektionismus und in den für die technischen Verhältnisse der sechziger Jahre noch undenkbar großen Speichern und leistungsstarken Prozessoren digitaler Computer als Software-Simulationen ein neues experimentelles Zuhause¹. Aber auch mit Hinblick auf die Tatsache, dass die nachfolgende Computergeschichte spätestens ab 1975 eben gerade als Siegeszug des *seriellen* (Personal-)Computing in Erinnerung bleibt, wirft das kühne Versprechen Heinz von Foersterns bezüglich einer baldigen Verfügbarkeit neuronaler Parallelrechner für jeden Geldbeutel² einige Fragen auf. Warum, so lässt sich fragen, kann Heinz von Foerster an jenem Septembertag in Namur überhaupt von »biologischen Computern« sprechen, so dass die interessierten Konferenzteilnehmer sein Forschungsvorhaben nachvollziehen können und ihn Drittmittelgeber bei der Gründung seines Labors großzügig unterstützen? Und lassen sich in den gut fünfzehn Jahren Laborwirklichkeit des B.C.L. Gründe für das (zumindest vorläufige) Scheitern einer Übersetzung biologischer Strukturen in elektronische Schaltkreise ausmachen?

Beiden Fragen soll im Folgenden nachgespürt werden. Der notwendigerweise kursorische Weg führt dabei von den Ursprüngen des Gehirns-als-Rechner über die Gründung des B.C.L. zu einem abschließenden Blick über die Schulter eines Ingenieurs, der sich an der Konstruktion künstlicher Neuronen versucht. Ein erster Verdacht sei an dieser Stelle vorweggenommen: Der neuralgische Punkt, mit dem das »Biological Computing« zunächst steht und dann vorerst fällt, liegt in dem biotechnischen Vorhaben, technische Artefakte zu konstruieren, die »natürlichen« Phänomenen *tatsächlich* entsprechen sollen,

¹ Tatsächlich hat es wohl nie eine vollständige Unterbrechung der Neural Network-Bewegung gegeben. Die Rede von den so genannten »dark ages of connectionism« hält zumindest Jack D. Cowan für eine Übertreibung: »I don't think it was dark ages at all. There was a lot going on« [AA00, 110].

² Ein kurzer Blick auf den Consumer Price Index (CPI) ergibt übrigens, dass man mit einem 5-Dollar-Schein in den USA der späten fünfziger Jahre Waren erwerben konnte, die im Jahr 2008 etwa 40 Dollar gekostet hätten, also z.B. eine Tankfüllung, fünf Kinokarten oder 20 Hot Dogs. Quelle: www.measuringworth.com.

indem sie diese in ihrer eigenen Maschinenphysiologie realisieren. Mit der Insistenz auf eine prinzipielle Kompatibilität biologischer Funktionen mit technischen Konfigurationen arbeitete sich die Kybernetik, so die vorläufige These, jedoch an einem »epistemologischen Hindernis«³ ab, welches den Erkenntnisprozess zwar ständig in Gang hielt, aber niemals ganz überwunden werden konnte.

2 Rechnendes Gehirn

Eine Möglichkeit Epistemologie zu betreiben, so schreibt der französische Wissenschaftshistoriker Georges Canguilhem, bestehe darin, in die Vergangenheit bis zu dem Zeitpunkt zurückzugehen, an dem die Sprache des Untersuchungsgegenstandes »nicht mehr verstehbar ist oder nicht mehr in eine frühere Sprache übersetzt werden kann« [Ca79, 26]. Im diesem Sinne soll also folgende (etwas entschärfte) Frage an den Anfang gestellt werden: »Zu welcher Zeit und in welchem Kontext wird es möglich, biologische Rechner zu denken bzw. von ihnen zu sprechen«?

Die wichtigste Voraussetzung um »natürliche« Rechenprozesse überhaupt denken zu können, liegt wohl in der Annahme, dass in der Natur, genauer in den zentralen Nervensystemen von Mensch und Tier, auf physiologischer Ebene »gerechnet« wird, dass also durch logische Verknüpfungen »Ordnung« in eine Menge von abzählbaren Objekten (z.B. »Sinnesindrücke«) gebracht wird⁴. Bis in das späte 19. Jahrhundert stellte man sich das Gehirn jedoch nicht als ein komplexes Schaltwerk autarker Neuronen vor, die untereinander diskrete Signale austauschen (all-or-none), sondern als ein zusammenhängendes Geflecht mit durchgängigen Wegen und Kanälen. Die unter dem Mikroskop und mit Hilfe neuer Färbungs- und Sektionsmethoden zwar bereits deutlich identifizierbaren grauen Zellkörper und weißen Fadenwerke wurden als miteinander verbundene Teile eines netzförmigen, aber eben homogenen und ununterbrochenen Gebildes markiert [Pe00, 479]. Vertreter eines solchen »Retikularismus« wie der Erlangerer Anatom Joseph von Gerlach und sein italienischer Kollege Camillo Golgi vermuteten folglich auch, dass die von ihren deutschen Kollegen Emil du Bois-Reymond und Julius Bernstein in der Mitte des Jahrhunderts im Gehirn nachgewiesenen elektrischen Impulse als »Nervenstrom« gleichmäßig durch dessen Kanäle wanderten [Sa03]. Man glaubte zwar, dass diese elektrischen Impulse mit mentalen Leistungen des Gehirns korrelierten, auf welche Art und Weise dies geschah war jedoch völlig unklar. Die Metapher einer elektrischen Maschine drängte sich den ersten Neurobiologen somit bereits auf, vom Bild einer physiologisch implementierten Rechenmaschine war man aber noch weit entfernt. Erst in den letzten zehn Jahren des 19. Jahrhunderts entwickelte sich der Begriff des Neurons als funktionale Elementareinheit des Gehirns und mit ihm das Wissen vom »rechnenden

³ Hans-Jörg Rheinberger erklärt den Begriff des epistemologischen Hindernisses in der Epistemologie des französischen Wissenschaftshistorikers Gaston Bachelards folgendermaßen: »Im Akt des Erkennens selbst, in seinem Innersten, treten in einer Art funktionaler Notwendigkeit Trägheiten und Trübungen auf. Diese Trägheiten und Trübungen gilt es nicht einfach zu überwinden; denn gerade sie halten den Prozess der Erkenntnisgewinnung in Gang« [Rh06, 47].

⁴ Bekanntlich leitet sich das deutsche Wort »rechnen« vom mittelhochdeutschen »rehanon« ab, dass mit »ordnen« bzw. »in Ordnung bringen« übersetzt werden kann.

