

# Wachstum von neuronalen Strukturen innerhalb eines zellularen Automaten

**Prof. Dr. Felix Gers**

Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VI - Informatik und Medien

## **Kurzfassung:**

Wir schlagen ein neues genetisches Wachstumsmodell für den traditionellen CoDi Zellularautomaten zur Simulation von spikenden neuronalen Netzen vor. Mit dem neuen Modell lassen sich biologische Neuronenmorphologien realitätsnah erzeugen. Die Ergebnisse werden mit realen Neuronen aus einer biologischen Datenbank verglichen. Das neue Wachstumsmodell wird in Bezug auf die Anwendbarkeit von evolutionären Algorithmen diskutiert.

## **Abstract:**

We propose a new genetic growth model for the traditional CoDi cellular automaton for the simulation of spiking neural networks. With the new model biological neuron morphologies can be produced close to reality. The results are compared to real neurons from a biological database. We discuss the new growth model with respect to the applicability of evolutionary algorithms.

## **Einleitung**

Mit dem CoDi zellular Automaten können neuronale Strukturen innerhalb eines zellulären Raums wachsen und deren Funktionsweise simuliert und analysiert werden [Ger 97]. Zur Optimierung der Strukturen in Bezug auf eine gewünschte Funktionalität werden diese mit evolutionären Techniken optimiert [Hou 99], [Sch 04].

In der hier vorgestellten Arbeit wird der Wachstumsprozess so modifiziert, dass die entstehenden zellulären Strukturen biologischen Neuronen ähnlich sind. In den bisherigen Arbeiten zu CoDi spielte die biologische Plausibilität in Bezug auf die erzeugten neuronalen Strukturen eine untergeordnete Rolle. Bei Arbeiten mit biologischem Fokus wiederum, wachsen die neuronalen Strukturen nicht in diskreten zellulären, sondern in reellwertigen Räumen. In einem solchen Ansatz von Cuntz werden, um einen Neuronenkern als Zentrum, Verzweigungspunkte zufällig im Raum verteilt und schrittweise zu Axon- oder Dendritenbaum verbunden [Cun 10]. Wir werden im Folgenden zunächst den traditionellen CoDi Automaten beschreiben und dann den neuen Wachstumsalgorithmus vorstellen.

## **Der CoDi Zellularautomat**

Um Zellularautomaten auf paralleler Hardware ausführen zu können, ist es wichtig den Speicherbedarf der einzelnen Zellen möglichst gering zu halten. Der traditionelle zwei-dimensionale (2D) CoDi Zellularautomat benötigt in seiner „1-Bit-Sigan!“ Implementierung 17 Bit für die Wachstums- sowie für die Arbeitsphase der neuronalen Strukturen [Ger 97]. Dabei bestehen elektrische Signale, wie Spikes oder Membranpotentiale, jeweils nur aus einem Bit. Die Zellen des Automaten interagieren jeweils mit den vier direkt angrenzenden Nachbarzellen. Der Automat arbeitet mit vier grundlegenden Zelltypen:

- Leere Zeilen repräsentieren ungenutzten Raum. Sie nehmen nicht an der Interaktion teil.
- Neuronenkerne bestehen aus einer Zelle. Sie summieren elektrische Signale von den umliegenden Dendriten-Zellen und geben beim Erreichen eines Schwellwertes ein Spike-Signal an die anliegende Axon-Zelle weiter.
- Axon-Zellen verteilen Spikes, die von dem zugehörigen Neuronenkern herrühren, entlang des Axon-Baums an angrenzende Dendriten-Zellen.
- Dendriten-Zellen sammeln und vereinigen Spikes von benachbarten Axon-Zellen und leiten diese an den zugehörigen Neuronenkern weiter.

