

# Formerhaltende sequentielle visuelle Aufmerksamkeit in columnar organisierten neuronalen Feldern\*

V. Stephan und H.-M. Gross

Technische Universität Ilmenau  
Fachgebiet Neuroinformatik  
D-98684 Ilmenau, Postfach 100565

{Volker.Stephan, Horst-Michael.Gross}@informatik.tu-ilmenau.de  
<http://cortex.informatik.tu-ilmenau.de>

**Zusammenfassung** Im Rahmen dieses Beitrags wird ein neurobiologisch motiviertes dynamisches Aufmerksamkeitssystem vorgestellt, das sich an nichtlinear rückgekoppelten neuronalen Feldern vom AMARI-Typ orientiert. Infolge einer Reihe struktureller und funktionaler Erweiterungen ist das columnar organisierte Aufmerksamkeitssystem in der Lage, eine formerhaltende sequentielle Separation einzelner Aufmerksamkeitsregionen vorzunehmen. Dies entspricht einer dynamischen Verlagerung der Aufmerksamkeit über einer statischen oder dynamischen Inputszene. Die Systemdynamik des columnaren Feldes wird anhand von Real-World-Szenen demonstriert, über denen es eine repetierende Sequenz zusammengehöriger Inputgruppierungen (Aufmerksamkeitsregionen) erzeugt, die entweder direkt an nachfolgende Verarbeitungsebenen weitergereicht werden oder den bottom-up Informationsfluß im Rahmen eines Gating-Netzwerkes dynamisch routen können.

## 1 Biologische Grundlagen und angestrebte Leistungen

Cortikale Systeme mit ihrer hohen Verarbeitungsflexibilität und Plastizität zeigen eine völlig andere funktionelle Organisation als die aus formalen Neuronen aufgebauten Neuronalen Standardnetzwerke. Sie können zwar ebenfalls als mehrschichtige Netze, Felder oder Karten betrachtet werden, bestehen aber nicht aus formalen Neuronen, sondern aus sehr komplexen, intern strukturierten, funktionellen Verbänden dynamischer Neuronen, die eine eigene lokale Systemdynamik im Netz entwickeln können. Als biologisches Vorbild für derartige cortikale „Verarbeitungsknoten“ dienen die sowohl in sensorischen als auch in assoziativen Cortexarealen vermuteten, aber bis heute noch immer kontrovers diskutierten, columnar organisierten Neuronenverbände, die von verschiedenen Autoren [1, 4, 5, 6, 9, 11] als die elementaren cortikalen Verarbeitungs-, Speicher- und Steuereinheiten angesehen werden.

---

\* Die Arbeiten sind Teil des von der DFG geförderten Projektes SEMRINT (Gr 1378/2-1) und des TMWFK-Projektes GESTIK.

Das in diesem Beitrag vorgestellte dynamische Aufmerksamkeitssystem orientiert sich ebenfalls an diesem columnaren Verarbeitungskonzept, wobei die Untersuchung und Modellierung eines spezifischen Teilaspektes der columnaren Funktionalität, der dynamischen Gruppierung des sensorischen Inputdatenstromes mit dem Ziel der sequentiellen Ausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit auf bedeutsame Bildstrukturen, im Vordergrund steht. Das System soll nacheinander Inputsegmente variabler Größe gruppieren und an nachfolgende Verarbeitungsebenen im Sinne einer Gating-Funktion weiterreichen. Dies entspricht vom Wesen einem cortical gesteuerten Segmentierungsprozeß.

Das dynamische Aufmerksamkeitssystem stellt ein columnar organisiertes neuronales Feld dar, das auf frühen eigenen Arbeiten [6] aufsetzt und das in [7] vorgestellte bisherige Modell unter dem Gesichtspunkt der formerhaltenden Gruppierungsdynamik deutlich weiterentwickelt [10].

## 2 Beschreibung der Modellarchitektur

Jede funktionelle Columne des zweidimensionalen Feldes (Abb. 1) analysiert zunächst im Rahmen datengetriebener Verarbeitungsprozesse einen aus ihrer Sicht lokalen Bereich der visuellen Szene nach auffälligen Bildstrukturen. Diese massiv parallele, sehr anwendungsspezifische Merkmalsextraktion ist nicht Gegenstand dieses Beitrages, wird jedoch zur Demonstration der Systemdynamik im Rahmen einer komplexen Szenenanalyse genutzt (siehe Abschnitt 3).