Gehirn«. So vertrat der spanische Histologe Santiago Ramón y Cajal ab 1889 mit seinen detaillierten Zeichnungen des Nervensystems die These, das Gehirn bestehe aus voneinander unabhängigen »morphologischen Einheiten«, die über ihre Nervenfasern miteinander zwar in einem »sehr intimen Kontakt« standen, aber eben nicht unmittelbar miteinander plasmatisch verbunden waren. Ramón y Cajal sprach von »einem Verhältnis in Kontiguität, aber nicht Kontinuität« [Ra06, 221]. Neurologen und Zellphysiologen der 1890er Jahre wie Wilhelm His, Rudolph Albert von Kölliker und Heinrich Wilhelm von Waldeyer bauten auf Cajals Beschreibungen auf und skizzierten »Dendriten«, »Axon« und »Soma« als die drei wesentlichen Funktionsteile der Elementareinheit des Nervensystems und prägten für diese den Begriff des »Neurons« [Pe00, 479].

Die allmähliche Durchsetzung der »Neuronendoktrin« in den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts warf die Frage nach den »Kontaktstellen« zwischen den voneinander getrennten Neuronen auf⁵. Dabei griff man auf einen Begriff zurück, den der Engländer Charles Scott Sherrington bereits im Jahr 1894 für ein Physiologie-Lehrbuch vorgeschlagen hatte [Sh94]: Jede beliebige Stelle, an denen die Dendriten eines Neurons und der Zellkörper eines anderen Neurons nah genug aufeinander treffen, so Sherrington, könne man funktional als »Synapse« bezeichnen. Obwohl einige Neurohistologen noch bis zur Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts davon ausgingen, dass die Membranen beider Zellen sich an den Synapsen zumindest berührten, beschrieb Sherrington bereits das Bild einer Doppelmembran [Pe00, 481] und zeigte sich überzeugt, dass in eben jenem synaptischen Spalt der Schlüssel zur Regulation der Signaltransmissionen im Nervensystem liege. Sherrington war es auch, der die neue Neuronentheorie mit der Erforschung von muskulären Reflexen bei Säugetieren zusammendachte und die These formulierte, dass inhibitorische und excitatorische Reizübertragungen gleichermaßen für das Verhalten muskulärer Nervensysteme wie für die Reizübertragung an den Synapsen im Gehirn bedeutsam waren [Sm92, 181-190]. Ausgehend von der Untersuchung der Reflexorganisation hatte Sherrington so einen Zugang zu »neuronalen Verrechnungsprinzipien zu gewinnen versucht« [Br97, 271]. Der Brite Edgar D. Adrian schließlich konnte Sherringtons Vermutungen experimentell bestätigen und zeigte darüber hinaus, dass – ähnlich wie für die Muskelphysiologie bereits angenommen wurde – ein Neuron entweder ein Aktionspotential absondert oder aber komplett »still« bleibt. Das als »all-or-none«-Prinzip bekannte Postulat war ein weiterer entscheidender Mosaikstein, der in das Bild vom Gehirn-als-Rechner eingesetzt wurde.

Die molekulare Perspektive auf die einzelnen Nervenzellen als Grundbausteine des Gehirns und die Entdeckung der Leerstellen *zwischen* den Zellen des Gehirns waren es also, die eine Deutung des Gehirns als Schalt- und Rechenwerk überhaupt zuließen: Erst in der »Dimension der Nervenzelle« [Br97, 272] stellt sich die medientheoretische Frage nach Transmission und Kommunikation, erst hier wird es möglich von »Verschaltung«, »Vernetzung« oder »Verrechnungsmechanismen« des Gehirns zu sprechen.

⁵ Im Jahr 1932 fasste Ramón y Cajal alle Argumente der Neuronentheorie noch einmal zusammen. Wie Heinz Penzlin berichtet, war der Streit um die Neuronendoktrin und der »Kampf gegen den »Retikularismus« [...] zu der Zeit praktisch schon gewonnen«, auch wenn die Frage erst im Jahr 1954 mit Hilfe der Elektronenmikroskopie »endgültig entschieden wurde«, die den synaptischen Spalt sichtbar machte [Pe00, 480].

3 AND, OR, NOT

Wie die Kognitionswissenschaftlerin Margaret Boden in ihrem umfangreichen Rückblick auf die Geschichte der Kognitionswissenschaften im 20. Jahrhundert festhält, trifft dieses Wissen vom Neuron als Grundbaustein des Gehirns um 1940 auf einen »logischen Atomismus«, welcher die mentalen Leistungen des menschlichen Gehirns ebenfalls als eine Zusammensetzung elementarer Einheiten, in diesem Fall logischer Operationen, zu beschreiben versucht [Bo06, 169]. Seinen Kulminationspunkt hat dieses Aufeinandertreffen im Jahr 1943 in der Zusammenarbeit des Neurophysiologen Warren McCullochs und des Mathematikers Walter Pitts, die mit Ihrem Aufsatz »A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity« die Grundlagen für ein hypothetisches Modell der Gehirntätigkeit als funktionales Netzwerk von formalisierten Neuronen ausgearbeitet haben [MP04]. McCulloch hatte sich bereits während seiner experimentellen Forschung im Labor des holländischen Physiologen Dusser de Barenne in den dreißiger Jahren an der Yale University Medical School damit beschäftigt, die »funktionalen Bahnen im Cortex – die Wege auf denen die Impulse durch das Gehirn reisen« zu kartographieren [He91, 34]. Inspiriert von Leibniz' Kalkül für eine symbolische Logik und der mathematischen Aussagenlogik Bertrand Russells und Alfred North Whiteheads [RW10] suchte der Amerikaner McCulloch nach einer Möglichkeit, das beobachtete Verhalten der Nervenbahnen im Gehirn mit den basalen Elementen der Aussagenlogik zusammenzuführen. Um dies zu erreichen nahm McCulloch einen »einfachsten psychischen Vorgang« an, welchen er »Psychon« nannte und der für die Wissenschaft vom Gehirn das leisten sollte, was »ein Atom für die Chemie ist oder ein Gen für die Genetik«, allerdings nicht als kleinstes unteilbares Objekt, sondern als »ein kleinstes Ereignis« [Mc61, 234]. Die physiologische Entsprechung des »Psychons« fand McCulloch schließlich in dem neurophysiologischen Wissen vom Neuron als funktionale Einheit des Gehirns: »In jenen Tagen waren die neuronale Hypothese von Ramón y Cajal und das Alles-oder-nichts-Gesetz axonaler Impulse relativ neu und ungewöhnlich, aber ich war überglücklich, in ihnen einige Verkörperungen von Psychonen zu finden« [Mc00, 235].

