

Matteo Pasquinelli

Das Auge des Meisters

Eine Sozialgeschichte Künstlicher Intelligenz

aus dem Englischen von Karina Hermes

UNRAST

Die Idee von künstlichen Neuronen und dem Projekt der Automatisierung der *Gestalt-Wahrnehmung* war bereits diskutiert worden, als Wiener im Jahr 1948 sein Buch *Cybernetics* veröffentlichte, welches die erste Zusammenstellung von digitalem Rechenwesen und Informationstheorien war. 1951, einige Jahre nach dem Hixon-Symposium, verfasste Köhler eine strenge Rezension von Wieners Buch und dessen Kapitel über *Gestalt and Universals*, in der er den Standpunkt vertrat, dass, auch wenn es wahr ist, dass Maschinen besser als Menschen in Kalkulation seien, eine solche Kalkulation nicht gleichbedeutend mit Denken oder mit der tatsächlichen Fähigkeit zur Einsicht in ein Problem ist:

»Im Verhältnis der menschlichen Wesen zu den berechnenden Maschinen, scheint es, dass das Denken im eigentlichen Sinne des Wortes die Aufgabe des Menschen bleibt. Hervorragende Ingenieure und Mathematiker bauen in ein solches Instrument mechanisch erzwungene Wege der Operation ein, die als faktisch verlässlichen Ersatz für gewisse quantitative Aktivitäten des menschlichen Geistes wie Addition und Multiplikation dienen können. Es ist nicht weiter verwunderlich, dass, solange es um Geschwindigkeit geht, die ersetzenden Operationen der Maschinen allem, was der menschliche Geist erreichen könnte, weit überlegen sind. Zugleich scheinen diese Operationen generell anders zu sein, als jene eines menschlichen Geistes, der mit einem mathematischen Problem befasst ist [...] Die Maschine kann nichts wissen, denn innerhalb ihrer Funktionen findet sich nichts, das mit der Einsicht in die Bedeutung eines Problems verglichen werden kann.«²⁹

Mitte der 1950er Jahre luden der Neurophysiologe Jerome Lettvin und der Biologe Humberto Maturana McCulloch und Pitts dazu ein, an ihren Studien der Neuronen eines Froschauges mitzuarbeiten. Ihre Schlussfolgerung wurde später 1959 in dem berühmten Artikel *What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain* veröffentlicht, der für viele den Todesstoß für die *Gestalt-Kontroverse* repräsentiert.³⁰

Ihre Untersuchung ging von der einfachen Beobachtung aus, dass der optische Nerv höherer Tiere aus weniger Fasern besteht, als die Retina. Dies legt nahe, dass der Stimulus einer Komprimierung unterzogen wird, bevor er das Gehirn erreicht. Die Frage, die sich stellt, lautet, was genau mit

29 Köhler: »Review of Cybernetics«, 128.

30 J. Y. Lettvin et al.: »What the Frog's Eye Tells the Frog's Brain«, *Proceedings of the IRE* 47, Nr. 11 (1959): 1940–1951.

dem Stimulus zwischen der Retina, dem optischen Nerv und dem visuellen Kortex geschieht. Die Wissenschaftler:innen wählten den Frosch als ihren Modellorganismus. Sie maßen den Reiz im optischen Nerv mithilfe einer Elektrode, während sie dem Auge des Frosches Formen mit hohem Kontrast vorhielten. Auf diese Weise zeichneten sie vier Typen des neuronalen Verhaltens oder »Operationen« auf: »1) durchgehende Kontrasterkennung; 2) Erkennung der Netzkonvexität; 3) Erkennung sich bewegender Ränder; 4) Erkennung der Netzverdunklung«.³¹ Zur besseren Veranschaulichung soll die zweite Operation näher betrachtet werden, nämlich die Erkennung der Netzkonvexität, die womöglich am intuitivsten zu verstehen ist: Hier geht es um die Wahrnehmung eines kleinen Objektes, das sich durch ein Sichtfeld bewegt, z.B. ein fliegendes Insekt, was zur Nahrungsgewinnung und zum Überleben des Frosches entscheidend ist. Daher wurde dieser Vorgang umgangssprachlich als »Käferdetektor« bezeichnet:

Entgegen der Vorrangigkeit der Gehirnfunktionen der *Gestalt-Theorie* behaupteten die Autoren, dass das Auge bereits grundlegende Aufgaben der Kognition durchführt, wie die Mustererkennung, und Signale an das Gehirn sendet, die bereits wohlgeformte *Konzepte* und nicht bloße *Perzepte* sind. Sie verteidigten die Ansicht, dass das Auge bereits eine Sprache der »komplexen Abstraktion« anwendet, statt nur ein Sinnesmedium zu sein. Sie kamen zu dem Schluss, dass »das Auge mit dem Gehirn in einer Sprache spricht, die bereits hochorganisiert und interpretiert ist, statt ein mehr oder weniger akkurates Abbild der Distribution von Licht auf die Rezeptoren zu übermitteln«.³² Was das Auge an das Gehirn sendet, wäre nicht eine Form, die analog zu Perzept ist (die dann die Verhältnisse der *Gestalt* behalten würde), sondern eine semantische Proposition – ein Teil einer Information, die das Muster, das im Perzept anzutreffen ist, interpretiert. Der gemeinsame Artikel nahm auch Ergebnisse aus dem Beitrag von McCulloch und Pitts von 1947 auf, einschließlich der Beobachtung, dass ein Bild durch Kalkulierung der Verhältnisse der Elemente entsprechend einer räumlichen Logik logisch definiert und »wahrgenommen« werden kann.

»Durch Transformation des Bildes aus einem Raum aus einfachen separaten Punkten zu einem kongruenten Raum, in dem jeder äquivalente Punkt durch die Überscheidung von bestimmten Qualitäten in seiner Nachbarschaft beschrieben

31 Ebd.:1943.

32 Ebd.: 1950.

wird, können wir somit mit Blick auf die Verteilung von Kombinationen dieser Qualitäten das Bild wiedergeben. Kurz gesagt, jeder Punkt wird in definitiven Kontexten gesehen. Der Charakter dieser Kontexte, genetisch eingebaut, ist das physiologische synthetische *a priori*.«³³

Ein digitales Bild setzt sich nicht einfach aus separaten Punkten zusammen, sondern aus räumlichen Verhältnissen zueinander, die man als »Verteilung von Kombinationen« beschreiben kann. Es ist bemerkenswert, dass die Autoren hier offenbar nahelegen, dass es nicht das neuronale Netzwerk *per se* ist, welches das »physiologische synthetische *a priori*« des Gedankens bildet, sondern eher die räumliche Logik, die das neuronale Netzwerk verarbeitet.

Der Biomorphismus der frühen künstlichen neuronalen Netzwerke (hier die Imitation von biologischen neuronalen Netzwerken) muss letztlich hinterfragt werden. Das menschliche Organ, das McCulloch und Pitts am häufigsten untersuchten und sich als ein Netzwerk aus logischen Operatoren vorstellten, war nicht das Gehirn, sondern das Auge; und vom Auge erbten ihre künstlichen neuronalen Netzwerke implizit eine bestimmte Hierarchie des Verhaltens. Im Essay von 1947 von McCulloch und Pitts sollte die Kooperation unter den Knotenpunkten des künstlichen neuronalen Netzwerkes die kombinatorische Geometrie des Gesichtsfeldes auflösen, nicht eine propositionale Logik eines Syllogismus, wie in ihrer Veröffentlichung von 1943. In der *Gestalt-Kontroverse* findet man dann auch nicht ein Modell der Kognition, das mechanisiert werden soll, sondern eher mehrere Modelle der Wahrnehmung, da die Elemente des Wahrnehmungsfeldes und weniger mentale Zustände hier in berechenbaren Bedingungen repräsentiert wurden. Die Entwicklung von künstlichen neuronalen Netzwerken setzte sich fort, indem vorrangig die Neuronen des Auges statt des Gehirns untersucht wurden: erst waren es Lettvin's Frösche, dann David Hubel und Torsten Wiesel's Katzen (dies wurde zu Inspiration von *convolutional neural networks* wie AlexNet); die Geschichte der konnektionistischen KI hat sich also an Tieren und ihren Sehorganen schuldig gemacht.³⁴

Von einer mathematischen Perspektive aus ging es bei der *Gestalt-Kontroverse* zum einen um die Transformation eines Bildes in ein logisches

33 Ebd.

34 D. H. Hubel / T. N. Wiesel: »Receptive Fields of Single Neurones in the Cat's Striate Cortex«, *Journal of Physiology* 124, Nr. 3 (1959): 574–91.