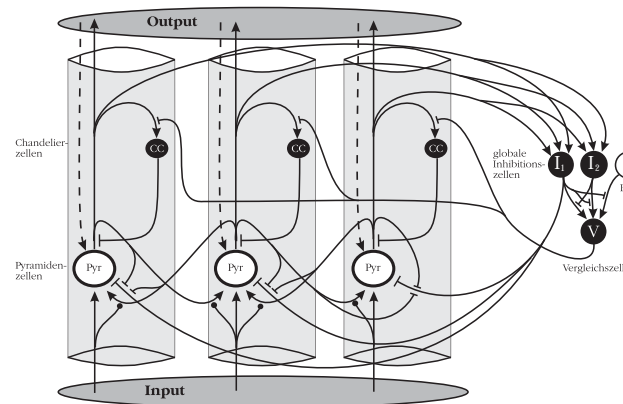


Abb. 1. Darstellung von drei für diese Verarbeitungsaufgabe stark vereinfachten Columnen aus dem zweidimensionalen columnaren Feld. Jede Columne besteht aus einer Pyramidenzelle und einer inhibitorischen Chandelierzelle, die Ausgaben aller Columnen werden von global operierenden Inhibitionszellen akkumuliert, welche unspezifisch inhibitorisch auf

das gesamte Feld rückwirken. Die top-down verlaufenden Steuereingänge (gestrichelt) sind für die Systemdynamik zunächst ohne Bedeutung, dienen aber einer perspektivischen wissensbasierten Beeinflussung der Aufmerksamkeitsprozesse.

Stark vereinfacht kann das columnare Feld als zweischichtiges neuronales Feld mit komplexen nichtlinearen Verarbeitungsprozessen charakterisiert werden, die sich durch eine nichtlineare neuronale Felddynamik nach [2] beschreiben lassen. Die Zustandsänderung  $\frac{d}{dt}z(\mathbf{r}, t)$  eines dynamischen Neurons, allgemein der Position  $\mathbf{r}$  im zweidimensionalen Gitter  $R$  zum Zeitpunkt  $t$ , kann in Anlehnung an

[8] durch folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\tau \frac{d}{dt} z(\mathbf{r}, t) = -z(\mathbf{r}, t) - h + \int_R w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') S[z(\mathbf{r}', t)] d^2 r' + x(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

$S[\cdot]$  ist eine positive sigmoide Funktion,  $\tau$  die Zeitkonstante der dynamischen Neuronen,  $h$  die globale Inhibition,  $x(\mathbf{r}, t)$  der Input und  $w(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$  die laterale Kopplung zwischen den einzelnen Neuronen in Form einer Mexican-Hat-Funktion. Da die Gruppierungsleistungen dieses Neuronenverbandes in dieser Art und Weise jedoch nicht formerhaltend bzgl. der visuellen Objekte in der Inputszene sind und keine sequentielle Verlagerung der Aufmerksamkeit möglich ist, wurden aufbauend auf den Arbeiten von [6, 7] verschiedene Modifikationen und Erweiterungen vorgenommen (siehe Abb. 1):

$$\begin{aligned} \tau^{Py} \frac{d}{dt} z_{Py}(\mathbf{r}, t) = & -z_{Py}(\mathbf{r}, t) \\ & - h \cdot (1 - y_{Py}(\mathbf{r}, t)) \cdot S \left[ \theta^{NB} - \int_R w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') y_{Py}(\mathbf{r}', t) d^2 r' \right] \\ & + \alpha_{NB} \cdot x(\mathbf{r}, t) \int_R w(\mathbf{r} - \mathbf{r}') y_{Py}(\mathbf{r}', t) d^2 r' + \alpha_I \cdot x(\mathbf{r}, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$\tau^{Py}$  ist die Dynamikzeitkonstante der Pyramidenzellen,  $z_{Py}$  deren Aktivierung,  $y_{Py}$  deren Ausgabe,  $S[\cdot]$  eine Sigmoidfunktion,  $\alpha_{NB}$  und  $\alpha_I$  skalare Faktoren,  $\theta^{NB}$  ein Schwellwert und  $w(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$  die laterale exzitatorische Kopplung zwischen benachbarten Neuronen innerhalb des Columnenverbandes. Der Vergleich mit Gleichung (1) zeigt folgende Modifikationen:

- Wichtung des Inputs  $x(\mathbf{r}, t)$  mit  $\alpha_I$  zur Steuerung des Einflusses des Inputs,
- Modulation der mit  $\alpha_{NB}$  gewichteten Umgebungsaktivität durch den Input  $x(\mathbf{r}, t)$  stellt sicher, daß sich die Aktivierungen der Pyramidenzellen nur in Regionen ausbreiten können, die von einem realen Input unterstützt werden,
- die Abschwächung der globalen Inhibition  $h$  durch die eigene Ausgabe  $y_{Py}(\mathbf{r}, t)$  (Disinhibition) stellt sicher, daß sich unterschiedlich große Pyramidenzellregionen unabhängig von der globalen Inhibition aktivieren können,
- die Disinhibition der globalen Inhibition durch die laterale Exzitation oberhalb der Schwelle  $\theta^{NB}$  stellt sicher, daß sich das Aktivierungsmuster auch über schwache Inputregionen ausbreiten kann, ohne aber explosionsartig zu diffundieren und damit die Forderung nach Formerhaltung zu verletzen.

Die Ausgabefunktion der Pyramidenzellen wird in (Gleichung 7) beschrieben. Zur Verhinderung einer Aktivitätsexplosion innerhalb des columnaren Feldes akkumulieren zwei globale Inhibitionszellen die Aktivierungen aller Pyramidenzellen, von denen eine als globale Inhibition  $h$  unspezifisch inhibitorisch auf das gesamte Feld zurückwirkt (Gleichungen 3, 4).

$$\tau_n^I \frac{d}{dt} z_I(n, t) = -z_I(n, t) + \int_R y_{Py}(\mathbf{r}', t) d^2 r' \quad (3)$$

$$h = y_I(1, t) = z_I(1, t) \quad (4)$$

Im Ergebnis der durch Gleichung 2 beschriebenen intercolumnaren Wechselwirkungsprozesse (lokale Kooperation in Verbindung mit globaler Konkurrenz) kann sich innerhalb des columnaren Feldes das lokal zusammenhängende Columnenareal mit der größten Wettbewerbsenergie durchsetzen und für eine bestimmte Zeit aus der Aktivitätsverteilung herausheben, wohingegen die konkurrierenden Regionen für diese Zeit weitestgehend unterdrückt werden.

In Erweiterung der AMARI-Dynamik werden die Pyramidenzellen der Columnen, die sich im Konkurrenzkampf innerhalb des Aufmerksamkeitssystems durchsetzen konnten, durch sehr spezifisch wirkende und zeitlich begrenzte interne Inhibitionsmechanismen für eine bestimmte Zeit deaktiviert. Im Modell erfolgt dies durch sogenannte Chandelierzellen (siehe Abb. 1), die nach Erreichen einer stabilen Pyramidenzellaktivität innerhalb der einzelnen Columnen durch eine hochgradig selektive und sehr wirksame axo-initiale Inhibition die zugehörigen Pyramidenzellen während dieser Zeit vollständig blockieren können.

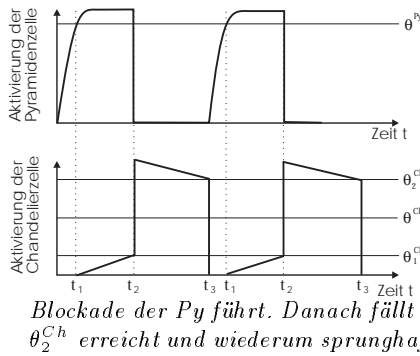
Zur Erkennung solcher stabiler Aktivierungszustände wird die Vergleichszelle genutzt, die von beiden Inhibitionszellen ihre Inputs erhält. Bei dynamisch instabilen Aktivitätsverteilungen im columnaren Feld besitzen die Inhibitionszellen aufgrund unterschiedlicher Trägheitszeitkonstanten ( $\tau_1^I < \tau_2^I$ ) voneinander abweichende Aktivierungen. Die Vergleichszelle wertet diese Abweichung aus und erlaubt den Chandelierzellen nur dann, die Aktivität der zugehörigen Pyramidenzellen zu akkumulieren, wenn im columnaren Feld stabile Aktivierungszustände erreicht sind. Als Kriterium dafür dienen annähernd gleiche Ausgaben der beiden Inhibitionszellen  $y_I(n, t)$  oberhalb eines Minimalwertes (Gleichung 5). Die Einführung dieser Schwelle war erforderlich, um kurzfristig stabile Zustände ohne eine eigentliche Pyramidenzellenaktivierung auszublenden.