Tatsächlich gingen Warren McCulloch und sein junger Kollege Walter Pitts einige Jahre später bei der Ausarbeitung ihres berühmten Kalküls zur Formalisierung neuronaler Netze von »bestimmten grundsätzlichen Annahmen« über das Nervensystem aus, welche sie der zeitgenössischen Neurophysiologie entnahmen [MP04, 313]. Ihre Idee war, dass wenn ein Neuron tatsächlich als eine autonome Einrichtung zur Ausführung elementarster logischer Operationen beschrieben werden konnte, »ein wirkliches Nervensystem jede Zahl berechnen kann, die eine Turingmaschine mit einer festen Länge des Papierstreifens berechnen kann« [Mc00, 235]. Die physiologische Beschreibung des Neurons als autonome, informationsverarbeitende Elementareinheit des Gehirns und die Annahme, dass das Neuron genau zwei Zustände annehmen konnte (Aktionspotential oder kein Aktionspotential), ermutigte McCulloch und Pitts physiologische Neuronen als digitale on-off-Vorrichtungen mit mehreren Eingängen und einem Ausgang zu idealisieren. Berücksichtigte man nun noch die Annahme, dass Neuronen durch letzteren »Output-Kanal« (der sich weiter verzweigen kann) andere Neuronen entweder erregen können, bis deren Schwellenwert überschritten wird (Excitation) oder diese hemmen, so dass der Schwellenwert nicht überschritten wird (Inhibition), ließ sich ein hypothetisches Netz-

werke aus formalisierten Neuronen konstruieren, mit denen man logische Operationen darstellen konnte: »Zu jeder Reaktion eines Neurons«, so argumentierten sie, »gibt es eine korrespondierende Äußerung einer simplen Aussage« [MP04, 314]. Einfach gesagt⁶, ließen sich durch die Summation mehrerer eingehender, excitatorischer Signale an einem Zellkörper die Funktionen wie »Konjunktion« (*AND*) oder »Disjunktion« (*OR*) ausdrücken. Die Übernahme des biologischen Prinzips der Inhibition ermöglichte außerdem die Artikulierung der »Negation« (*NOT*). Damit konnten alle drei wesentlichen logischen Operatoren der booleschen Algebra mit Hilfe formaler Neuronen artikuliert werden. Da der spätere Begründer der Informationstheorie Claude Shannon bekanntlich eben jene boolesche Algebra unlängst für die Konstruktion elektrischer Schaltkreise empfohlen hatte, war der Schritt zur elektrotechnischen Implementierung neuronaler Netze schließlich nur noch eine Frage der Zeit [Sh40].

Es ist oft genug darauf hingewiesen worden, dass es sich bei den neuronalen Netzwerken von McCulloch und Pitts um höchst abstrakte Modelle handelt, und nicht etwa um »wahre Beschreibungen bekannter Netzwerke« [Ab02, 21]. In der Tat haben die Autoren des Artikels selbst hervorgehoben, dass man die funktionale Äquivalenz ihres Modells mit tatsächlichen Nervennetzen nicht als »faktische Erklärung« missverstehen dürfe [MP04, 314]. Und tatsächlich führte eben die Loslösung von der Wetware durch die Transkription der Interaktion zwischen physiologischen Neuronen in eine *universale* Logik zu jener Hardware-Kompatibilität, wie sie für das »kybernetische Dispositiv« charakteristisch ist [Ha06, 202-203]. Gerade in der Generalisierung neurophysiologischer Prozesse konnten McCulloch und Pitts zu dem von Lily Kay so bezeichneten »neuen Bedeutungsregime« der Kybernetik beitragen [Ka04]. Man könnte also guten Gewissens zustimmen, wenn Michel Serres fast fünfzig Jahre nach dem Erscheinen des Artikels feststellt:

Formale Neuronen verhalten sich zu biologischen wie die Pferdestärke zum Pferd und der Raupenschlepper zur Raupe, das heißt, sie sind eine Metapher, die von der Natur ausgeht und eine technische Vorrichtung bezeichnet. Formale Neuronen haben daher mit den biologischen nicht mehr zu tun als moderne Autos trotz ihrer vielen Pferdestärken mit einem Pferd oder die Antriebsketten eines Schleppers oder eines Panzers mit einer Raupe [Se01, 652].

Man *könnte* zustimmen, wäre da nicht der Umstand, dass trotz aller Betonung von Abstraktion und Vereinfachung die betroffenen Akteure letztendlich immer wieder auf die Repräsentativität ihrer Modelle zurückkommen. So werden Intelligenz und Körper von Warren McCulloch durchaus noch zusammengedacht: »Die postulierten Neuronen sind bei aller Übereinfachung immer noch physikalische Neuronen, ebenso, wie die Atome der Physiker physikalische Atome sind« [Mc00, 235]. Und wie wir im Folgenden sehen werden, bricht das hintergründige epistemologische Phantasma einer tatsächlichen Entsprechung zwischen technischen und biologischen Systemen auch in der kybernetischen Laborpraxis an Heinz von Foersterns Biological Computer Laboratory immer wieder hervor.

⁶ Diese Vereinfachung ist notwendig, da Walter Pitts und Warren McCulloch für ihr Aussagekalkül die komplizierte Syntax von Rudolf Carnap verwendeten – was McCulloch später bedauerte [Bo, 193].