Diese Zellinteraktionen decken alle vorkommenden Fälle ab. Prinzipiell werden Spikes in Neuronenkern-Zellen erzeugt, entlang von Axon-Zellen abgeleitet und über Dendriten-Zellen an verbundenen Neurone übertragen. Dort werden sie als Membranpotential summiert und führen beim Überschreiten eines Schwellwerts zu einem neuen Spike. Der CoDi Automat lässt sich zweidimensional oder in einem dreidimensionalen (3D) Zellraum betreiben.

### Das Wachstum der Neuronalen Strukturen

Das Wachstum der neuronalen Strukturen im CoDi Automaten basiert auf einem, sich über den ganzen zellularen Raum erstreckenden, Gen. Jede Zelle des Automaten enthält einen Teil der genetischen Information auf deren Basis die neuronalen Strukturen, ausgehend von den Zellen mit Neuronenkernen, wachsen. Die genetischen Informationen sind Anweisungen von der Form: verzweige nach oben, verzweige nach rechts oder wachse geradeaus, etc. In Abbildung 1 ist der zelluläre Raum eines CoDi Automaten nach dem Abschluss der Wachstumsphase zu sehen.

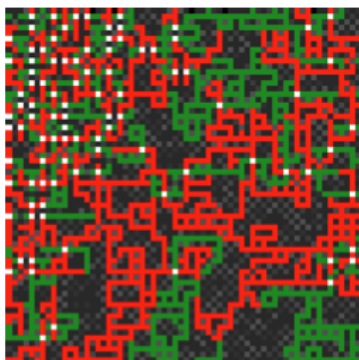


Abbildung 1: Der zweidimensionale CoDi Zellularautomat am Ende der Wachstumsphase mit Neuronenkernen in Weiß, Axon-Zellen in Rot und Dendriten-Zellen in Grün. Der leere Raum ist schwarzgrau abhängig von der lokalen genetischen Formation eingefärbt.

Das Wachstum des CoDi Automaten ist vollständig deterministisch. Das hat den Vorteil, dass man die neuronalen Strukturen mittels eines evolutionären Algorithmus optimieren kann. Allerdings weisen die so entstehenden Neurone wenig Gemeinsamkeit mit biologischen Neuronen auf. Abbildung 2 zeigt zum Vergleich Neurone des Menschen beziehungsweise des Makak-Affen. Sie entstammen der Neumorph.org Datenbank, in der die Morphologien von Neuronen verschiedener Spezies, kategorisiert nach Typen und Gehirnanlagen in denen sie vorkommen, zusammengetragen werden. Bei den Dendriten der dargestellten Pyramidenneuronen sind die Basalen (grün) für die eher lokalen und die Apikalen (magenta) für die weiter reichenden Verbindungen verantwortlich. Axon und Dendrit weisen baumartige Strukturen auf, die sich in ihrer Ausprägung je nach Typ des Neurons erheblich unterscheiden. Aber auch innerhalb eines Typs, wie bei den Pyramidenneuronen in Abbildung 2 zu sehen, weisen die Verzweigungsstrukturen bei Axon und Dendriten deutliche Unterschiede auf.

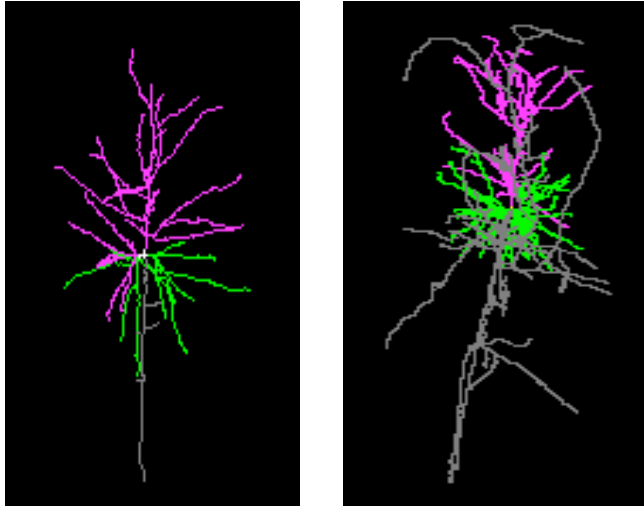


Abbildung 2: Pyramidenneuron im Neocortex aus der NeuroMorpho.Org Datenbank [Asc 07]. Der Neuronenkern ist in weiß, der Dendritenbaum ist in grün (basal) und in magenta (apical) und das Axon ist in grau dargestellt. Links: Mensch, NeuroMorpho.Org ID: NMO\_06204 [Vuk 02]. Rechts: Makak, NeuroMorpho.Org ID: NMO\_01911 [Gon 04].

