

## Muster im Hirn

### Neurowissenschaftliche Anmerkungen zum Musterbegriff

*Markus Christen*

Muster sind gesetzmäßige Anordnungen unterschiedlicher Teile. Wird diese Definition als Ausgangspunkt für die Suche nach Mustern genommen, lässt sie einen großen Interpretationsspielraum offen und bedarf zweifellos einer Präzisierung hinsichtlich des Anwendungsbereichs. Doch auch die Präzisierung eröffnet ein Feld weitreichender Fragen, welche das jeweils gewählte wissenschaftliche Gebiet charakterisieren. Diese Feststellung verweist nicht auf die eher triviale Aussage, dass (empirische) Wissenschaft nach Mustern in der Welt sucht sowie deren Vorhandensein und Art der Ausprägung erklären will – man also den Musterbegriff mit der generellen Zielsetzung des Unterfangens Wissenschaft direkt verknüpft. Vielmehr stehen die Begriffe «gesetzmäßig», «Anordnung», «unterschiedlich» und «Teile» für eine jeweils spezifische Sammlung an Fragen, aus deren Antworten man viel über Ziele und Methodik der fraglichen Disziplin lernt. Dies gilt auch für die Neurowissenschaft. In diesem Beitrag soll deshalb der Musterbegriff aus einer neurowissenschaftlichen Perspektive quasi seziiert werden, um zweierlei zu erreichen: Grundlegende Fragen, mit denen sich die Neurowissenschaft konfrontiert sieht, sollen dargestellt werden. Zweitens soll diese Analyse den Musterbegriff an sich etwas mehr erhellen.

#### «Muster» als Mantelbegriff

Wissenschaft beginnt mit der (zuweilen naiven) Erkennung von Mustern in der Welt, die zu weiteren Fragen führen. Dieser fundamentale Gedanke findet sich bei vielen Autoren – so etwa in einer interessanten Ausprägung bei dem Ökonomen Friedrich August von Hayek in seiner 1961 verfassten Untersuchung *The Theory of Complex Phenomena*.<sup>1</sup> Darin erläuterte er, dass es immer einer theoretischen Idee eines Musters bedarf, um Phänomene, die mögliche Gegenstände einer wissenschaftlichen Theorie bilden, zu klassifizieren. Eine solche Theorie definiert eine Klasse von Mustern, deren individuelles Vorkommen dann in der realen Welt geprüft wird. Mustersuche wird zur Musterwiedererkennung, wie der englische Ausdruck *pattern recognition* deutlich macht. Gerade in der Neurowissenschaft zeigt sich diese grundle-

---

<sup>1</sup> Friedrich August von Hayek: *The Theory of Complex Phenomena* (1961), Tübingen 1972.

gende Feststellung an zahlreichen Beispielen. Einige wenige davon werden wir nachfolgend genauer betrachten.

Doch bevor wir näher darlegen, wo überall man nach neuronalen Mustern sucht, beginnen wir mit einem Blick auf die generelle Definition des Begriffs «Muster». Die Forderung nach Gesetzmäßigkeit – die erste Komponente der Definition – leuchtet gewiss ein, darf aber nicht zur Idee verleiten, Muster bestünden aus der schlichten Wiederholung von Strukturen oder Ereignissen. Der gesetzmäßige Charakter von Anordnungen kann sich unterschiedlich ausprägen, ja die Ermittlung des Gesetzes selbst ist eine der zentralen Zielsetzung des wissenschaftlichen Unterfangens, sich mit Mustern zu beschäftigen. Wird ein System einem experimentellen Zugriff unterzogen, ist die Suche nach Regelmäßigkeiten methodisches Programm. In *stimulus-response*-Experimenten – ein in der Neurowissenschaft zentrales experimentelles Paradigma – werden diesem System daher wiederholt Reize appliziert, um daraus auf Gleichförmigkeiten im inneren Mechanismus der Reizverarbeitung zu schließen. Abstrakt gesprochen, kann sich schließlich die Gesetzmäßigkeit, mit der das System auf Reize reagiert, in Repetitionen beziehungsweise Periodizitäten, mathematischen Folgen oder auch komplexen mathematischen Gleichungen ausdrücken. Die ermittelte Gesetzmäßigkeit muss sich uns nicht in einer simplen Form zeigen.