4 Das Biological Computer Laboratory

Als Heinz von Foerster das Biological Computer Laboratory im Jahr 1958 gründete, war er bereits seit über acht Jahren als Professor am Department of Electrical Engineering der University of Illinois in Urbana-Champaign beschäftigt [BF02, 211-294]. Kurz nachdem er im Jahr 1949 in die USA immigrierte, hatte der Österreicher die Bekanntschaft mit Warren McCulloch gemacht, der ihm nicht nur zu seiner Anstellung als Leiter der *Electron Tube Research Laboratory* in Urbana-Champaign verhalf, sondern ihn auch mit einer interdisziplinären Gruppe von Wissenschaftlern bekannt machte, die sich seit 1946 regelmäßig in New York City zu Gesprächen traf, um sich dort mit »zirkulären Kausalitäten und Feedbackmechanismen in biologischen und sozialen Systemen« zu beschäftigen [He91, 18]. Die Teilnehmer der *Macy-Konferenzen* stellten ihre eigenen Theorien, experimentellen Ergebnisse oder selbstgebaute Maschinenmodelle regelmäßig zur Diskussion und versuchten, durch die umfassende Herangehensweise der Kybernetik, die verschiedensten Felder wissenschaftlicher Forschung zusammenzubringen [Pi04, 10]. Eines der am kontroversesten diskutierten Themen, mit denen sich die *Macy Group* in New York regelmäßig beschäftigte, war dabei eben jene von Warren McCulloch und Walter Pitts aufgeworfene Frage, ob sich ein logisches Kalkül finden lässt, mit dem man Struktur und Funktionalität des Gehirns adäquat beschreiben und welches als Blaupause für mögliche Computerarchitekturen dienen kann. Claus Pias hat die Grabenkämpfe, die auf den Macy-Konferenzen leidenschaftlich ausgefochten wurden (z.B. um digitale vs. analoge Rechnerarchitekturen), ausführlich dargestellt [Pi04a].

Heinz von Foerster war nicht nur regelmäßiger Teilnehmer der Macy-Konferenzen, sondern wurde bald zum Herausgeber der Sitzungsprotokolle ernannt [Fo, 04]. Die intensive Auseinandersetzung mit den Beiträgen der ersten Kybernetiker-Generation wie Norbert Wiener, Claude Shannon oder John von Neumann ließ in dem Physiker dabei das Bedürfnis entstehen, seine Kenntnisse in Mathematik und Physik um die Grundlagen zeitgenössischer Neurobiologie, Physiologie und allgemeiner Biologie zu komplettieren [BF02]. Mit einem Stipendium der *Guggenheim Foundation* verbrachte von Foerster im Jahr 1956 ein Forschungssemester am M.I.T. bei Warren McCulloch und in Mexico City bei Arthuro Rosenbluth, um ein Jahr später mit den Plänen für ein biokybernetisches Labor nach Urbana-Champaign zurückzukehren.

In der Folge bemühte sich der Österreicher darum, potentielle Sponsoren für seine »biologischen Computer« zu begeistern. Bereits im September 1957 traf sich Heinz von Foerster mit Marshall C. Yovits, dem Direktor des *Information Systems Branch* des *Office of Naval Research (O.N.R.)* in Washington und informierte diesen über seinen Plan einen Initiativantrag auszuarbeiten, um eine Forschungsgruppe zusammenzustellen, »die Systeme mit »quasi-biologischer« Komplexität untersuchen sollte«⁷. Der angekündigte Forschungsantrag für ein einjähriges Pilotprojekt erreichte das O.N.R. am 17. Dezember und Heinz von Foerster wurde zum 1. Januar 1958 damit beauftragt eine For-

⁷ Heinz von Foerster: Letter to Marshall C. Yovits (Office of Naval Research). 1957/11/13, UoI Archives, 11/6/17, Box 2 Folder 9 (007).

schungsgruppe einzurichten, die sich der Erforschung von »Biological Type Computers« widmen sollte⁸.

Auch wenn Heinz von Foerster mit seinem »Biological-Computer«-Konzept auf Anhieb erfolgreich war, äußerte er sich gegenüber seinen Geldgebern zunächst eher vage bezüglich der konkreten Forschungsarbeit, die an seinem Labor durchgeführt werden sollte. So nannte der erste Forschungsantrag lediglich das unscharfe Ziel der »Realisierung »biologischer Computer««, sowie einen ungefähren dreigleisigen »Fahrplan«, wie dieses Ziel zu erreichen sei: Ein erstes Etappenziel war die Untersuchung »des logischen und physischen Aufbaus der Komponenten (Elemente)«, das zweite bestand in der Erforschung der »Organisation des Systems«, das dritte schließlich umfasste die Beantwortung der Frage, wie sich aufgrund einer »Evaluierung der Forschungsziele (1) und (2)« künstliche Systeme konstruieren ließen⁹. Auch bei der Präsentation seines geplanten Forschungslabors äußerte von Foerster sich nur wenig klarer über sein Vorhaben:

“We would like to set up a system which is composed of complex elements which in itself are not too highly reliable but are organized – or organizing themselves – in such a fashion that the system as a whole will display with reasonable reliability some traces of intelligence. By ‘intelligence’ I mean some degree of abstraction, recognition, learning and adaptation [Fo58, 241].

Über diese unscharfe Formulierung des Forschungsziels hinaus bestand von Foersters Konzept eher aus einer Liste von konventionellen Eigenschaften, die seine »biologischen Computer« *nicht* haben sollten: Biologische Computer bestünden nicht aus spezialisierten Subsystemen und ihr intelligentes Verhalten sollte nicht als Effekt endloser numerischer Operationen realisiert werden. Tatsächlich wurde der Begriff »biologischer Computer« in seiner ganzen Suggestivität und Unschärfe von Heinz von Foerster überaus geschickt gewählt, konnte er in seiner Zweideutigkeit doch sowohl auf ein anwendungsorientiertes Forschungsprogramm, als auch auf die Notwendigkeit ergebnisoffener Grundlagenforschung verweisen. So führte das Versprechen »biologischer Computer« zum einen die spätestens seit den *Macy-Konferenzen* geführten Spekulationen fort, man könne das Wissen über die Funktionsweisen des Gehirns nutzen um »bessere«, weil »natürliche« Computerarchitekturen zu entwerfen. Zum anderen sind mit »biologischen Computern« jedoch auch die in der Natur bereits existierenden »Rechensysteme« wie Gehirn, Wahrnehmungsorgane oder Bewegungsapparat gemeint, die erst einmal untersucht und verstanden werden müssen, bevor sich das Wissen über diese »Living Prototypes« in technischen Systemen implementieren lässt. Gegenüber dem ersten großen Geldgeber des B.C.L., dem Office of Naval Research, konnte von Foerster so auf der einen Seite Hoffnungen auf eine zukünftige Computertechnologie wecken und gleichzeitig die Notwendigkeit breiter, experimenteller und theoretischer Forschung durchsetzen.

⁸ Marshall Yovits (Office of Naval Research): Letter to Heinz von Foerster. 1957/12/30, UoI Archives, 11/6/17, Box 2 Folder 9 (007).

⁹ Von Foerster, Heinz: Proposed One Year Pilot Investigation Toward the Realization of Biological Computers“, 1957/12/11, UoI Archives, 11/6/17, Box 2 Folder 2 (011).

