

4 Kuriositäten der Wahrnehmung – Mustererkennung, Synergetik und Soft Computing

Wolfgang Eisenberg*, Vera Ogunlade**

4.1 Einleitung

Wie im Vorwort beschrieben, greifen bei der Beschreibung komplexer Systeme und Prozesse zusehends Verfahren, welche die menschlichen bzw. an der Natur orientierten Vorgehensweisen nachbilden – das Schlagwort des Trends heißt *Soft Computing*. Der Sammelbegriff Soft Computing umfaßt in der ursprünglichen Version von LOFTI ZADEH mindestens drei Themen, die neuronalen Netze, die Fuzzy-Logik und die evolutionären Algorithmen. Die Synergetik war noch nicht dabei. Seit geraumer Zeit wird aber die *Synergetik*, ein von H. HAKEN begründeter interdisziplinärer Wissenschaftszweig [1], zur Mustererkennung in der facettenreichen Wahrnehmungsforschung in komplexen Systemen genutzt. Daher vermutete man zuerst intuitiv einen Zusammenhang zwischen der Synergetik und den neuronalen Netzen, die in der Wahrnehmungsanalyse schon vorher umfänglich eingesetzt wurden. Andererseits ist die formale Analogie zwischen Musterbildung und -erkennung die Grundlage zur Realisierung einer Computervariante, des synergetischen Computers, der als neuronales Netz ausgelegt werden kann, wie REIMANN [2] im Jahre 1995 zeigen konnte. Damit ist der Zusammenhang zwischen Mustererkennung, Synergetik und Soft Computing explizit dargestellt. Jetzt können wir uns der Erläuterung

*Dr. rer. nat. Wolfgang Eisenberg, Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V., Thaerstraße 34, D-04129 Leipzig

**Dr. rer. nat. Vera Ogunlade, Arnold-Sommerfeld-Gesellschaft e.V., Thaerstraße 34, D-04129 Leipzig

des im Titel erscheinenden Terminus *Kuriosität* widmen. In der Tat kennt die Geschichte der Psychologie kuriose Wahrnehmungen. Zu diesen werden dort auch die sogenannten Kippfiguren (siehe Abb. 4.2), das typische Demonstrationsobjekt der synergetischen Mustererkennung, gezählt. Unter *Kuriosität* versteht man dabei einen sonderbaren und deshalb Beachtung verdienenden Gegenstand oder eine seltsame, wunderliche Sache [3], wie das Etymologische Wörterbuch des Deutschen uns mitteilt.

Es ist nun interessant, weitere solch kuriose Phänomene, die in einem Kabinett angeordnet werden sollen, hier vorzustellen, sie zu beschreiben (siehe Abschnitt 4.2) und in den synergetischen Kontext des Soft Computing eingeordnet zu denken (siehe Abschnitt 4.3). Die Realisierung von Aufgaben in der modellierenden Dynamik, einem anspruchsvollen Teil der *Kuriositätenforschung*, bleibt ein Ziel zukünftiger Darstellungen der Konzepte und Ergebnisse der Synergetik, auch für die Seiteneinsteiger, z. B. in der Reihe *Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme* [4].

4.2 Visuelle Wahrnehmung

Das visuelle System spielt eine besondere Rolle bei der Orientierung im Raum und nimmt im Vergleich zu anderen Sinnessystemen den größten Teil des Gehirns ein. Es ist nicht unser Ziel, eine ausführliche Beschreibung der physikalischen, anatomischen und physiologischen Eigenschaften des Gesichtssinnes zu geben, das überlassen wir der Fachliteratur. Unsere Aufmerksamkeit ist auf die visuelle Wahrnehmung, speziell auf *Wahrnehmungstäuschungen* gerichtet. Was passiert, wenn wir unsere Augen öffnen und die Welt um uns herum erblicken? Es entsteht zuerst auf der Netzhaut – vergleichend mit einem Foto – ein Bild, das die Welt durch das optische System des Auges seitenverkehrt und umgedreht wiedergibt. Als Licht nehmen wir die elektromagnetische Strahlung in einem Wellenbereich von 400 bis etwa 750 nm wahr. Seit langem ist bekannt, daß das Licht in den Photorezeptoren der Retina elektrische Aktivität auslöst und damit Nervenimpulse entstehen, die über verschiedene Zwischenstationen zur Sehrinde des Gehirns gesendet werden. Die Welt wäre für uns jedoch ganz verwirrend, wenn unser Gehirn nicht fähig wäre, die Informationen, die es von Millionen von Rezeptoren der Netzhaut empfängt, zusammenzufassen und zu ordnen. Dabei kommt es in bestimmten Situationen zu einigen Fehlinterpretationen des sensorischen Reizes, einer *Wahrnehmungstäuschung*. In diesem Fall wird der Fehler von den meisten Menschen, die gleichartige Wahrnehmungssituationen erleben, geteilt. Die Erforschung von *Wahrnehmungstäuschungen* liefert den Wissenschaftlern Informationen über die Natur der Wahrnehmung.