$$\begin{aligned} \tau^V \frac{d}{dt} z_V(t) = & -z_V(t) + S[y_I(1, t) - y_I(2, t)] \\ & + S[y_I(2, t) - y_I(1, t)] + 1 - S[y_I(2, t)] \end{aligned} \quad (5)$$

Nur wenn die Vergleichszelle einen stabilen Zustand detektiert hat (Ausgangsaktivität nahe Null), können die Chandelierzellen innerhalb der Columnen aufgrund der spezifischen Verschaltung mit der Vergleichszelle (präsynaptische Modulation) beginnen, die Ausgabeaktivitäten ihrer jeweils korrespondierenden Pyramidenzellen oberhalb der Schwelle  $\theta^{Py}$  (Abb. 2) zu akkumulieren, wobei die Integrationskonstante  $c^{Ch}$  und die Trägheitszeitkonstante  $\tau^{Ch}$  von der eigenen Aktivität bezüglich der Schwellwerte  $\theta_1^{Ch}$  und  $\theta_2^{Ch}$  abhängen (Gleichung 6). Die Funktion  $S[\cdot]$  realisiert eine Sigmoidfunktion und  $c^{Int}$  eine weitere Integrationskonstante. Wenn eine Chandelierzelle die Aktivierungsschwelle  $\theta^{Ch}$  überschreitet, so wird deren zugehörige Pyramidenzelle mittels der genannten axo-initialen Blockade zeitlich befristet abgeschaltet (Gleichung 7).

$$\tau^{Ch} \frac{d}{dt} z_{Ch}(\mathbf{r}, t) = (c^{Int} - 1)z_{Ch}(\mathbf{r}, t) + c^{Ch} S[y_{Py}(\mathbf{r}, t) - \theta^{Py}](1 - y_V(t)) \quad (6)$$

$$y_{Py}(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} S[z_{Py}(\mathbf{r}, t)] : z_{Ch}(\mathbf{r}, t) < \theta^{Ch}; \\ 0 : sonst \end{cases} \quad (7)$$



**Abb. 2.** Das zeitliche Wechselspiel zwischen Pyramiden- (Py) und Chandelierzelle (Ch) einer Columne zeigt, daß die Ch erst dann Aktivierung akkumuliert, wenn die Py die Schwelle  $\theta^{Py}$  überschreitet ( $t_1$ ). Erreicht die Ch-Aktivierung die Schwelle  $\theta_1^{Ch}$ , steigt ihre Aktivierung aufgrund veränderter Integrationszeitkonstanten sprunghaft auf ihren Maximalwert ( $t_2$ ). Dabei wird auch die Schwelle  $\theta^{Ch}$  überschritten, welche zur Blockade der Py führt. Danach fällt die Ch-Aktivierung langsam ab, bis Schranke  $\theta_2^{Ch}$  erreicht und wiederum sprunghaft der Minimalwert angenommen wird ( $t_3$ ) [3].

Innerhalb des Intervalles  $\theta_1^{Ch} \dots \theta_2^{Ch}$  arbeiten die Chandelierzellen mit kleinen Trägheiten und großen Integrationskonstanten, um das Wegschalten der zugehörigen Pyramidenzellen einer Feldregion möglichst synchron zu realisieren.

Diese zeitlich befristete Inaktivierung der zuletzt aktiven Columnen ermöglicht infolge der nichtlinearen Felddynamik die Aktivierung der nächsten wettbewerbsstärksten Region im Feld und führt so zu einer Verschiebung der Aufmerksamkeit innerhalb des columnaren Feldes auf die nächste Objektregion, die wieder formerhaltend gruppiert wird.