Konstrukt und zum anderen um die Tatsache, dass ein logisches Konstrukt menschlichen Denkens womöglich die wahrheitstheoretischen Eigenschaften der Bildwahrnehmung teilt.³⁵ Liest man zwischen den Zeilen, so verwies die *Gestalt-Kontroverse* schon damals auf eine logische Form, die sich erst im maschinellen Lernen des 21. Jahrhunderts voll ausbilden sollte: Die Idee einer räumlichen und statistischen Dimension der Information jenseits der linearen Modalität der Turing-Maschine. Logische Gatter und Wahrnehmungsfelder – die grundlegenden Konzepte jeweils der Kybernetik und der *Gestalt-Schule* – waren zwei gegensätzliche Ideale, die die aufstrebende KI letztlich überwand und in immer abstraktere Konstrukte miteinander verschmolz: Gegenwärtig wird die innere Logik maschinellen Lernens beispielsweise mittels Entitäten wie multidimensionalen Vektoren, latenter Raum und statistischer Distribution beschrieben. Die visuelle Matrix (und mit ihr die Bildfläche moderner Ikonologie) hat sich seitdem in diese fortgeschrittenen logischen Formen, in diese weitläufigen Verästelungen der statistischen Schlussfolgerung, weiterentwickelt, deren vollkommenes Verständnis noch aussteht.

Die Sprache des Gehirns ist nicht die Sprache der Mathematik

Wie der Epistemologe David Bates geschrieben hat, wurde der Skeptizismus der *Gestalt-Schule* gegenüber einem rechnerischen Reduktionismus dennoch von einer zentralen Figur der US-amerikanischen Kybernetik aufgenommen: dem Universalgelehrten John von Neumann. Als Schlüsselfigur des Manhattan-Projektes und leidenschaftlicher Antikommunist³⁶ übernahm von Neumann in der Kontroverse die Rolle eines Mediators. Dadurch führte er eine Synthese von *Gestalt-Theorie* und logischen neuronalen Netzwerken herbei und ebnete auf diese Weise den Weg für Rosenblatts Idee von statistischen neuronalen Netzwerken. Von Neumann erhielt sich ein starkes Interesse an der mathematischen Analyse biologischer neuronaler Netzwerke, ohne jedoch zu behaupten, dass das Gehirn

35 Der Wissenschaftshistoriker Peter Galison hat die Beziehung zwischen den »mimetischen« und den »logischen« Traditionen bei der Konstruktion von wissenschaftlichen Bildern untersucht. Vgl. Peter Galison: *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago 1997.

36 David Bates: »Creating Insight: Gestalt Theory and the Early Computer«, in: Jessica Riskin (Hg.): *Genesis Redux: Essays in the History and Theory of Artificial Life*, Chicago 2007, 237–259.

eine Maschine sei, noch dass eine Maschine ein Gehirn in perfekter Weise nachahmen könne. Stattdessen vertrat er die Ansicht, dass, wenn man die Anzahl ihrer Einheiten (Neuronen in Gehirnen im Verhältnis zu Schaltern in Maschinen) bedenke, das Ausmaß menschlicher Kognition nicht mit mechanischen Rechenprozessen verglichen werden könne: »Die Anzahl der Nervenzellen im menschlichen zentralen Nervensystem ist auf etwa 10 Milliarden geschätzt worden [...] und niemandem ist ein Schaltorgan mit 10 Milliarden Einheiten untergekommen; daher würde man zwei unbekannte Objekte miteinander vergleichen«. ³⁷ Wie wir sehen werden, reduzierte von Neumann letzten Endes nicht das Gehirn auf einen Computer, das Biologische auf das Logische, sondern stellte sich stattdessen Zwischenmodelle und Implementierungen vor, um eine Domäne in die andere zu übertragen.

Von Neumann stimmte McCulloch und Pitts darin zu, dass »alles, was sich mit Worten beschreiben lässt, auch mit der neuronalen Methode gemacht werden kann«, aber glaubte nicht, »dass jeder Schaltkreis, den man auf diese Weise entwirft, tatsächlich so in der Natur vorkommt«. ³⁸ Während er McCullochs und Pitts' Bemühen, biologische Neuronen in formal zu erfassen, sodass keine Erläuterung mehr nötig ist, nachempfinden konnte, gab er zugleich der *Gestalt-Schule* darin recht, dass die systemische Natur der Formenwahrnehmung von einer Art ist, die sich nicht ohne Weiteres in propositionalen Bedingungen und deduktiver Logik beschreiben lässt, es sei denn, man lässt die Größe der Beschreibungen in langatmige und ausschweifende Code-Skripte ausarten. Wie von Neumann erläutert, trägt die arithmetische Logik manifeste Grenzen ihrer Größe bei ihrer Repräsentation der Welt in sich:

»Angenommen, man möchte den Umstand beschreiben, dass man erkennt, dass es sich um ein Dreieck handelt, wenn man ein Dreieck ansieht, und man dies erkennt, egal, ob es groß oder klein ist. Es ist recht einfach, zu beschreiben, was damit geometrisch gemeint ist: Ein Dreieck ist eine Gruppe von drei Linien, die auf bestimmte Weise angeordnet sind. Schön und gut, doch man erkennt auch etwas als ein Dreieck, dessen Seiten gebogen sind, oder wenn nur die Eckpunkte angedeutet sind, oder wenn das Innere schattiert ist und das Äußere nicht. Viele

37 Von Neumann: *Theory of Self Reproducing Automata*, 37. Vgl. auch John von Neumann: »The General and Logical Theory of Automata«, in: Jeffress: *Hixon Symposium*, 3.

38 Von Neumann: *Theory of Self Reproducing Automata*, 46.

verschiedene Sachen können als ein Dreieck erkannt werden, die alle einen Hinweis auf ein Dreieck in sich tragen, doch je mehr Details man versucht bei der Beschreibung mit zu berücksichtigen, desto länger wird die Beschreibung. [Hinsichtlich] der gesamten visuellen Maschinerie der Interpretation eines Bildes, etwas in ein Bild zusammenzusetzen, gelangt man in Gebiete, die man sicherlich nicht mit diesen [logischen] Bedingungen ausdrücken kann.«³⁹

Gegen McCulloch und Pitts vertrat von Neumann die Ansicht, dass das Gehirn die Komplexität jedes Bildes erkennen kann, eben aufgrund seiner probabilistischen Logik. Arithmetische Logik wäre demnach eine Vereinfachung und eine Annäherung an die tatsächliche Arbeitsweise des Gehirns und könnte nur zum Teil dessen Eigenschaften erfassen. Als Folge dessen definierte von Neumann die arithmetische Logik als Metasprache (»Zweitsprache« oder »Shortcode«). Auch beobachtete er, ähnlich wie Köhler, dass das Nervensystem diese Erstsprache unter Verwendung der statistischen Eigenschaften von Stimuli (»kompletter Code«) spricht, statt exakter Markierungen (»Shortcode«).

Angesichts dieser probabilistischen Dynamik folgte von Neumann kontraintuitiv, dass im Nervensystem eine »Verschlechterung« der arithmetischen Präzision tatsächlich in einer »Verbesserung der Logik«⁴⁰ resultieren kann. Er und andere betonten, dass biologische neuronale Netzwerke mit einer Fehlertoleranz operierten, die jede deterministische berechnende Maschine aus dem Gleichgewicht bringen würde. Ein einziger Fehler im Computerprogramm bringt die gesamte Maschine zum Stillstand. Doch solche Fehler stören Organismen nicht weiter. Somit ist es die gleiche probabilistische Natur von Organismen, die sie tolerant für Fehler machen und es ermöglichen, uneindeutige und komplexe Figuren ohne Schwierigkeit wahrzunehmen:

»Die Tatsache, dass natürliche Organismen eine derart radikal andere Einstellung gegenüber Fehlern haben und sich so anders verhalten, wenn ein Fehler auftritt, ist wahrscheinlich mit einigen weiteren Eigenschaften natürlicher Organismen verbunden, die unseren Automaten gänzlich fehlen. Die Leistungsfähigkeit eines natürlichen Organismus, trotz einer großen Fehlerhäufigkeit (wozu unsere künstlichen Automaten nicht in der Lage sind), verlangt womöglich ein

39 Ebd.: 46–47.

40 John von Neumann: *The Computer and the Brain*. Silliman Memorial Lectures, New Haven 1958, 80.

sehr hohes Maß an Flexibilität und vom Automaten die Fähigkeit, sich selbst zu beobachten und zu reorganisieren. Und diese erfordert vermutlich eine sehr beachtliche Autonomie von Teilen. Im zentralen Nervensystem des Menschen sehen wir eine starke Autonomie der Teile. Diese Autonomie der Teile eines Systems hat Auswirkungen, die man im Nervensystem des Menschen, nicht aber in künstlichen Automaten beobachten kann.«⁴¹