Visuelle Wahrnehmung ist daher das Musterbeispiel für kognitive Leistungen des menschlichen Gehirns.

4.2.1 Kuriositäten der Wahrnehmung – visuelle Täuschungen

Bei vielen alltäglichen Wahrnehmungen spielen visuelle Täuschungen eine Rolle, die den meisten Menschen nicht bewußt sind. Ein Beispiel für Größentäuschungen in der Natur ist die subjektive Einschätzung der Größe des Mondes. Der Mond erscheint nahe am Horizont größer, als wenn er hoch am Himmel steht. Das Kuriose an optischen Täuschungen ist die Tatsache, daß das Wissen über eine Täuschung keinen Einfluß auf die Wahrnehmung hat.

4.2.2 Mehrdeutige Abbildungen

Wenn die Zentrierungs- und Bezugsverhältnisse der Bilddetails nicht eindeutig festgelegt sind, werden die gleichen Bildflächen als Bilder mit wenigstens zweierlei Bedeutung wahrgenommen. Die Wahrnehmung während des Betrachtens einer mehrdeutigen Abbildung springt zwischen beiden Möglichkeiten hin und her (Abb. 4.1)

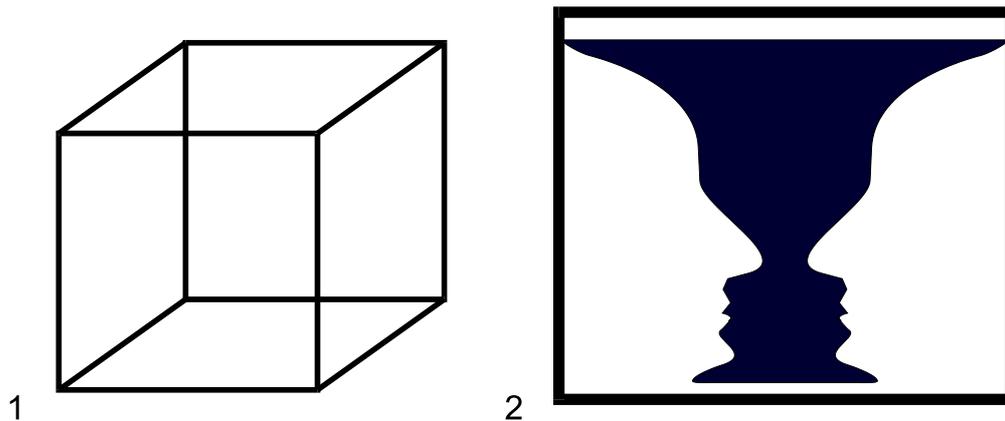


Abb. 4.1: Mehrdeutige Figuren: 1) NECKERScher Würfel, 2) Becher-Profil-Figur nach RUBIN

Der NECKERSche Würfel (Abb. 4.1.1) kann als dreidimensionaler hohler Würfel aus verschiedenen Perspektiven gesehen werden. Bei den Figur-Grund-Bildern (Abb. 4.1.2) ist nicht eindeutig festzustellen, welche Bildanteile die Funktion der Figur und welche die des Hintergrundes übernehmen. Nimmt man Weiß

als Hintergrund, so sieht man einen Becher, wird Schwarz der Hintergrund, sieht man zwei Kopfprofile. Das wird als Kippvorgang bezeichnet. Durch eine Umzentrierung des Blickes kann auf dem Bild von W. E. HILL (Abb. 4.2) einmal eine junge Frau gesehen werden, zum anderen eine alte Frau. Dabei werden Auge, Wange, Halsband und Halsausschnitt der jungen Frau als Ohr, Nase, Mund und Kinn der alten Frau aufgefaßt.



Abb. 4.2: „Braut-Schwiegermutter-Alternative“ nach HILL (1915)

4.2.3 Helligkeitskontraste

Sechs (objektiv) gleich graue Quadrate (Abb. 4.3) erscheinen heller gegen einen dunklen Hintergrund als gegen einen hellen Hintergrund. Je heller der Hintergrund ist, um so dunkler erscheint das Quadrat davor. Dieser Kontrasteffekt vergrößert die Reaktion auf einen konstanten Reiz entsprechend dem vergrößerten Intensitätsunterschied.