Mit dem Begriff «Anordnung» wird implizit gesagt, dass wir – bevor wir uns auf die Suche nach einem Muster machen – eine Vorstellung davon haben müssen, in welchem Bezugssystem (*framework*) sich die Elemente befinden, welche das potenzielle Muster bilden. Raum und Zeit bieten sich hier als grundlegende Kategorien an. Demnach sind entweder physikalische Entitäten im Raum oder Ereignisse entlang der Zeitachse angeordnet. Gewiss sind auch Mischformen, also raumzeitliche Muster, möglich und – wie im Folgenden noch deutlicher werden wird – in der Neurowissenschaft von besonderem Interesse. Doch auch hier sollten wir nicht zu einfach denken. Die mathematische Analyse von Phänomenen kann uns in hochdimensionale Zustandsräume führen, in denen die *wahren* Muster verborgen sind.<sup>2</sup> Die Frage der Visualisierung solcher Muster wird in diesem Fall zu einem wissenschaftlich wie wissenschaftstheoretisch schwierigen Problem.

---

<sup>2</sup> In der Theorie dynamischer Systeme ist die Rekonstruktion von Zustandsräumen aus Zeitreihen (*coordinate delay construction*) ein Standardverfahren. Aufgrund dieser Rekonstruktion lässt sich ein Zustandsraum gewissermaßen aufteilen und die Dynamik dieses Systems in einer Sequenz von Symbolen kodieren. Innerhalb einer solchen Sequenz lässt sich dann nach Mustern suchen. Siehe: Holger Kantz, Thomas Schreiber: *Nonlinear Time Series Analysis*, Cambridge 2000.

Auf ein weiteres Problem wird mit dem Adjektiv «unterschiedlich» hingewiesen: Unterscheidungen zu machen ist gleichbedeutend mit dem Kategorisieren eines Gegenstandsbereichs – und Kategorisierungen sind keineswegs trivial. Zwei grundlegende Ansätze sind hier zu unterscheiden: Kategorisierungen können als Folge von Vor-Urteilen entstehen (*top down*) oder als Ergebnis lokaler Interaktionen (*bottom up*). Diese unterschiedlichen Ansätze führen zu zwei grundlegend verschiedenen Vorgehensweisen in der Mustersuche, die gemeinhin durch die englischen Begriffe *pattern recognition* und *pattern discovery* beschrieben werden.<sup>3</sup> Gleichzeitig stellt diese Unterscheidung von Hayeks grundlegende Gedanken ein wenig in Frage, denn *pattern discovery* scheint bei ihm keinen Platz zu haben. Ein Ausweg ist hier, zwischen expliziten theoretischen Vorgaben (das von der Theorie geforderte Muster, das es zu suchen gilt) und impliziten, den Entdeckungsvorgang beeinflussenden Faktoren zu unterscheiden. Darauf soll am Schluss eingegangen werden.

Der Ausdruck «Teil» verweist schließlich auf ein letztes grundlegendes Problem im Musterbegriff: Die Entitäten in einer durch evolutionäre Dynamik geprägten natürlichen Welt haben einen hierarchischen Aufbau<sup>4</sup> – und somit definiert die Auswahl der Ebene innerhalb der Hierarchie des Gegenstandsbereiches, was wir als Teil und was wir als Ganzes (das Muster) ansehen wollen. Die Wahl der Hierarchieebene und die Art der Kategorisierung sind dabei nur schwer zu trennen. Die Neurowissenschaft mit ihrem Grundziel, «Verhalten als Funktion der Aktivitäten des Gehirns» (Übersetzung des Autors) zu verstehen<sup>5</sup>, ist von diesem Problem besonders betroffen, zumal Muster sehr unterschiedlicher Art und auf verschiedenen Ebenen miteinander in Beziehung gebracht werden müssen.