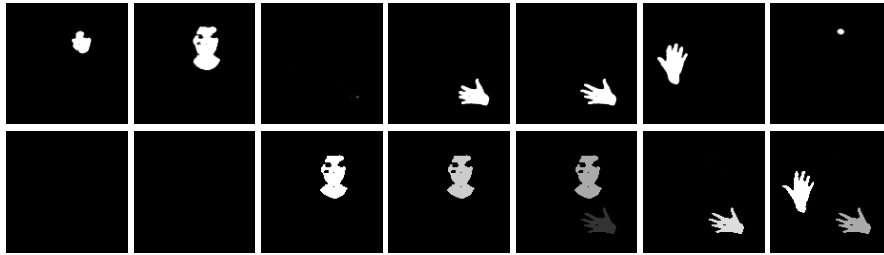
### 3 Simulationsergebnisse

Wie bereits erwähnt, wurde zur Untersuchung der Systemdynamik und der Gruppierungs- und Gatingeigenschaften von vornherein auf eine reale Aufgabenstellung im Rahmen einer farbbasierten Szenenanalyseaufgabe orientiert. Dazu wurden dem columnaren Aufmerksamkeitssystem neuronale Merkmalsdetektoren zur farbbasierten Erkennung von Haut [3] vorgeschaltet, die jedem Pixel der Inputszene eine Hautzugehörigkeitswahrscheinlichkeit zuordnen (Abb. 3).



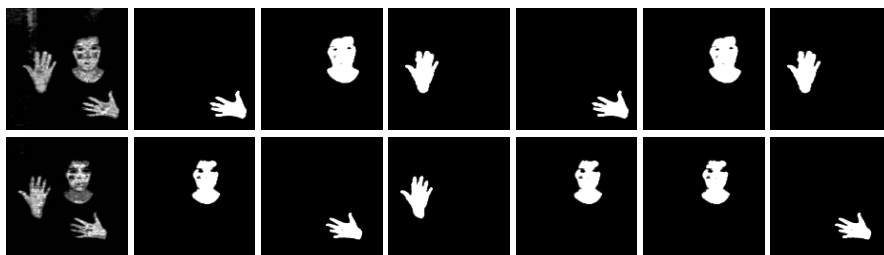
**Abb. 3.** Grauwertbild der zu analysierenden Farbszene (links) und Ergebnis der Farbpixelbewertung eines neuronalen Hautdetektors (rechts). Das Hypothesenbild wird dem columnaren Feld zur formerhaltenden sequentiellen Aufmerksamkeit präsentiert.

Die Darstellung zeigt, daß Hautregionen durch die problemspezifische Merkmalsextraktion durch relativ hohe Zugehörigkeitswerte gekennzeichnet sind und somit als helle aber recht inhomogene Flächen, sogenannte lokale Hypothesengebirge, erscheinen. Die vorverarbeitete Szene wird dem columnaren Feld als statischer Input präsentiert, die intrinsische Dynamik des Columnenverbandes bewirkt die erwünschte formerhaltende sequentielle Separation der einzelnen Hautregionen als Aufmerksamkeitsregionen (Abb. 4).



**Abb. 4.** Die Draufsicht auf die Pyramidenzellenaktivierungen (obere Zeile) und die zugehörigen Chandelierzellenaktivierungen (untere Zeile) des columnaren Feldes zeigt, daß beginnend mit der energiereichsten Hautregion (größte Ausdehnung bzw. sicherste Hypothesen) nacheinander alle Hautregionen weitestgehend formerhaltend und homogen präsentiert werden (Darstellung der Aktivitätsverteilungen nach jeweils 100 Simulationsschritten).