### Probabilistisches Wachstumsmodell

Sollen innerhalb des Zellularautomaten neuronale Strukturen wachsen, die den Biologischen ähnlich sind, muss das Wachstumsmodell und die genetische Kodierung entsprechend verändert werden. Eine Zelle auf einem wachsenden Ast einer Struktur sollte davon Kenntnis haben an welcher Stelle und in welcher Verschachtelungstiefe sie sich befindet. In diesem Kontext wird dann die genetische Information interpretiert.

Bezogen auf das Wachstum eines Axons oder eines Dendriten im Zellularautomaten muss die Zelle an der Spitze eines Astes das Genom kontextabhängig in Verzweigungsanweisungen umsetzen. Im Gegensatz zum verteilten Genom des traditionellen CoDi Automaten enthält diese Zelle ein Wachstumssignal mit den gesamten Genom und den Kontext innerhalb der zu erzeugenden in Struktur. Um den Speicherbedarf dennoch gering zu halten, besteht das Genom aus wenigen Parametern, die das Wachstum steuern. Die Parameter entsprechen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einer Verzweigung oder dem Ende des Wachstums auf einem Ast. Es handelt sich also um ein probabilistisches, das heißt wahrscheinlichkeitsgesteuertes, Wachstum. Ein Wachstumssignal für eine Zelle enthält, unabhängig von dessen Zelltyp (Neuronenkern, Axon oder Dendrit) ein Genom mit den gleichen Parametern:

- Den initiale Vorwärtsvektor  $\mathbf{f}$
- Die Wahrscheinlichkeit  $\mathbf{b}$  zu verzweigen
- Den Offset  $\mathbf{o}$  bis zur ersten Verzweigung des Hauptstrangs
- Den minimalen Abstand  $\mathbf{m}$  zwischen zwei Verzweigungen
- Die Wahrscheinlichkeit  $\mathbf{s}$  das Wachstum zu beenden
- Die minimale Länge  $\mathbf{h}$  des Hauptstrangs
- Die minimale Länge  $\mathbf{a}$  eines Astes

Dabei werden Offsets und Abstände in Zellen des Automaten gemessen. Zusätzlich zu den genetischen Parametern, enthält das Wachstumssignal Informationen über den lokalen Status der Gesamtstruktur: den aktuellen Vorwärtsvektor, die Entfernung zum Neuronenkern, die Länge des aktuellen Astes und die Entfernung zum letzten Verzweigungspunkt.

Der aktuelle Vorwärtsvektor gibt für den Neuronenkern die Richtung des Axons an. Der Vorwärtsvektor enthält die Wahrscheinlichkeiten in jeweils eine der drei Raumrichtungen zu wachsen. Er gibt damit statistisch die Wachstumsrichtung der Axon- und Dendriten-Hauptstränge vor. Während des Wachstums wird er in den Ästen beim Verzweigen von Zelle zu Zelle modifiziert. Dabei wird der initiale Vorwärtsvektor überschrieben, so dass kein

zusätzlicher Speicherplatz notwendig ist. Insgesamt enthält ein Genom 7 Parameter pro Zelltyp, wovon der Vorwärtsvektor mit drei Dimensionen vektoriell ist. Diese können insgesamt mit 9 Byte realisiert werden. Für unterschiedliche Neuronentypen sind die genetischen Parameter jeweils so anzupassen, dass die dafür charakteristische Morphologie erzeugt wird.