5 Der »Adaptive Reorganizing Automaton«

Der erste »biologische Computer«, der an Heinz von Foersters neuem Labor hergestellt wurde, trug den Namen *Adaptive Reorganizing Automaton* (A.R.A.) und entstand im Rahmen der Doktorarbeit des späteren B.C.L.-Assistenzprofessors Murray Babcock. Geboren in Wyoming, Illinois hatte Babcock bereits sein Studium am Department of Electrical Engineering an der University of Illinois in Urbana-Champaign absolviert. Im Unterschied zu anderen Kybernetikern seiner Zeit, die sich mit der Konstruktion künstlicher Gehirne befassten, war Babcock ausgebildeter Ingenieur und musste sich stattdessen sein neurophysiologisches Wissen mühsam im Selbststudium aneignen¹⁰.

Babcocks Vorhaben bestand darin, einen Automaten zu entwerfen, der sich das zeitgenössische »begrenzte Wissen über das Nervengewebe lebendiger Organismen zum Vorbild« nahm [Ba60, iii]. Das Alleinstellungsmerkmal biologischer Systeme, so Babcock, bestehe dabei in der Fähigkeit der »Adaptation und Selbstorganisation«, welche er sich unter Berufung auf die »Pionierarbeit von Claude Bernard, Norbert Wiener, Warren McCulloch und anderen« als Effekt einer »Feedbackschleife« vorstellte, die als »Informationsfluss« beschrieben werden kann, welcher »aus der Umwelt durch das System und dann zurück in die Umwelt strömt, so dass das System durch die eigene Aktivität Kenntnis über seinen Zustand erhält« [Ba60, 1].

Um sein Ziel zu erreichen, konstruierte Babcock einen komplexen elektrischen Schaltkreis, welcher »aus vielen elementaren Komponenten bestand, die im Wesentlichen funktional identisch sind und die man als »künstliche Neuronen« bezeichnen kann« [Ba60, 23-24]. Die künstlichen Neuronen »kommunizierten« untereinander über elektrische Impulse und sollten durch variable Durchgangselemente so miteinander verbunden sein, dass sich »bevorzugte Informationswege« innerhalb des Netzwerks herausbilden konnten und der Zustand des Automaten von seiner eigenen »Stimuli-Vergangenheit« abhing [Ba60, 22]. Diese aktive Herausbildung von bevorzugten »Informationswegen« wurde von Babcock als »adaptive Antwort« des ganzen Systems auf ein gegebenes Eingangssignal aus der »Umwelt« des Automaten interpretiert. Der Output dieses Systems bestand aus der »Beobachtung« dieser Aktivität durch ein zweites identisches neuronales Netzwerk, dessen künstliche Neuronen »untereinander und mit dem ersten Automaten« auf die gleiche Art und Weise »informationell verbunden waren«. Wenn nun das zweite System als Resultat seiner Beobachtung des ersten Systems dessen Eingangssignal (also dessen »Umwelt«) verändert, so Babcock weiter, könne man die »Gesamtheit aus erstem und zweitem System als einen sich selbst erkennenden, adaptiven Automaten bezeichnen« [Ba60, 46-47]. Dem Operator bzw. Experimentator, der mit dem A.R.A. arbeiten sollte, kommt nunmehr die Aufgabe zu, das Verhalten der künstlichen Neuronen und Synapsen über 30 »Anzeigeröhren« abzulesen (Abb.1, drittes Modul von oben) und gegebenenfalls die Verschaltung und inneren Widerstände der einzelnen Neuronen zu verändern, um neue Verhaltensmuster zu erzeugen (Abb.1, Rückansicht).

¹⁰ Im Gegensatz etwa zu Ross Ashby und Grey Walter, die sich der Elektrotechnik als Psychologen respektive Neurophysiologen bedienten, um ihre theoretischen Überlegungen zur Architektur des Gehirns zu veranschaulichen.

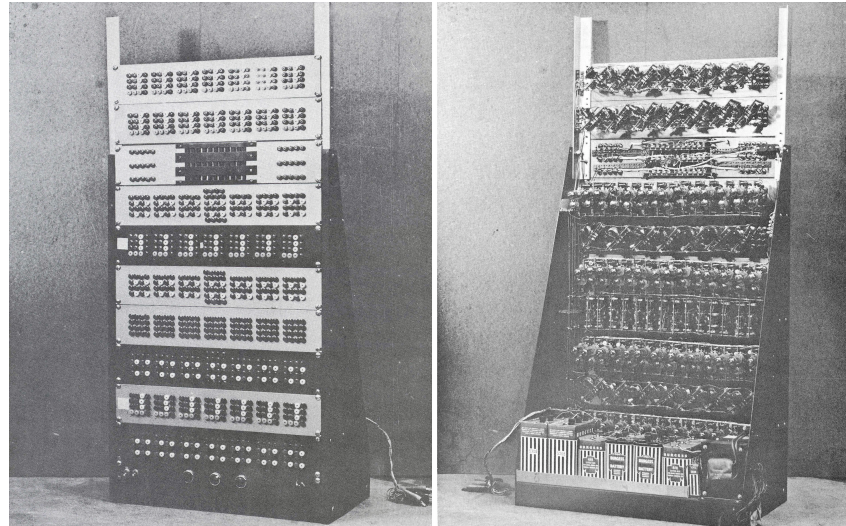


Abb. 1: Front- und Rückansicht des Adaptive Reorganizing Automaton [Ba60, 97-98], mit freundlicher Genehmigung der University of Illinois Archives.

Bei der Durchführung seines Vorhabens beschäftigte sich Murray Babcock nun vor allem mit der Frage, wie es ihm gelingen konnte, ein System zu entwickeln, von dem sich später behaupten ließe, es verhalte sich erstens *tatsächlich* adaptiv und besäße zweitens »einige der strukturellen und funktionalen Eigenschaften von Nervengewebe« [Ba60,iii]. Ein erstes Problem, mit dem Babcock sich dabei konfrontiert sah, war die Wahl einer adäquaten Methode, um den Wissenstransfer aus der Biologie in das technische System zu bewerkstelligen. Für den Ingenieur boten sich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen an:

One is the definition and determination of systems goals and the resultant system synthesis using the definition as guides. The other is the construction of a system using elementary components of extreme informational flexibility and the resultant analysis of that system. The former is the approach of going from the general system to the specific component whereas the latter is the approach of going from the general component to the specific system [Ba60, 25].