Zusammengefasst zeigt diese kurze Einführung, dass «Muster» gleichsam als Mantelbegriff vier zentrale wissenschaftliche und wissenschaftstheoretische Fragekomplexe umfasst. Denn wann immer wir den Muster-Begriff zum Thema machen, stellt sich die Frage nach der Wahl des Bezugssystems und der Hierarchieebene, in welchen nach Mustern gesucht wird, beziehungsweise die Frage nach den Kategorien, aufgrund welcher Muster gesucht und ihre Gesetzmäßigkeiten bestimmt werden.

## **Der Gegenstandsbereich neuronaler Muster**

---

<sup>3</sup> Zu dieser Unterscheidung siehe: Cosma R. Shalizi, Jim Crutchfield: «Computational mechanics: Pattern and Prediction, Structure and Simplicity», in: *Journal of Statistical Physics*, 104(3/4), 2001, S. 817–879.

<sup>4</sup> Dieser Gedanke wird von Simon hervorragend ausgeführt: Herbert A. Simon: «The Architecture of Complexity», in: *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6), 1962, S. 467–482.

<sup>5</sup> So die Formulierung von Kandel in: Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*, New York 2000, S. 5.

Aus dieser beeindruckenden Spannweite an Problemen, die sich im Musterbegriff verbirgt, kann in diesem Beitrag natürlich nur eine kleine Auswahl genauer untersucht werden. Bevor dies aber geschieht, sollten wir uns die Komplexität des Problems im Gegenstandsbereich Neurowissenschaft in einer kurzen Übersicht über die möglichen Arten neuronaler Muster vergegenwärtigen. Im Bezugssystem Raum sind vom Molekül bis zu großen Organismen alle Gegenstände des neuronalen Erkenntnisinteresses – man bewegt sich über sieben Größenskalen<sup>6</sup>. Auf der Ebene der Moleküle zielt die Frage nach dem Muster beispielsweise auf die Suche nach typischen Anordnungen von Ionenkanälen auf der Zellmembran von Neuronen. Geraten die Neuronen ins Blickfeld der Untersuchung, stellt sich die Frage nach charakteristischen Formen oder Gleichförmigkeiten in der Verbindungsstruktur. Auf der Ebene des Gehirns rückt die Konnektivität bestimmter Hirnregionen (beispielsweise im Vergleich zwischen den biologischen Arten) ins Zentrum des Interesses. Wir brauchen an dieser Stelle nicht weiter auf die beeindruckende Menge an Wissen über diese verschiedenen Fragestellungen einzugehen. Es sei nur soviel gesagt: Die derzeit größten Wissenslücken bestehen auf der Ebene der neuronalen Vernetzung – hinsichtlich der Frage, ob es je nach Hirnregion typische, sich reproduzierende Muster neuronaler Verbindungen gibt. Man spricht hier auch von der *Meso-Ebene* mit einer Größenskala von mehreren hundert Mikrometern. Dass es gewisse Regionen wie das Kleinhirn oder den Hippocampus (eine unter anderem für die Gedächtnisbildung wichtige Hirnregion) gibt, wo die neuronalen Verbindungen strikten Mustern folgen, ist zwar bekannt. Ob derartiges auch im Kortex gilt – jene Hirnregion, welche für das menschliche Geistesleben die wohl zentrale biologische Infrastruktur bereitstellt –, ist Gegenstand von Kontroversen. Die Idee eines Musters wird hier zur Hypothese einer festgelegten Verschaltung von Grundtypen von Neuronen, die sich regelmäßig wiederholt: die Idee eines *microcircuit*<sup>7</sup>. Diese Hypothese beruht unter anderem auf der bereits erwähnten Vorstellung von Herbert Simon (siehe Seite **xy**), wonach ein evolutionär entstandenes System sich nicht von Grund auf neu *designen* kann, sondern vielmehr Gegebenes repliziert – im Fall des Kortex wäre dies eine millionenfache Repetition eines solchen Grundmusters.