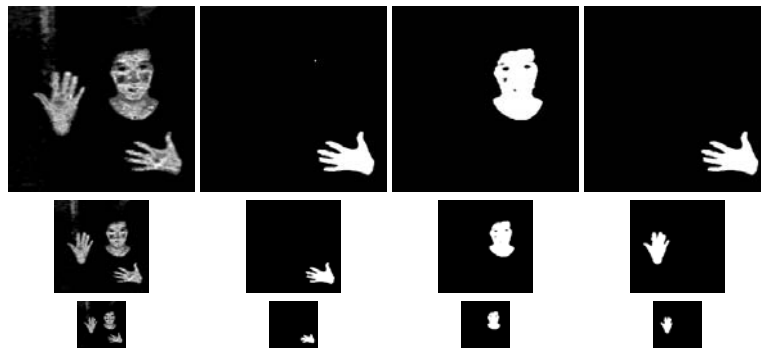
Es ist deutlich erkennbar, daß das columnare Feld zunächst die Hautregion mit der höchsten Energie homogen und formerhaltend ausprägt und für eine gewisse Zeit stabilisiert. Wenn die Chandelierzellen in dem entsprechenden Areal genügend Pyramidenzellenaktivierungen akkumuliert haben, werden die zugehörigen Pyramidenzellen für eine bestimmte Zeit inhibiert, so daß der Konkurrenzprozeß erneut starten und das Hypothesengebirge mit der zweithöchsten Wettbewerbsenergie selektiert werden kann. Dies entspricht einer Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit, wobei im Gegensatz zu [7] nicht nur das Zentrum eines Aufmerksamkeitsfensters einer bestimmten Größe sequentiell verschoben wird, sondern sich die Aufmerksamkeitsregion infolge der formerhaltenden dynamischen Wechselwirkungsprozesse den Objektspezifika in der Szene anpaßt. Diese Architektur zeichnet sich gegenüber bekannten Aufmerksamkeitssteuerungen durch die Integration von Formerhaltung, Selektion und Sequentialität des Gruppierungsprozesses unter Berücksichtigung biologischer Gegebenheiten aus. Das columnare Feld erzeugt eine repetierende Sequenz zusammengehöriger Bildregionen, die entweder direkt an nachfolgende Verarbeitungsebenen weitergereicht werden oder den bottom-up Informationsfluß im Rahmen eines Gating-Netzwerkes dynamisch routen können.



**Abb. 5.** Unter Nutzung der Vergleichszelle als Trigger für eine stabile Columnenaktivität werden für zwei Inputszenen nacheinander die kurzfristig stabilisierten und formerhaltend ausgebildeten Aufmerksamkeitsregionen dargestellt. Die untere Zeile zeigt eine Mehrfachselektion einer Hautregion, welche aufgrund eines stabilen Zwischenzustandes der Pyramidenzellenaktivierungen hervorgerufen wurde.

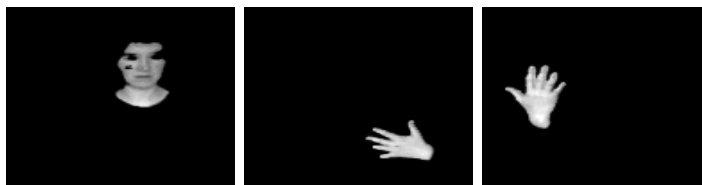
Die Anzahl der benötigten Simulationsschritte bis zur vollständigen Herausbildung einer zusammenhängenden Aufmerksamkeitsregion hängt von deren Flächenausdehnung und Wettbewerbsenergie ab, ist somit variabel und nicht bekannt. Ein nachgeschaltetes Verarbeitungssystem sollte jedoch darüber informiert werden, ob das in der Pyramidenzellebene des columnaren Feldes generierte Aktivitätsmuster ein abgeschlossenes Gruppierungsergebnis oder einen noch instabilen Zwischenzustand darstellt. Durch Nutzung der Vergleichszellenausgabe kann ein derartiges Stabilitätskriterium für weiterverarbeitende Strukturen abgeleitet werden (Abb. 5).

Trotz der recht komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Neuronen ist dieser Neuronenverband sehr robust gegenüber unterschiedlichen Bildauflösungen und somit auch gegenüber variierenden Netzwerkgrößen (Abb. 6).



**Abb. 6.** Auch bei unterschiedlichen Bildauflösungen (oben:  $256 \times 256$ , mitte:  $128 \times 128$ , unten:  $64 \times 64$  Pixel) liefern die neuronalen Felder der entsprechenden Größe sequentiell separierte Gruppierungsergebnisse, die formerhaltend mit den zugrundeliegenden Hautregionen korrespondieren.

Die dynamisch gruppierten Aufmerksamkeitsregionen können direkt dazu genutzt werden, um weitere sensorische Informationen aus den Aufmerksamkeitsregionen innerhalb der Inputszene zu nachfolgenden Verarbeitungsebenen weiterzuleiten, indem das Aktivitätsmuster der Columnen direkt als Gatingmuster für präsynaptische Modulationsprozesse verwendet wird (Abb. 7).