Die Vor- und Nachteile der *Top-Down*- und *Bottom-Up*-Methode wurden von Babcock sorgfältig gegeneinander aufgewogen. Auf den ersten Blick erschien es sinnvoll eine Methode zu wählen, der ein vorher festgelegter Begriff von Adaptation zu Grunde liegt (*Top-Down*). Die künstlichen Neuronen, so Babcock, könne man anschließend gemäß dieser Begriffsdefinition so konstruieren und zusammensetzen, dass sie als Kollektiv das gewünschte Verhalten aufweisen. Da das Systemziel also bekannt bzw. das theoretische Wissen über Adaptation vorausgesetzt werden kann, bestehe die Aufgabe für den Ingenieur lediglich in der Synthese des Automaten. Für Babcock hatte diese Methode aber zwei entscheidende Nachteile: Zum einen wusste er aus seiner langjährigen Erfahrung als Elektroingenieur, dass die Anwendung theoretischer Konzepte auf materielle Komponenten und Schaltkreise »sicherlich niemals ein geradliniger Prozess ist« [Ba60, 26].

Zum anderen hielt Babcock die Annahme, man könne »die Systemziele apriori vorher festlegen, um dann ein adaptives System zu erhalten«, für überaus problematisch [Ba60, 26]. Wie Babcock richtigerweise feststellt, handelt es sich bei einem Automaten, der auf eine erwartbare Umweltsituation in einer vorhersehbaren Art und Weise reagieren wird, nicht um einen wirklich adaptiven Automaten, sondern um ein System, welches »davon abhängt, wie sein Konstrukteur die Begriffe Informationstheorie, Logik, Physiologie, Intuition, etc. verwendet« [Ba60, 26]. Der Bottom-Up-Ansatz schien einen Ausweg aus diesem Dilemma zu bieten: Anstatt das Systemziel vorher zu definieren, beginnt der Ingenieur hier mit der Konstruktion »extrem informationell flexibler Komponenten« und erst in einem zweiten Schritt werden diese Grundbausteine zu einem spezifischen System zusammengesetzt [Ba60, 27]. Das wichtigste Argument für eine solche Vorgehensweise war ein epistemologisches:

If the elementary components are made as flexible as the biological neurons then the existence of the biological system can be used as an existence proof that an adaptive system can be constructed from the flexible elementary components [Ba60, 27].

Entscheidet sich der Ingenieur also für die Bottom-Up-Methode, so muss er sich nicht vorab mit einer theoretischen Definition von »Adaptivität« befassen. Seine Aufgabe besteht vielmehr darin, eine funktionale Einheit zu konstruieren, die so flexibel arbeitet wie das »natürliche« Neuron. Dabei hat der Ingenieur, so Babcock, »alle Hilfe der aufgezzeichneten Forschungsergebnisse aus den verschiedenen Bereichen der biologischen Forschung, um die benötigte Flexibilität zu bestimmen« [Ba60, 27]. Hat er dieses Ziel erreicht und aus seinen künstlichen Neuronen ein beliebiges System zusammengefügt, muss er dieses »nur« noch »analysieren und feststellen, ob sich dieses adaptiv verhält« [Ba60, 27]. Wie sich der Ingenieur selbst eingesteht, liegt jedoch auch in dieser Vorgehensweise ein fundamentaler Denkfehler: Was, wenn das zeitgenössische Wissen über die Physiologie des Neurons sich als nicht vollständig oder gar falsch herausstellt?

There may be certain features about the neuron which are not presently suspected which contribute appreciably to the functioning of the system. In the final analysis then, this latter approach also depends a good deal upon the designer's use of logic and intuition for its design [Ba60, 28].

Beide Vorgehensweisen haben also aus der Sicht Babcocks schwerwiegende Auswirkungen auf die Repräsentativität des späteren Automaten und lassen das Projekt einer reibungslosen Anwendbarkeit biologischen Wissens auf technische Systeme fragwürdig erscheinen. Unfähig diesem Dilemma zu entweichen, entscheidet sich Babcock für eine Kombination beider Methoden, von der er sich erhofft ein System zu konstruieren, dass zumindest »in einem begrenzten Maße Adaptivität aufweist« [Ba60, 28]. Bei der Konstruktion des A.R.A. erwartete Babcock demnach von sich sowohl ein gewisses forschungsleitendes Verständnis des erwünschten adaptiven Verhaltens, als auch eine möglichst hohe strukturelle wie funktionale Übereinstimmung seiner elektrotechnischen Neuronen mit deren biologischen Prototypen.

Um letzteres Ziel zu erreichen setzte sich Babcock intensiv mit der zeitgenössischen Neurobiologie auseinander, darunter vor allem mit den Arbeiten von Warren McCulloch

[WP43], John Carew Eccles [Ec53] und F.A. Hayek [Ha52]. Was er in der Literatur vorfand, war eine präzise und bereits hoch schematisierte Beschreibung des Neurons »als funktionale Einheit des Gehirns, die einen Pulscode als Ausgangssignal verwendete und ein Alles-oder-Nichts-Apparat darstellte«. Dieser antwortete nicht auf jedes Eingangssignal, sondern auf eine zeitliche und räumliche Summation von mehreren exhibitorischen oder inhibitorischen Signalen, die seinen Zellkörper erreichten [Ba60, 20-21]. Um dieses komplexe Verhalten zu modellieren, verteilte Babcock die Funktionalität des Neurons auf drei elementare Komponenten: Der von ihm so genannte *energy transducer* war im Wesentlichen die technische Realisierung einer McCulloch-Pitts-Zelle, bestehend aus einem Eingangselement (»summer unit«) und einem Ausgangselement (»puls unit«) mit einem bestimmten Widerstand (»threshold«), der bei jedem dieser »künstlichen Neuronen« manuell eingestellt werden konnte [Ba60, 72-78]. Die größere Herausforderung hingegen stellte die Konstruktion jener variabler Verbindungselemente dar, welche zwischen den künstlichen Neuronen »vermittelten« und die Funktion der »Synapse« übernehmen sollten. Wie Babcock feststellte, war dieses Bauteil die Schlüsselstelle des selbstorganisierenden Systems, »denn es ist dieses Element, das dem Automaten die Fähigkeit zur Adaptivität verleiht, im Sinne einer Anpassung an seine Umwelt auf der Basis des Wissens um seine vergangenen Aktivität« [Ba60, 78]. Der von Babcock so genannte *facilitator* (Abb. 2), der diese Aufgabe übernehmen sollte, enthielt eine Speichereinheit, welche Informationen über die Gesamtzahl aller durch ihn geleiteten Impulse über einen bestimmten Zeitraum sammelte: »Im Grunde handelt es sich um einen Pulszähler« [Ba60, 80]. Auf der Grundlage der so gewonnenen Durchgangszahl veranlasste die Speichereinheit des *facilitator* einen Verstärker (»amplifier unit«) dazu, die Frequenz des Ausgangssignals zu steigern, so dass eine häufige Nutzung der jeweiligen »Synapse« ein immer stärker werdendes Ausgangssignal zur Folge hatte. Ein drittes Element mit dem Namen *autonomous component* sorgte schließlich dafür, dass der Automat niemals vollständig zur Ruhe kam, sondern Impulse abgab, sobald ein Sensor feststellte, dass der Automat über einen gewissen Zeitraum inaktiv war.