Jedem Neurowissenschaftler ist klar, dass die Ausrichtung auf das Bezugssystem Raum für die Erklärungsziele der Neurowissenschaft nicht ausreicht – Verhalten vollzieht sich schließlich in der Zeit. Entsprechend muss die zeitliche Musterung von Ereignissen in den Blickpunkt

---

<sup>6</sup> Patricia S. Churchland, Terrence J. Sejnowski: *The Computational Brain*, Cambridge 1992, S. 11.

<sup>7</sup> Siehe dazu: Rodney J. Douglas, Kevan A.C. Martin: «Neuronal circuits of the neocortex», in: *Annual Review of Neuroscience*, 27, 2004, S. 419–451.

gerückt werden. Solche Ereignisse finden sich auf unterschiedlichen Zeitskalen, sind aber schwieriger zu individuieren. Am augenfälligsten ist dieses Problem auf der Ebene des Verhaltens selbst. Die Rede von Verhaltensmustern verlangt eine Sequenzierung des Verhaltens in einzelne Bausteine, so dass beispielsweise behauptet werden kann, das Verhaltensmuster bestehe aus einer Repetition einer bestimmten Sequenz solcher Bausteine.<sup>8</sup> Das sich hier stellende Klassifizierungsproblem – eine Dimension des Musterbegriffs – werden wir am Beispiel des Ereignisses «neuronaler Impuls» (*spike*) erläutern.

Verbinden wir die räumliche Perspektive mit der zeitlichen, so entfaltet sich die Komplexität des neuronalen Musterbegriffs: Ein Sinnesreiz im Zuge der neuronalen Verarbeitung wird beispielsweise zu einem ganzen Bündel von Sequenzen neuronaler Impulse, die sich entlang unterschiedlicher räumlicher Bahnen ausbreiten. Damit sind wir beim raumzeitlichen Muster angekommen. Hier zeigt sich dann allerdings, dass eine genaue Definition des in neurowissenschaftlichen Publikationen gebräuchlichen Begriffs des *spatio-temporal pattern* sowohl schwierige methodische als auch statistische Fragen aufwirft.<sup>9</sup> Denn oft bedeutet dieser Begriff nur, «dass da etwas ist», was im jeweiligen experimentellen Kontext die neuronale Antwort auf einen experimentellen Reiz darstellt. Ein solches Aktionsmuster lässt sich nur ungenau bestimmen. Es beeinflusst und verändert jedoch über einen längeren Zeitraum die Funktionalität der neuronalen Verbindungen – und damit verändert sich auch die künftige Erscheinungsform des Musters selbst.

Die methodischen Herausforderungen auf dieser Meso-Ebene sind enorm. Selbst kleine und überschaubare Hirnregionen, wie etwa der Riechkolben der Ratte, bestehen aus vielen Tausend Zellen, von denen man bestenfalls einige Dutzend gleichzeitig messen kann. Streng genommen kann aber nur so Einblick in die detaillierte Mechanik der neuronalen Informationsverarbeitung genommen werden.

Verlockend sind deshalb die Methoden der Bildgebung<sup>10</sup>, die eine räumliche Größenordnung höher ansetzen als die lokalen neuronalen Netze – also auf der Skala von Millimetern. Vorab sei erwähnt, dass die kognitiven und sozialen Neurowissenschaften sich stark auf die funktio-

---

<sup>8</sup> Eine aufschlussreiche Analyse bietet die Untersuchung der Verhaltenssequenz des Balzverhaltens der Fruchtfliege. Siehe: Ruedi Stoop, Benjamin I. Arthur: «Periodic orbit analysis demonstrates genetic constraints, variability, and switching in *Drosophila* courtship behavior», in: *Chaos*, 18(2), 2008, 023123.

<sup>9</sup> Ausführliche Überlegungen dazu finden sich in: Markus Christen: *The role of spike patterns in neuronal information processing. A historically embedded conceptual clarification*. ETH-Dissertation No. 16464, 2006.