Heute besteht Einigkeit darüber, dass biologische neuronale Netzwerke trotz Irrtümern, Fehlern und Schäden laufen können, und genau genommen auch dank dieser.⁴² Kybernetiker:innen stießen auf diese Idee der Neuroplastizität in den Kognitionswissenschaften jener Zeit, insbesondere in den Werken des Neurologen Karl Lashly (der auch auf dem Hixon-Symposium vortrug) und Kurt Goldstein (der als Mitglied der exilierten *Gestalt-Schule* in die USA ausgewandert war). Lashley untersuchte die Auswirkungen von künstlich induzierten Gehirnverletzungen auf das Gedächtnis von Laborratten, während Goldstein die Fähigkeit von Veteranen des Ersten Weltkrieges, ihre Erinnerungen nach realen Gehirntraumata neu zu organisieren, erforschte.⁴³ Doch es war eher Goldstein als Lashley, der ein systematischeres Modell von Neuroplastizität lieferte. Seine Theorie zur Fähigkeit des Gehirns, sich nach einem Trauma zu reorganisieren, stand zudem in enger Verbindung zur Debatte über die Verortung des Gedächtnisses. Eine entscheidende These, die von einem der Vorreiter einer holistischen Neurologie stammt, Constantin von Monakow, besagte, dass das Gedächtnis verteilt sei, statt an einem Ort verankert, und dass es daher für das Gedächtnis möglich sei, sich nach einer Gehirnverletzung zu erholen (siehe Kapitel Acht). Von Neumann gab diese Theorien weiter:

41 Von Neumann: *Theory of Self Reproducing Automata*, 73.

42 Zum Einfluss dieser Idee auf die Genese des Deep Learning vgl. Yann LeCun et al.: »Optimal Brain Damage«, *Neural Information Processing Systems* 2 (1989): 598–605.

43 Das Kapitel zu den »Pathologien von Maschinen« in Wieners *Cybernetics* spiegelt diese Debatten zur Neuroplastizität wider. Vgl. auch die Einleitung in Matteo Pasquinelli (Hg.): *Alleys of Your Mind. Augmented Intelligence Trauma*, Lüneburg 2015; David Bates: »Unity, Plasticity, Catastrophe: Order and Pathology in the Cybernetic Era«, in: Andreas Killen / Nitzan Lebovic (Hg.): *Catastrophe. History and Theory of an Operative Concept*, Berlin 2014, 252; Matteo Pasquinelli: »What an Apparatus Is Not. On the Archeology of the Norm in Foucault, Canguilhem, and Goldstein«, *Parrhesia* 22 (Mai 2015): 79–89.

»Das Hauptproblem mit dem Organ des Gedächtnisses scheint darin zu bestehen, dass es an keinem bestimmten Ort ist. Es ist niemals banal, irgendwas im Gehirn zu verorten, da das Gehirn über eine beachtliche Fähigkeit zur Reorganisation verfügt. Selbst wenn eine Funktion in einem bestimmten Teil des Gehirns verortet wurde, kann es sein, dass man nach Entfernung dieses Teils feststellt, dass das Gehirn sich neu geordnet hat, Zuständigkeiten neu verteilt wurden und die Funktion wieder ausgeführt werden kann.«⁴⁴

Es war diese Vorstellung von einem verteilten Gedächtnis im menschlichen Gehirn, die eine Delokalisierung des Speichers in Maschinen nahelegte. Neuronale Netzwerke, mit ihrer verteilten Architektur, waren die perfekten Kandidaten, um dies umzusetzen. Wie Rosenblatt in *Neurodynamics* einräumte, war es der Kommentar von von Neumann zum verteilten Gedächtnis, der zur wichtigsten Anregung für das Perzeptron wurde (siehe Kapitel Neun).⁴⁵

Aus dieser Perspektive betrachtet verfolgte von Neumann eine andere Methode der Fragestellung als andere Kybernetiker:innen. Entgegen dem Platonismus und Intuitionismus, der damals auch im Ingenieurwesen verbreitet war, hielt von Neumann an einer konstruktivistischen Perspektive auf Sprache, Logik und Mathematik fest. Er war überzeugt, dass diese Konzepte nicht inhärent oder immanent waren, sondern eher Ergebnisse einer historischen Entwicklung.