### Implementierung als dünnbesetzter und ereignisgesteuerter Zellularautomat

Die neuronalen Strukturen belegen nur einen kleinen Teil des zur Verfügung stehenden zellulären Raums. Ein großer Teil der Zellen bleibt leer. Daher kann der CoDi Zellularautomat dünnbesetzt (engl. sparse) implementiert werden. Als praktische Umsetzung kann man die nicht leeren Zellen beispielsweise in verketteten Listen oder Hash-Tabellen speichern.

Nur dort wo sich ein Wachstumssignal oder ein elektrisches Signal befindet müssen Zellinhalte aktualisiert werden. Diese Art der Implementierung wird von [YiB 96] als ereignisgesteuert beschrieben. Beim CoDi Automaten ist die Anzahl der Signale um etwa zwei Größenordnungen kleiner als die der Zellen, welche durch die neuronale Struktur belegt werden. Mit einer ereignisgesteuerten Implementierung lässt sich daher die Rechenzeit im gleichen Maß reduzieren.

### Ergebnisse

Zwei probabilistisch in einem 3D CoDi Zellularautomaten gewachsene Neuronen mit unterschiedlichen Genomen zeigt Abbildung 3. Dabei wurde nicht zwischen basalen und apikalen Dendriten unterschieden. Der in grün dargestellte Dendritenbaum und das in magenta eingefärbte Axon entspringen auf gegenüberliegenden Seiten des Neuronenkerns.

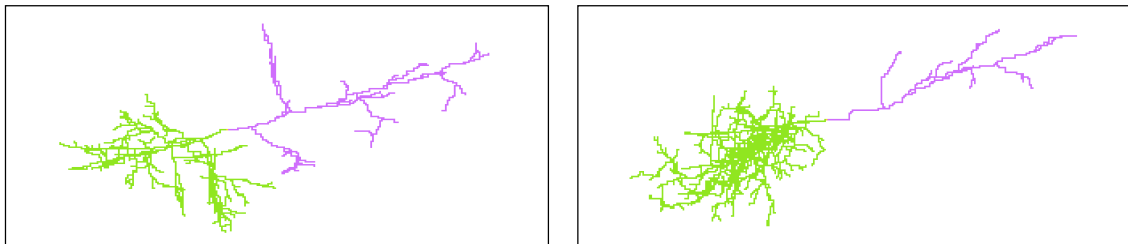


Abbildung 3: In einem CoDi Zellularautomaten gewachsene Neuronen mit  $f=(0.7,0.3,0)$  und sonst unterschiedlichem Genom. Links: Axon( $b=0.2, o=10, m=15, s=0.1, h=300, a=20$ ), Dendrit( $b=0.7, o=1, m=10, s=0.1, h=80, a=30$ ). Rechts: Axon( $b=0.2, o=40, m=20, s=0.1, h=300, a=20$ ), Dendrit( $b=0.8, o=1, m=10, s=0.1, h=100, a=40$ ).

Bei dem Neuron auf der rechten Seite in Abbildung 3 ist die Wahrscheinlichkeit auf dem Dendriten zu verzweigen höher und dessen Äste sind länger. Demensprechend dichter ist die gewachsene Struktur. Auf dem Axon auf der linken Seite hingegen, beginnen die Verästelungen weiter vorne auf dem Hauptstrang und deren minimaler Abstand ist geringer als bei dem Neuron auf der rechten Seite.

### Diskussion

Die herkömmliche genetische Kodierung über ein verteiltes Genom hat den Vorteil, dass sie deterministisch ist. Damit ist sie reproduzierbar und man kann sie über evolutionäre Algorithmen optimieren. Der hier vorgestellte Ansatz eines probabilistischen Wachstums liefert Morphologien, die biologischen Neuronen näher kommen. Nachteilig dabei ist, dass die Ergebnisse des Wachstums nur reproduzierbar sind, wenn man eine feste, deterministische Folge von Zufallszahlen mit in den Algorithmus einbezieht.