<sup>10</sup> Unter Bildgebung werden in der Neurowissenschaft Verfahren verstanden, die Strukturen im Nervensystem oder Aktivitäten ganzer Gruppen von Nervenzellen erfassen und abzubilden vermögen. Für eine Einführung in die einzelnen Verfahren siehe: Lutz Jänke: *Methoden der Bildgebung in der Psychologie und den kognitiven Neurowissenschaften*, Stuttgart 2005.

nelle Magnetresonanztomographie (fMRT) stützen – ein Verfahren, das im Wesentlichen den Sauerstoffverbrauch bestimmter Hirnregionen misst (die Auflösung beträgt derzeit etwa ein Kubikmillimeter). Aus dem Sauerstoffverbrauch schließt man dann auf neuronale Aktivität, wobei aber zahlreiche Fragen hinsichtlich der Natur des durch den fMRT-Scanner erfassten Signals noch ungeklärt sind.<sup>11</sup> Die Verbildlichung dieser Messungen trägt im Kern das Problem einer unzulässigen Vereinfachung des Problems in sich – Kritiker sprechen gar von einer «neuen Phrenologie»<sup>12</sup>, also einer vorschnellen In-Beziehung-Setzung von Hirnregionen mit komplexen psychischen Entitäten. Die Methode an sich zwingt nicht zu dieser Simplizität und wird in naher Zukunft durchaus den Einbezug der zeitlichen Komponenten erlauben (also beispielsweise die Ermittlung der Sequenz der Aktivierungen einzelner Hirnregionen). Mit dieser Art der Visualisierung ist aber eine Vereinfachung in der Vermittlung neurowissenschaftlicher Erkenntnisse verbunden, die der Komplexität der Phänomene oft nicht angemessen ist. Dieser Mangel macht die Notwendigkeit einer vertiefenden Auseinandersetzung deutlich, die allerdings erst ansatzweise geleistet wurde.<sup>13</sup>

### **Mustersuche am Beispiel des neuronalen Codes**

Wenden wir uns nun den vier grundlegenden Problemstellungen des Musterbegriffs zu, die oben mit den Begriffen «gesetzmäßig», «Anordnung», «unterschiedlich» und «Teile» umschrieben wurden. Während wir bereits einen Blick auf das Verhältnis der verschiedenen Ebenen des Vorkommens von Mustern und die Frage nach den entsprechenden Bezugssystemen geworfen haben, wird uns nur das Kategorisierungsproblem im Detail beschäftigen. Auf das Problem der Gesetzmäßigkeiten, also etwa die folgenreiche Frage, ob sich menschliches Verhalten aus bestimmten gegebenen neuronalen Mustern ableiten lässt, können wir uns hier nicht weiter einlassen. Dieses Problem führt uns am Ende in die Debatte um die Freiheit des Willens und damit in die ideologische Dimension des Diskurses um den Musterbegriff. Denn Muster kann ja auch Vorgabe bedeuten. Unter Vernachlässigung der individuellen Varianz (und diese ist beispielsweise bei mittels fMRT gewonnenen Aktivierungsmustern, die mit Verhalten korreliert werden, nicht klein) könnte dereinst beispielsweise ein typisches Aktivierungsmuster für soziale Auffälligkeit proklamiert werden, das sich bereits im Hirn von Kleinkindern nachweisen ließe und dann Anlass für geeignete Maßnahmen gäbe. Die ethischen Kon-

---

<sup>11</sup> Eine umfassende Übersicht zu diesen offenen Fragen liefert Nikos K. Logothetis: «What we can do and cannot do with fMRI», in: *Nature*, 453, 2008, S. 869–878.

<sup>12</sup> Beispielhaft dafür ist William R. Uttal: *The new phrenology. The limits of localizing cognitive processes in the brain*, Cambridge 2001.