Abb. 4.3: Helligkeitskontraste

4.2.4 Grenzverstärkende Kontraste



Abb. 4.4: Die MACHschen Bänder

Die grauen Streifen (Abb. 4.4) sind nach abnehmender Helligkeit von links nach rechts angeordnet (obere und untere Reihe). Physikalisch ist jeder Streifen von gleichmäßiger Lichtintensität. In der oberen Reihe scheinen je zwei benachbarte Streifen durch eine klar sichtbare Kante voneinander getrennt zu sein, obwohl es diese in Wirklichkeit gar nicht gibt.

4.2.5 Phantombilder

In der Abbildung 4.5 sind viele mögliche Dreiecke zu sehen, obwohl keines vollständig gezeichnet ist. Diese Phantombilder werden nach ihrem Erfinder als KANIZSA-Dreiecke bezeichnet. Beide Bilder links und rechts zeigen, daß Phantomfiguren bei jeder Hintergrundfarbe sichtbar sind. Das große schwarze bzw. das weiße Dreieck scheint sich vom Hintergrund gleicher Farbe abzuheben. Das Wahrnehmungssystem faßt dabei die einzelnen Linienelemente zusammen, führt die Gruppierungen durch; schließlich werden Muster in Figur und Hintergrund strukturiert. In diesem Fall werden Konturen wahrgenommen, obwohl im Netzhautbild keine scharfe Hell-Dunkel-Grenze vorliegt.

4.3 Synergetik, Mustererkennung und Soft Computing

Die Synergetik beschäftigt sich mit Vielteilchensystemen weitab vom Wärme-gleichgewicht. Dabei wird das Systemverhalten beim kontrollierten Übergang

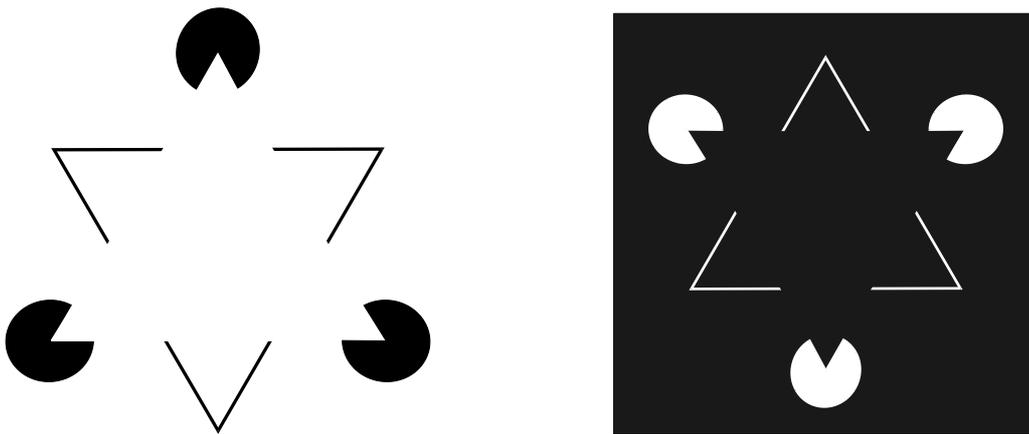


Abb. 4.5: KANIZSA-Dreiecke (1976)

in eine Instabilität, verursacht durch externe Kontrollparameter, untersucht. Die wechselwirkenden Systembestandteile auf mikroskopischer oder mesoskopischer Ebene können beispielsweise Laseratome oder Neuronen sein. Diese Systeme haben die Fähigkeit zur Strukturbildung (Musterbildung), realisiert in einer spontanen *Selbstorganisation*. Das Konzept der Ordnungsparameter und das Versklavungsprinzip erwies sich dabei als ein interdisziplinär erfolgreiches Mittel der Systembeschreibung in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen – von der Physik bis zur Psychologie. Die sich auf den Systemebenen konstituierenden Ordnungsparameter, manchmal ist es nur einer, versklaven die Systembestandteile. Der Ordnungsparameter bestimmt schließlich die sich makroskopisch herausbildende Struktur. Ordnungsparameter können ein elektrisches Feld (Laser) oder eine relative Phase (Gehirndynamik) sein.