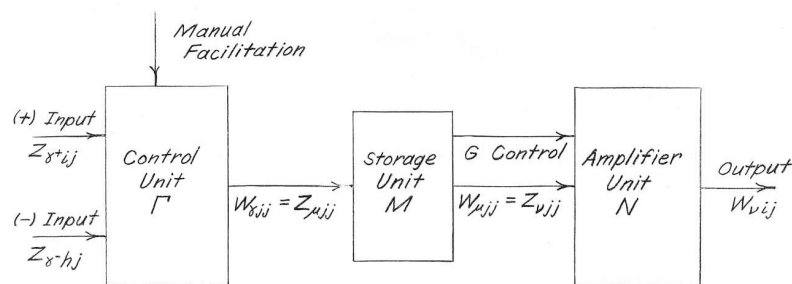


Abb. 2: Schaltplan der *Facilitator*-Einheit des Adaptive Reorganizing Automaton [Ba60, 97-98], mit freundlicher Genehmigung der University of Illinois Archives.

6 Biological Computers Don't Come in Boxes Yet!

Der Vertrag »Towards the Realization of Biological Computers« mit dem *Office of Naval Research*, durch den Babcocks frühe Arbeit finanziert werden konnte, wurde mehrfach verlängert und ermöglichte einen Großteil der Forschungsarbeit in den Anfangsjahren des Biological Computer Laboratory. Im Juli 1961 jedoch informierte der neue Commander des *O.N.R. Information Systems Department* Vance R. Vanner Heinz von Foerster, dass eine weitere Verlängerung des Vertrags nur bei deutlicher Reduzierung der Bezüge möglich sei. Zum einen, so erklärte Vanner, habe seine Abteilung zurzeit weitaus weniger finanzielle Mittel zur Verfügung als in den Jahren zuvor. Darüber hinaus äußerte der Funktionär jedoch auch grundsätzliche Bedenken bezüglich der Legitimität der Foersterschen Forschungsprogrammatik. Mit seiner Kritik zielte Vance Vanner dabei genau in das epistemologische Herz des kybernetischen Paradigmas:

You have stated 'We do not want to build a system composed of subsystems to which subtasks are assigned...' To me, admittedly not a learned student of cybernetics, this seems to be a case of *post hoc ergo propter hoc logic*. For one thing, I do not believe that it has been definitely established that the human brain is not specialized into subtasks; moreover, even if it were I still have reservations as to the validity of a direct translation of the biological specimen to the physical device. Is it reasonable?¹¹

Vanner spricht hier ein epistemologisches Misstrauen aus, das bei jedem biotechnischen Vorhaben stets in der Luft liegt. Hinter der bionischen Argumentationsweise vermutet er nichts anderes als einen logischen Fehlschluss: Die Entdeckung unspezialisierter, distribuerter Schaltelemente im Gehirn wäre demnach nicht etwa ein »Existenzbeweis« für künftige »biologische« Computerarchitekturen, sondern eher die *Wirkung* eines logischen wie technischen Atomismus der in der Natur findet, was er immer schon sucht. Und selbst wenn sich gesicherte Aussagen über eine bestimmte Struktur oder Funktionalität eines biologischen Systems treffen ließen: Ist es aus ingenieurswissenschaftlicher Perspektive tatsächlich »sinnvoll« anzunehmen, man könne diese in technische Systeme übersetzen?

Murray Babcocks Auseinandersetzung mit der prekären Frage der Repräsentativität seines »biologischen Computers« bei gleichzeitiger Rückversicherung auf real existierende natürliche adaptive Systeme zeigt eindrucksvoll wie der Versuch eine »biologische(re)« Technik zu realisieren ständig an Grenzen gerät und notwendigerweise scheitern muss. Dem Dilemma, sich zwischen dem unvollständigen Wissen der Biologie und der kulturellen Voreingenommenheit einer theoriebeladenen Kybernetik entscheiden zu müssen, kann der Ingenieur nicht entgehen: Er arbeitet fortwährend im Möglichkeitsraum des Kompromisses. Allerdings, und auch das wird am Beispiel seines Adaptive Reorganizing Automaton mehr als deutlich, erweist sich gerade das Abarbeiten an diesem epistemologischen Hindernis als ein ständiger Motor seines Forscherdrangs.

¹¹ Vance R. Vanner (Information Systems Branch, Office of Naval Research): Letter to Heinz von Foerster. 1961/07/07, UoI Archives, 11/6/17, Box 2 Folder 2 (013)

Und auch Heinz von Foerster ließ sich von Vanners Bedenken bezüglich offensichtlicher Übersetzungsschwierigkeiten von der Biologie zur Technik kaum irritieren. Mit dem *Office of Scientific Research* der *Air Force* und der *National Science Foundation* standen andere Sponsoren bereits bereit und trotz gelegentlicher finanzieller Engpässe sollte die Forschung am B.C.L. noch bis in die frühen siebziger Jahre weitergehen. Viel eher lässt sich wohl sagen, dass die Zweideutigkeit der ›Biological Computer‹-Metapher und die unscharfe Formulierung der Forschungsziele für von Foersters Vorhaben ein konstitutives Element darstellt. So wird die Enttäuschung über noch nicht existierende biologische Computer *out of the box* in seinem kybernetischen Programm immer schon antizipiert:

Trying to find his way through the Research Laboratory of the Department of Electrical Engineering, the occasional visitor will [...] come to a sign that reads: 'Biological Computer Laboratory'. On first thought he may wonder why the biologists or – perhaps – the computer people could get space in these other wise crammed quarters. On second thought, however, he may ask himself 'What are these Biological Computers anyway?' And that is a good question indeed. Following his curiosity he will soon find out that there is a group of people working enthusiastically on a variety of problems, but – to his disappointment – he will not find a big box which is *the* Biological Computer. Instead, he will be advised that these computers do not come in boxes yet, but they can be found almost everywhere crawling and jumping around on two, four, six and even thousand legs...¹²