<sup>13</sup> Z.B. Joseph Dumit: *Picturing Personhood. Brain Scans and Biomedical Identity*, Princeton, Oxford 2004.

sequenzen eines solchen *forensic neuroimaging* können uns hier aber nicht weiter beschäftigen.<sup>14</sup>

In den nachfolgenden Ausführungen bewegen wir uns primär im zeitlichen Bezugssystem und diskutieren die Frage, wie sich die Idee des neuronalen Musters im Kontext der Debatte um einen neuronalen Code ausgewirkt hat. Das geschah in zwei Schritten: Zuerst musste eine Vorstellung gewonnen werden, wie das «Teil» des Musters, also der neuronale Impuls oder *spike*, beschaffen ist. Auf dieser Grundlage musste ein theoretischer Rahmen – in diesem Fall die Informationstheorie<sup>15</sup> – ausgewählt werden, in dem die Rolle von solchen *spike patterns* als Elemente eines Codes überhaupt erst definiert werden konnte. Gerade weil die daraus folgenden wissenschaftlichen Anstrengungen ergaben, dass dieser Ansatz einer «Mustererkennung» zum Scheitern verurteilt war, ist es aufschlussreich, daran die faktischen Probleme einer Mustersuche im Gegenstandsbereich der Neurowissenschaft aufzuzeigen.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in der wissenschaftlichen Literatur die elektrische Aktivität von Nervenzellen mit Begriffen wie *Nervenenergie* oder *action current* beschrieben. Für eine genauere Untersuchung dieser Aktivität fehlte es hingegen an geeigneten Messgeräten. Erst der Saitengalvanometer erlaubte es, neuronale Aktivität präziser zu messen und (mittels Fotoplatte) aufzuzeichnen. Die Verbreitung der Elektronenröhre ermöglichte dann den Bau von Verstärkern, welche die Auflösung zur Untersuchung des Phänomens deutlich verbesserten. In Kombination mit einem Oszilloskop gelang es zu Beginn der 1920er Jahre mehreren Forschergruppen, die «Nervenenergie» nun tatsächlich wie einen Impuls sichtbar werden zu lassen. Ein derart visualisiertes, klar umrissenes Ereignis erlaubte es, eine Verbindung zwischen dem Nervenimpuls und dessen Bedeutung wissenschaftlich anzugehen. Die hier entscheidende 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 Frosches, um den Zusammenhang zwischen der Stärke des Stimulus und der dadurch erzeugten neuronalen Aktivität zu bestimmen.<sup>16</sup> Im Zusammenhang der messtechni-

---

<sup>14</sup> Siehe dazu Turhan Canli, Zenab Amin: «Neuroimaging of emotion and personality: Scientific evidence and ethical considerations», in: *Brain and Cognition*, 50, 2002, S. 414–431.

<sup>15</sup> Zur Informationstheorie und der Einführung der Informations-Begrifflichkeit in die Naturwissenschaft siehe unter anderem: William Aspray: «The scientific conceptualization of information: a survey», in: *Annals of the History of Computing*, 7(2), 1985, S. 117–140.

<sup>16</sup> Eine Zusammenfassung seiner Arbeit lieferte er in: Edgar A. Adrian: *The Basis of Sensation*, London 1928.

schen Erfassung neuronaler Aktivität führte Adrian die Begriffe *message* und *information* ein.<sup>17</sup>

Ein Blick auf die Arbeitsweise von Adrian macht deutlich, dass die durch ihn geleistete Verknüpfung der gemessenen Sequenz von Impulsen mit Information keineswegs ein schlichter Akt der Beobachtung war. So musste Adrian sicher stellen, dass alle von ihm gemessenen Impulse zur selben Botschaft gehören. Die Platzierung der Elektrode war zu ungenau, um sicher zu sein, dass nur ein Nervenstrang gemessen wurde. Deshalb nahm Adrian an, dass einzelne Nervenzellen in regelmäßigen Abständen feuern – also ein klar erkennbares Muster zeigen – und man es demnach dann mit der Botschaft einer einzigen Nervenzelle zu tun habe, wenn ein regelmässiges Muster erkennbar sei. Solche theoretischen Vorannahmen zwecks Etablierung eines wissenschaftlichen Objekts sind nicht überraschend und verschwinden auch nicht mit der Perfektionierung der Messtechnik.