**Abb. 7.** Die Nutzung der sequentiellen Gruppierungsergebnisse als Gatingmuster liefert Grauwertbilder, auf denen ausschließlich einzelne Bildregionen vollständig und formgetreu erscheinen und als detaillierter Input für nachgeschaltete höhere Verarbeitungsstrukturen dienen können. Anwendungen dazu sind in [3] beschrieben.

## 4 Ausblick und weiterer Einsatz

Die bislang nur datengetriebene Selektionsdynamik innerhalb des Aufmerksamkeitssystems kann durch gezielte, topografisch präzise, top-down Modulation von übergeordneten Verarbeitungsebenen direkt beeinflusst werden (siehe Abb. 1). Dadurch kommt es zu einer komplexen Überlagerung datengetriebener und wissensbasierter Aufmerksamkeitsprozesse, in deren Verlauf nacheinander auch Hypothesen über der visuellen Szene abgetestet werden können.

Aufgrund der frei parametrisierbaren inter- und intracolumnaren Wechselwirkungen ist diese Architektur potentiell in der Lage, ein sehr breites Spektrum von aufmerksamkeitssensitiven Segmentationsleistungen zu erbringen. So ist das beschriebene columnare Feld mit nur geringfügigen Modifikationen in der Lage, eine Kombination aus Gating und Tracking sich bewegender Bildregionen zu realisieren, wodurch beispielsweise auch mehrere sich bewegende Objekte nacheinander jeweils für eine bestimmte Zeit dynamisch fokussiert und verfolgt werden können. Diese Untersuchungen sind Gegenstand laufender Arbeiten.

## Literatur

1. **Alexandre, F., Guyot, F., Haton, J.-P., Burnod, Y.** The Cortical Column: A New Processing Unit. *Neural Networks*, 4 (1991) 15-25.
2. **Amari, S.:** Dynamics of Pattern Formation in Lateral-Inhibition Type Neural Fields. *Biological Cybernetics*, 27 (1997) 77-87.
3. **Brakensiek, A. et al.** Farb- und strukturbasierte neuronale Verfahren zur Lokalisation von Gesichtern in Real-World-Szenen. In: *Proc. 19. DAGM -Symposium Mustererkennung*, 1997.
4. **Burnod, Y.** An Adaptive Neural Network: the cerebral cortex. Masson, Paris, 1990.
5. **Edelman, G. M.:** Group Selection and Phasic Reentrant Signalling: A Theory of Higher Brain Function. In *The Mindful Brain: Cortical Organization and the Group - Selective Theory of Higher Brain Function.*, pp. 51-100, MIT Press 1987.
6. **Gross, H.-M.:** Simulation eines Arrays corticaler Prozessoren zur inhaltsgesteuerten parallelen Informationsverarbeitung nach dem Vorbild des primären visuellen Cortex. *Dissertation TH Ilmenau*, 1989.
7. **Gross, H.-M. et al.** A Hierarchical Neural Network for Data Driven and Knowledge Controlled Selective Visual Attention. In *Proc. 14. DAGM-Symposium Mustererkennung, 1992*, 341-346, Informatik-Aktuell, Springer 1992.
8. **Kopecz, K.** Neural Field Dynamics Provide Robust Control Attentional Resources. In *Proc. Workshop „Aktives Sehen in technischen und biologischen Systemen“*, Hamburg 1996, 137-144, infix 1996.
9. **Le Vay, S., Nelson, S.B.** Columnar organization of the visual Cortex. In *Vision and Visual Dysfunction*, Vol.IV, Macmillan Press LTD, 1991.
10. **Stephan, V.** Vision-basierte Ansätze für ein selbstorganisierendes Explorationsverhalten eines mobilen Miniaturroboters in einer Labyrinthwelt. *Diplomarbeit TU Ilmenau, FG Neuroinformatik*, 1996.
11. **Szentagothai, J.** Theorien zur Organisation und Funktion des Gehirns. *Naturwissenschaften*, 1985, S.303-309.



Dieser Artikel wurde mit dem  $\text{\LaTeX}$  Makro-Paket und dem LLNCS-Style formatiert.