»Es ist schlicht angebracht, zu erkennen, dass Sprache zu einem großen Teil ein historischer Zufall ist. Die grundlegenden Sprachen der Menschheit werden uns traditionellerweise in verschiedenen Formen übermittelt, doch gerade ihre Vielzahl beweist schon, dass es bei ihnen nichts Absolutes oder Notwendiges gibt. Genau wie Sprachen wie Griechisch oder Sanskrit historische Tatsachen sind und keine absoluten logischen Notwendigkeiten, ist es nur vernünftig, anzunehmen, dass Logik und Mathematik vergleichbare historische, zufällige Formen der Ausdrucksweise sind. Vielleicht haben sie essenzielle Varianten, d.h., sie können in anderen Formen als jenen existieren, an die wir gewöhnt sind. Tatsächlich deuten die Natur des zentralen Nervensystems und des Nachrichtensystems, das es übermittelt, darauf hin, dass genau dies der Fall ist.«⁴⁶

⁴⁴ Von Neumann: *Theory of Self Reproducing Automata*, 49. Vgl. auch Von Neumann: *The Computer and the Brain*, 63–68.

⁴⁵ Frank Rosenblatt: *Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*, Buffalo 1961, 10. Zu Lashley vgl. Seite 4.

⁴⁶ Von Neumann: *The Computer and the Brain*, 82.

Diese historische Relativierung von Mathematik und Logik ist entscheidend, um von Neumanns Herangehensweise an die rechnerische Theorie des menschlichen Geistes und das Projekt zum Bau denkender Automaten zu verstehen. Von Neumann vertrat eine feinere Position als der Funktionalismus oder die These von der *multiplen Realisierbarkeit des menschlichen Geistes*, welche besagt, dass das gleiche operative Modell der Intelligenz über verschiedene Substrate aus Neuronen, Auslösegeräten, Transistoren, etc. implementiert werden könne. Stattdessen machte von Neumann sich für eine Methode der gegenseitigen Implementierung zwischen künstlichen und natürlichen Welten stark, nämlich für die Methode des *Modellierens*.⁴⁷ Natürlich war von Neumann dem Gebrauch von Computern als Modellmaschinen zum Studium des Gehirns gegenüber positiv eingestellt.

Dessen ungeachtet war er am Ende seines Lebens, als er 1956 von der Universität Yale eingeladen wurde, seine Silliman-Seminare zu halten, bestrebt, diesen Punkt unzweideutig klarzumachen. Seine Seminarreihe *The Computer and the Brain* schließt mit dem deklarativen Titel *The Language of the Brain [Is] Not the Language of Mathematics*. In dieser Vortragsreihe gestand er der »Zweitsprache« der Mathematik eine Schlüsselrolle bei dem Wissen über die »Erstsprache des Gehirns« zu. Doch statt den Computationalismus⁴⁸ von McCulloch, Pitts und Wiener zu wiederholen, machte von Neumann, selbst kein Romantiker, am Ende eine bemerkenswerte Einwendung: Er kehrte die Beziehung zwischen Logik und Natur, Computer und Gehirn, um, sodass er schließlich vorschlug, dass die Forschung der Neurophysiologie eines Tages die Logik vollkommen neu gestalten könnte. In einer Einleitung zur Anthologie der Vorträge, kurz vor seinem Tod im Jahre 1957, schrieb von Neumann vorausschauend: »Ich vermute, dass eine tiefgründigere mathematische Untersuchung des Nervensystems in der Tat womöglich die Art und Weise, wie man Mathematik und Logik angemessen einordnet, verändern könnte«.⁴⁹

Von Neumanns abschließender Gedanke war die Erkenntnis der dialektischen Beziehung von allen Gedankensystemen mit der Natur und der externen Welt. Diese Erkenntnis schloss Frieden mit den Grenzen jedes

⁴⁷ John von Neumann: »The General and Logical Theory of Automata«, in Jeffress, Hixon Symposium, 3.

⁴⁸ Computertheorie des Geistes, wonach Kognition und Bewusstsein auf Rechenvorgängen im Gehirn beruhen

⁴⁹ Von Neumann: *The Computer and the Brain*, 2.

Systems der Formalisierung und räumte die materiellen Beschränkungen, einschließlich der historischen, durch technologische und wissenschaftliche Abstraktionen ein. Diese Einsichten überwand den üblichen Reduktionismus der kybernetischen Mentalität. Modelle des menschlichen Geistes und von Maschinen müssen nicht zueinanderpassen; oft arbeiten sie dadurch, dass sie die Welt modellieren, statt diese auf feste Repräsentationen zu reduzieren. Eine Epistemologie, die die Flexibilität und die Grenzen des Modellierens anerkennt, ist empfehlenswert und dennoch keine ausreichende Bedingung für eine progressive Philosophie des Geistes. Wie im nächsten Kapitel deutlich werden wird, versuchte der neoliberale Ökonom Friedrich Hayek tatsächlich, das Modell-Denken in ein Kernprinzip des ökonomischen Individualismus zu verwandeln.