In diesen Arbeiten der 1920er und 1930er Jahre finden die Neurowissenschaften der 1940er Jahre Anknüpfungspunkte für ein nun informationstheoretisch begründetes Vokabular: Nervenzellen werden als Kanal und digitale (also klar unterscheidbare) Spikes als mögliche Bausteine eines Codes verstanden. Die Frage nach dem neuronalen Code stellte sich dabei – direkt oder indirekt – bei allen Anwendungen des informationstheoretischen Vokabulars auf das Nervensystem. Der Begriff «Code» tauchte erstmals im Umfeld der entstehenden Kybernetik auf. So hatte John von Neumann an der Macy-Konferenz von 1950 explizit diese Begrifflichkeit verwendet – allerdings mit einem skeptischen Unterton.<sup>18</sup> Auch andere Teilnehmer der damaligen Besprechung sprachen vom eher «obskuren Charakter» (Gregory Bateson) der Verwendung des Code-Begriffs im Zusammenhang mit dem Nervensystem.

Dennoch weckte dieses Thema in der folgenden Zeit sowohl das Interesse von Neurophysiologen als auch von Kybernetikern.<sup>19</sup> Dabei zeigte sich seit Beginn, dass der Begriff «Code» für unterschiedliche Formen neuronaler Informationsverarbeitung verwendet wurde. In den 1950er Jahren fanden sich vier Varianten für solche Codes<sup>20</sup>, wobei zwei davon (die Vor-

---

<sup>17</sup> Justin Garson: «The introduction of information into neurophysiology», in: *Philosophy of Science*, 70, 2003, S. 926–936.

<sup>18</sup> Heinz von Foerster, Margaret Mead, Hans L. Teuber (Hrsg.): *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 Claus Pias, *Cybernetics / Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953*, Zürich, Berlin 2003.

<sup>19</sup> Siehe dazu die ausführliche Diskussion in Christen, 2006, Kapitel 3.

<sup>20</sup> Genannt wurden der «*labelled line code*» (die Kodierung geschieht dadurch, dass Nervenimpulse in unterschiedlichen Nervenbahnen verlaufen), der *frequency code* (die Zahl der Impulse pro Zeitintervall kodiert die Reizstärke, das von Adrian vorgeschlagene Modell) sowie zwei Formen von *timing codes*, siehe die zwei folgenden Fußnoten.



schläge von Warren McCulloch<sup>21</sup> und Anatol Rapoport<sup>22</sup>) aus rein theoretischen Überlegungen erwachsen. Weitere Varianten, die im Verlauf der 1960er Jahre dazu kamen, wurden ebenfalls oft aufgrund theoretischer Überlegungen eingeführt. Als Beispiel sei der so genannte *pattern code* genannt, auf den Rapoport auf einer Konferenz in Leiden 1962, auf der das Thema der neuronalen Informationsverarbeitung breit diskutiert wurde, hinwies: «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.»<sup>23</sup>

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.<sup>24</sup> 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.<sup>25</sup> Mit eher ironischem Unterton fragten die Herausgeber des Konferenzberichts zu Beginn «Is the code of the brain about to be broken?»<sup>26</sup> – um gleich danach anzufügen, dass keiner der Teilnehmer mehr daran glaube, es gäbe 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. Die Begrifflichkeit des Codes hatte nicht die gewünschte vereinheitlichende Funktion und die Suche nach Mustern als Bestandteile eines solchen Codes erwies sich als fehlgeleitet.

### **Kann man Muster entdecken?**

Diese kurze Geschichte der Suche nach einem neuronalen Code zeigt die Tücken der Muster-suche in einem komplexen System auf. Ein ungeeigneter Rahmen für das *pattern recognition*

<sup>21</sup> P.D. Wall, J.Y. Lettvin, Warren McCulloch, Walter Pitts: «Factors limiting the maximum impulse transmitting ability of an afferent system of nerve fibres», in: C. Cherry (Hrsg.): *Information Theory*, London 1956, S. 329–344.