Das bekannte BENARD-Experiment ist das Standardbeispiel der Synergetik für *spontane Strukturbildung*. Das BENARD-System wird beim Überschreiten eines kritischen Wertes des Ordnungsparameters, hier der Temperaturdifferenz, instabil und kann Bistabilität zeigen, den Übergang von der makroskopischen Homogenität zum bistrukturellen (unterschiedliche Drehrichtungen der Rollen) makroskopischen Rollenmuster (zwei verschiedene strukturelle Systemmöglichkeiten) realisieren. Die Symmetrie wird über die Anfangsbedingungen oder die Fluktuationen gebrochen, so daß einer der beiden Zustände entsteht. Solche multistabilen Systeme besitzen die Eigenschaft, unvollständig ausgebildete Muster zum ähnlichsten ihrer inhärent gegebenen zu vervollständigen. Das kann man z. B. durch Computersimulation der Zeitentwicklung des Systems darstellen. Das System arbeitet wie ein assoziativer Speicher: Unvollständige

Information wird ergänzt; eine eindeutige Zuordnung findet statt. Das multistabile System kann in ein monostabiles System verwandelt werden. Diese Erfahrungen mit der Evolution solcher Systeme induzierten intuitiv eine Analogie zwischen Musterbildung und Mustererkennung. Im oben beschriebenen Sinne kann die Mustererkennung als Musterbildung aufgefaßt werden. In diesem Fall der Mustererkennung werden Merkmale ergänzt, genauer, es bilden bereits teilweise bekannte Merkmale ihren Ordnungsparameter, welcher die weiteren Merkmale ergänzt. Im Falle der Musterbildung bilden bereits geordnete Teilsysteme ihren Ordnungsparameter, dieser wirkt wiederum auf das System zurück und ordnet weitere Teilsysteme. Diese Analogie bildet auch die Grundlage des synergetischen Computers. Der synergetische Computer ist als neuronales Netz interpretierbar und wird so zu einem Teilgebiet des Soft Computing. Eine Analyse der Musterbildungsprozesse zeigt nämlich, daß sie im allgemeinen durch die Attraktor- und Gradientendynamik beschrieben werden können.

So gilt für das BENARD-Problem folgende *Ordnungsparametergleichung*:

$$\dot{\xi}_{k_c} = \epsilon \xi_{k_c} - \left(\sum_{k'_c \neq k_c} A \xi_{k'_c}^2 + C \xi_{k_c}^2 \right) \xi_{k_c}.$$

Diese Bewegung kann als eine überdämpfte Bewegung in einem Potential V interpretiert werden:

$$\dot{\xi}_{k_c} = - \frac{\partial V}{\partial \xi_{k_c}}$$

mit

$$V = - \frac{\epsilon}{2} \sum_{k_c} \xi_{k_c}^2 + \frac{A-C}{4} \sum_{k_c} \sum_{k'_c} \xi_{k_c}^2 \xi_{k'_c}^2 + \frac{C}{4} \left(\sum_{k_c} \xi_{k_c}^2 \right).$$

Das Potential hat so viele Minima, wie das System inhärente Muster besitzt. Diese werden durch die Ordnungsparameter repräsentiert. In einem dynamischen, evolutionären Prozeß wird eines der Minima angenommen.

In Analogie dazu gelang H. HAKEN, die Mustererkennungsdynamik des synergetischen Computers aufzustellen. Auch diese kann als eine überdämpfte Bewegung in einem multistabilen Potentialgebirge interpretiert werden. Das Potential hat folgende Form:

$$V = - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \lambda_k \langle \vec{v}_k^T \cdot \vec{q} \rangle + \frac{B}{4} \sum_{k,k'=1}^M \langle \vec{v}_{k'}^T \cdot \vec{q} \rangle \langle \vec{v}_k^T \cdot \vec{q} \rangle + \frac{C}{4} \langle \vec{q}^T \cdot \vec{q} \rangle.$$

\vec{q} repräsentiert das angebotene Testmuster, z. B. die Grauwerte eines Bildes, als N -komponentigen Merkmalvektor. Das Vorhandensein von stabilen Lösungen

nur an bestimmten Stellen ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den üblichen neuronalen Netzen, bei denen ungewollte Geisterbilder auftreten können. Das sind Zustände oder Lösungen des Systems, die nicht mit einem gelernten Muster übereinstimmen.

Schreibt man den Potentialausdruck ein wenig um, dann erhält man eine Gleichung, die dieselbe Struktur wie die Ordnungsparametergleichung des BENARD-Problems der Hydrodynamik hat. Da im allgemeinen die Musteranzahl M sehr viel kleiner ist als die Komponentenanzahl N der Mustervektoren, ergibt sich eine enorme Reduktion der Freiheitsgrade. Damit erhält man beim synergetischen Computer eine typische Netzwerkstruktur.