7 Literaturverzeichnis

- [Ab02] Abraham, T.: (Physio)Logical Circuits: The Intellectual Origins of the McCulloch-Pitts Neural Networks. In *Journal of the History of the Behavioral Sciences* 38, Nr. 1, 2002; S. 3-25.
- [AR00] Anderson, J. A., Rosenfeld, E.: *Talking Nets. An Oral History of Neural Networks*, MIT Press, Cambridge, London, 2000.
- [As07] Asaro, P.: Heinz von Foerster and the Bio-Computing Movements. In (Müller, A.; Müller, K. Hrsg.): *An Unfinished Revolution? Heinz von Foerster and the Biological Computer Laboratory B.C.L. 1958-1976*, Edition Echoraum, Wien 2007; S. 255-275.
- [Ba60] Babcock, Murray Lewis: *Reorganization by Adaptive Automation*. Urbana, Illinois: Technical Report No. 1.1, Electrical Engineering Research Laboratory/Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1960.
- [BF02] Bröcker, Monika, von Foerster, Heinz: *Teil der Welt. Fraktale einer Ethik - oder Heinz von Foersterns Tanz mit der Welt*, Carl-Auer, Heidelberg, 2002.
- [Bo06] Boden, M. A.: *Mind as machine: a history of cognitive science*. Clarendon Press, Oxford, 2006.
- [Br97] Breidbach, Olaf: *Die Materialisierung des Ichs: zur Geschichte der Hirnforschung im 19. und 20. Jahrhundert*, Suhrkamp, Frankfurt a. M., 1997.
- [Ca79] Canguilhem, G.: *Der Gegenstand der Wissenschaftsgeschichte*. In (Lepenes, W. Hrsg.): *Wissenschaftsgeschichte und Epistemologie: gesammelte Aufsätze*. Suhrkamp, Frankfurt

¹² von Foerster, Heinz: "Letter to Mr. Kingery", Nov 13 1960, 11/6/17 Box 2 Folder 2.

- a. M, 1979; S. 22-37.
- [Ec53] Eccles, J. C.: The Neurophysiological Basis of Mind. The Principles of Neurophysiology, The Clarendon Press, Oxford, 1953.
- [Fo04] von Foerster, Heinz: Erinnerungen an die Macy-Konferenzen und die Gründung des Biological Computer Laboratory. In (Pias, C. Hrsg.): *Cybernetics-Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953 Vol II: Essays und Dokumente*, diaphenes, Zürich, Berlin, 2004; S. 43-64.
- [Fo58] Foerster, H. v.: Some Aspects in the Design of Biological Computers. In (Association International de Cybernetique Hrsg.): The 2nd International Congress on Cybernetics, Namur, 1958; S. 240-255.
- [Ha06] Hagner, M.: Bilder der Kybernetik: Diagramm und Anthropologie, Schaltung und Nervensystem. In (ders. Hrsg.): Der Geist bei der Arbeit. Historische Untersuchungen zur Hirnforschung, Wallstein, Göttingen, 2006; S. 198-221.
- [Ha52] Hayek, F.A.: The Sensory Order, University of Chicago Press, Chicago, 1952.
- [He91] Heims, S. J.: Constructing a Social Science for Postwar America. The Cybernetics Group, MIT Press, Cambridge, Mass., 1991.
- [Ka01] Kay, Lily: From Logical Neurons to Poetic Embodiments of Mind: Warren McCullochs Project in Neuroscience. In Science in Context 14, Nr. 4, 2001; S. 591-614.
- [Mc00] McCulloch, Warren S.: Verkörperungen des Geistes. Wien, New York: Springer, Wien, New York, 2000.
- [MP04] McCulloch, W. S.; Pitts, W.: Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. In (Pias, C. Hrsg.): *Cybernetics-Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953 Vol. II: Essays und Dokumente*, diaphanes, Zürich, Berlin, 2004; S. 313-332.
- [MP69] Minsky, M.; Papert, S.: Perceptrons: an introduction to computational geometry, MIT Press, Cambridge MA, 1969.
- [Pe00] Penzlin, H.: Die vergleichende Tierphysiologie. In (Jahn, I. Hrsg.): Geschichte der Biologie. Theorien, Methoden, Institutionen, Kurzbiographien. Spektrum, Heidelberg, Berlin, 2000; S. 461-498.
- [Pi04a] Pias, Claus: Elektronengehirn und Verbotene Zone. Zur kybernetischen Ökonomie des Digitalen. In: (Schröter, J., Böhnke, A. Hrsg.): Analog /Digital - Opposition oder Kontinuum? Zur Theorie und Geschichte einer Unterscheidung, transcript, Bielefeld, 2004; S. 295-309.
- [Pi04b] Pias, Claus: Zeit der Kybernetik. Eine Einstimmung. In (ders. Hrsg.): *Cybernetics-Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953 Vol II: Essays und Dokumente*, diaphanes, Zürich, Berlin, 2004; S. 9-41.
- [Ra06] Ramón y Cajal, S.: The structure and connexions of neurons. Nobel Lecture, 1906. http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1906/cajal-lecture.pdf (24/06/09).
- [Ra33] Ramón y Cajal, S.: Neuronismo o reticularismo. Arch. De Neurobiol., 13; S. 1-144.
- [Rh06] Rheinberger, H.-J.: Epistemologie des Konkreten. Studien zur Geschichte der modernen Biologie, suhrkamp, Frankfurt a. Main, 2006.
- [Sa03] Sabbatini, R., Neurons and Synapses: The History of Its Discovery. In: Brain & Mind Magazine, 2003.
- [Se01] Serres, M., Farouki, N.: Thesaurus der exakten Wissenschaften. Zweitausendeins, Frankfurt a. Main: Zweitausendeins 2001.
- [Sh94] Sherrington, C. S.: The Central Nervous System. In (Foster, M. Hrsg.): Textbook of Physiology, London, 1894; S. 3.
- [Sm92] Smith, R.: Inhibition: history and meaning in the sciences of mind and brain. University of California Press cop, Berkeley (Calif.), 1992.
- [Tu87] Turing, A.: Intelligente Maschinen. In (Kittler, F.; Dotzler, B. Hrsg.): Alan Turing. Intelligence Service: Schriften. Brinkmann und Bose, Berlin, 1987; S. 81-113.
- [WR10] Whitehead A., Russel B.: Principia mathematica. Cam. Univ. Press, Cambridge, Mass., 1910.