<sup>22</sup> Anatol Rapoport, W. Horvath: «The theoretical channel capacity of a single neuron as determined by various coding systems», in: *Information and Control*, 3, 1960, S. 335–350.

<sup>23</sup> Anatol Rapoport: «Information processing in the nervous system», in: R.W. Gerard, J.W. Duffly (Hrsg.): *Information processing in the nervous system*, Amsterdam, New York 1964, S. 16–23. Zitat: S. 21–22.

<sup>24</sup> Zu nennen sind unter anderem Cornelius Wiersma, William Uttal, Theodore Bullock, P.D. Wall, J. Segundo.

<sup>25</sup> Donald H. Perkel, Theodore H. Bullock: «Neural Coding», in: *Neuroscience Research Progress Bulletin*, 6(3), 1968, S. 221–348.

<sup>26</sup> Ebenda, S. 225.

lässt die Forscher gewissermaßen durch eine schiefe Brille auf das Problem blicken. In einem Forschungsfeld wie die Neurowissenschaft, in dem sich die Bezugssysteme, die Kategorisierung der musterbildenden Entitäten und die Hierarchie-Ebenen derart verschränken, sind solche Probleme durchaus zu erwarten. Die Frage ist nur: sind sie unvermeidlich? Ist so etwas wie *pattern discovery* überhaupt möglich, ohne dass man sich zunächst überlegen muss, wonach man sucht?

Diese methodisch bedeutsame Frage verweist auf ein generelles Problem der Analyse von Daten komplexer Systeme und reicht über die Neurowissenschaft hinaus. Sie soll hier an einem Gedanken etwas ausgeführt werden: Mustersuche kann zum einen bedeuten, von einem Prototypen der Anordnung unterschiedlicher Teile auszugehen und dann gleichsam zu zählen, wie oft dieser vorkommt. Zu lösen ist dann das Problem der Ähnlichkeit, das heißt die Frage, welcher Grad der Affinität einer real gefundenen Anordnung ausreicht, um dieses Vorkommnis dem Prototypen zuzuordnen zu können? Mustersuche erinnert hier im Wesentlichen an jenes Holzspielzeug für Kleinkinder, bei welchem diese Klötzchen unterschiedlicher Form durch eine Schablone drücken müssen. Es handelt sich um den genannten *top-down*-Ansatz.

Man kann sich aber auch überlegen, nach welcher Gesetzmäßigkeit die Teile miteinander lokal interagieren könnten und dann prüfen, welche Strukturen sich daraus ergeben. Der Prozess der Musterbildung wird demnach im Sinn eines Selbstorganisationsprozesses simuliert und man lässt sich davon überraschen, welche Muster sich ergeben. Neuere Ansätze in der Datenanalyse beruhen auf dieser Idee einer «unvoreingenommenen Klassifikation».<sup>27</sup> Diese Entwicklungen sind aber nicht nur methodisch interessant, sondern dürften den Prozessen, die unserer Fähigkeit zur Mustererkennung zu Grunde liegen, auch näher kommen.<sup>28</sup> Sie können ein Weg sein, unsere theoretischen Vor-Urteile teilweise zu umgehen – wenn auch nicht auszuschalten – und so *pattern discovery* zu ermöglichen. Denn gerade in der Neurowissenschaft sind theoretische Vorannahmen oft verführerisch und leiten die Forschung auf falsche Wege.

---

<sup>27</sup> Z.B. Thomas Ott, Albert Kern, Willi-Hans Stehen, Ruedi Stoop: «Sequential Clustering: Tracking Down the Most Natural Clusters», in: *Journal of Statistical Mechanics: theory and experiment*, 2005, P 11014.

<sup>28</sup> Thomas Ott: *Self-organised Clustering as a Basis for Cognition and Machine Intelligence*, ETH Dissertation No. 17312, 2007.