Bei den üblichen neuronalen Netzen von MC CULLOCH, PITTS und HEBB wird deren Netzwerkstruktur zur Lösung eines bestimmten Problems meist mit „trial and error“-Prozeduren erzeugt. Dabei ist anfänglich nicht klar, wieviel Ebenen mit wieviel Neuronen zu besetzen sind. Diesem „bottom up“-Zugang steht der „top down“-Zugang des synergetischen Computers gegenüber. Bei diesem Computer ist die Anzahl der Ebenen, die Anzahl der Neuronen auf den Ebenen und deren Verknüpfungen durch die Bewegungsgleichungen festgelegt. Diese Bewegungsgleichungen resultieren im allgemeinen aus einem problemspezifischen minimalisierten Funktional, z. B. dem Energiefunktional. Bei den o. g. neuronalen Netzen sind die Neuronen binär kodiert, und die Transferfunktion realisiert die Schaltung zwischen den Zuständen. Beim synergetischen Computer sind hingegen die Neuronen analog arbeitende Einheiten, zwischen denen die Umschaltung durch eine schwache (verglichen mit der Transferfunktion) Nichtlinearität erreicht wird. Während die Neuronen bei den neuronalen Netzen nur addieren können, können sie beim synergetischen Computer darüber hinaus auch Multiplikationen ausführen.

Neuerdings sind auch Hybridlösungen bekannt geworden. Die Muster müssen im allgemeinen gelernt werden, mit oder ohne einen Lehrer. Sind die zu klassifizierenden Muster nicht bekannt, so müssen sie ohne die Hilfe eines Lehrers gelernt werden. Die zu lernenden Muster werden dann zufällig angeboten; die freien Parameter eines Potentials werden durch eine Gradientendynamik des minimalisierten Energiefunktionals bestimmt und die Klassenbildung der Muster durch eine Biorthogonalisierung erreicht.

Mit dem synergetischen Computer kann man natürlich solche Wahrnehmungstäuschungen analysieren und simulieren; damit ist der Zusammenhang mit dem Soft Computing wieder hergestellt.

4.4 Synergetischer Computer, Mustererkennung und die Korrespondenzprobleme

Korrespondenzprobleme sind wesentlich für die Bildbearbeitung, insbesondere die richtige Zuordnung oder Korrespondenz entsprechender Bildpunkte in ähnlichen Bildern. Dabei hängt die Güte der Zuordnung stark von einer Definition der Bildmerkmale und des Ähnlichkeitsmaßes ab.

Auch die Mustererkennung ist ein einfaches *Korrespondenz-* oder *Zuordnungsproblem*. Aus einem Satz gespeicherter (gelernter) Prototypmuster soll das ähnlichste zu einem vorgegebenen Muster gefunden werden. Der synergetische Computer stellt hierfür ein dynamisches Modell dar. Mit der entsprechenden analog arbeitenden Hardware kann das Zuordnungsproblem in paralleler Weise gelöst werden. Das wäre ein Startpunkt für die Nachbildung der extrem schnellen Bildverarbeitung des visuellen Systems beim Menschen (siehe Abschnitt 4.2). Die Suche nach dem ähnlichsten Muster ist durch keine Bedingungen eingeschränkt, also völlig frei.

Die allgemeinen oder komplexen Korrespondenzprobleme umfassen mehrere durch Bedingungen verknüpfte Zuordnungsprobleme. Diese folgen direkt aus der konkreten Problemstellung und erfordern eine Kopplung unterschiedlicher Mustererkennungsdynamiken. Solche allgemeinen Korrespondenzprobleme treten bei der Stereoskopie oder der Berechnung des optischen Flusses auf. Ein dynamisches Modell zur parallelen Lösung allgemeiner Korrespondenzprobleme läßt sich am Beispiel der Stereoskopie erarbeiten. Die Problematisierung ist dabei am biologischen Vorbild orientiert. Insofern lassen sich die Kuriositäten der Wahrnehmung auch als Korrespondenzproblem auffassen. Korrespondenzprobleme kennt man auch beim Übergang zur Quantenoptik. Sie könnten für kuriose Wahrnehmungen interessant sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Haken, H.; Graham, R.: *Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken*. Umschau 6/71, S. 191–195
- [2] Reimann, D.: *Anwendung der Synergetik auf Korrespondenzprobleme wie die Stereoskopie*. Diss. Univ. Stuttgart, Verl. Shaker, Aachen 1995
- [3] Etymologisches Wörterbuch des Deutschen. Akad. Verl., Berlin 1993
- [4] Eisenberg, W.; et al. (Hrsg.): Synergie, Syntropie, Nichtlineare Systeme. Verl. im Wiss.-Zentrum, Leipzig. – H. 1. *Dynamik und Synergetik*, 1995