Wünschenswert wäre beide Ansätze so miteinander zu verbinden, dass die jeweiligen Vorteile erhalten bleiben. Dies ist möglich, wenn man die im ersten Schritt probabilistisch

gewachsenen Strukturen nach dem Wachstum auf einem deterministischen Genom festschreibt. Dieses kann einem evolutionären Algorithmus unterzogen werden. Das Wachstum eines Individuums der nächsten Generation verläuft dann zum Teil deterministisch in den Bereichen in denen ein Genom vererbt wurde und entsprechend des probabilistischen Ansatzes an den Stellen, wo durch evolutionäre Operationen (Mutation, Crossing-Over, etc.) keine genetische Information mehr vorhanden ist. Die Evaluierung dieses kombinierten Ansatzes ist Ziel zukünftige Forschung.

### **Zusammenfassung**

Der Wachstumsprozess des CoDi Zellularautomaten lässt sich mittels eines gesteuerten, probabilistischen Verfahrens so gestalten, dass realitätsnahe neuronale Strukturen entstehen. Durch die Kombination der traditionellen genetischen Kodierung mit dem neuen Ansatz ist es möglich, die evolutionäre Optimierung der Strukturen beizubehalten. Die Implementierung von CoDi als dünnbesetzten und ereignisgesteuerten Zellularautomaten ermöglicht eine erhebliche Reduzierung von Speicherbedarf und Rechenkomplexität.

### **Literatur**

- [Asc 07] Ascoli GA, Donohue DE, Halavi M. (2007) NeuroMorpho.Org: a Central Resource for neuronal Morphologies. *Journal Neuroscience.*, 27(35):9247-51
- [Cun 10] Cuntz H, Forstner F, Borst A, Häusser M. One Rule to Grow Them All: A General Theory of Neuronal Branching and Its Practical Application, *PLoS Computational Biology*, 2010
- [Ger 97] Gers F A, De Garis H. Codi-1bit : A Simplified Cellular Automata Based Neuron Model. In *Artificial Evolution Conference (AE)*, Nimes, France, 1997
- [Gon 04] González-Burgos G et al.. Synaptic efficacy during repetitive activation of excitatory inputs in primate dorsolateral prefrontal cortex. *Cereb Cortex*, 14(5):530-42, 2004
- [Hou 99] Hough M, De Garis H, Korkin M, Gers F A, Nawa N E. Spiker : Analog Waveform to Digital Spiketrain Conversion in ATR's Artificial Brain "cam-brain" Project. In *Int. Conf. on Robotics and Artificial Life*, Beppu, Japan, 1999
- [Sch 04] Schwarzer J. Lernverfahren für evolutionär optimierte Künstliche Neuronale Netze auf der Basis Zellulärer Automaten. Logos Verlag Berlin, 2004
- [Vuk 02] Vukšić M et al.. Perinatal growth of prefrontal layer III pyramids in down syndrome. *Pediatric Neurology* , Vol. 27, Issue 1, p.36 – 38, 2002
- [YiB 96] Yi-Bing Lin; Fishwick, P.A., "Asynchronous parallel discrete event simulation," in *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, IEEE Transactions on , vol.26, no.4, pp.397-412, Jul 1996

### **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Der zweidimensionale CoDi Zellularautomat (Quelle: eigene Darstellung)

Abbildung 2: Projektion von realen 3D Neuronen (Quelle: NeuroMorpho.Org Datenbank)

Abbildung 3: In CoDi Automaten gewachsene Neuronen (Quelle: eigene Darstellung)

### **Kontakt**

#### **Felix Gers**

Beuth Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin

Telefon: (030) 4504 2529, E-Mail: [gers@beuth-hochschule.de](mailto:gers@beuth-hochschule.de)

Internet: <http://prof.beuth-hochschule.de/gers/projekte/codi/>