

# The Embryonics Approach

- Zusammenfassung -

Frank Lange

04. April 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Motivation . . . . .	2
1.2	Problemstellung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Sich selbst vervielfältigende Hardware</b>	<b>3</b>
2.1	Biologische Grundlage . . . . .	3
2.2	Übertragung auf Schaltkreise . . . . .	4
2.3	Zellen und Organismen . . . . .	4
2.4	Moleküle . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Sich selbst reparierende Hardware</b>	<b>6</b>
3.1	Biologische Grundlage . . . . .	6
3.2	Übertragung auf Schaltkreise . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
4.1	Selbst reparierende Hardware . . . . .	9
4.2	Selbst vervielfältigende Hardware . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Quellen</b>	<b>10</b>

# 1 Einleitung

Grundsätzlich beschäftigt sich der "Embryonic Approach" mit Konzepten des Designs und der Realisierung zukünftiger Generationen von integrierten Schaltkreisen und versucht dabei, biologische Konzepte als Grundlage für neue Ansätze zu benutzen. Im Folgenden sollen daher die aus [1] resultierenden Ergebnisse zusammengefasst und vorgestellt werden.

## 1.1 Motivation

Die aktuelle Entwicklung von integrierten Schaltkreisen deutet darauf hin, dass wir grundlegend neue Konzepte für den Schaltkreis Entwurf benötigen, um auch in zukünftigen Generationen von integrierten Schaltkreisen eine ähnliche Leistungssteigerung erreichen zu können, wie in den letzten Jahrzehnten.

Ein absehbarer Trend ist dabei, dass die Verkleinerung des Fertigungsmaßstabes und damit auch einhergehend Moore's Law höchstwahrscheinlich immer mehr stagnieren werden, da rein physikalisch eine weitere Verkleinerung der aktuellen 22nm CMOS Transistortechnologie kaum bis gar nicht möglich ist.

Es wird daher verstärkt nach neuen Konzepten gesucht, welche eine Fertigung im nanoelektronischen Bereich in großer Anzahl erlauben. Dabei handelt es sich nicht um den "klassischen" Fertigungsmaßstab im Nanometerbereich, welcher jegliche Elektronik umfasst, die in einem kleineren Maßstab als 100nm gefertigt wird, sondern meint einen Maßstab auf atomarer bzw. molekularer Ebene, welcher also deutlich kleiner ist, als der aktuelle Stand der 22nm Fertigung.

## 1.2 Problemstellung

Versucht man nun sich zukünftige Generationen integrierter Schaltkreise im molekularen Maßstab vorzustellen, stößt man schnell auf Probleme, die auch heute schon zu den aktuellen Problemen der Schaltkreisherstellung gehören, welche allerdings mit einem immensen Faktor multipliziert werden, sobald man den Herstellungsmaßstab nicht nur halbiert, sondern nun nochmals um ein Vielfaches verkleinert.

Zum einen fällt allein die Anzahl der hergestellten Chips auf. Verringert man den Fertigungsmaßstab erhöht man damit automatisch auch die Anzahl der Chips, welche in ein und demselben physischen Raum hergestellt werden können. Dabei stellt sich die Frage, wie man möglichst effizient möglichst viele Chips herstellen kann, ohne dabei eventuell für jeden einzelnen den gleichen Aufwand betreiben zu müssen, so wie es heute noch der Fall ist.

Zum anderen bewirkt eine Verkleinerung des Herstellungsmaßstabs auch eine erhöhte Fehlerrate beim Herstellungsprozess. Dabei bieten sich zwei mögliche

Lösungsansätze intuitiv an. Man könnte entweder den Herstellungsprozess so optimieren bzw. perfektionieren, sodass man die Fehlerrate bei der Herstellung versucht auf ein Minimum zu reduzieren, oder man versucht einen Fertigungsprozess zu entwerfen, welcher es den hergestellten Chips erlaubt mit fehlerhaften Elementen möglichst tolerant umzugehen.

Im folgenden sollen Konzepte zur Lösung beider Problemfälle vorgestellt und erläutert werden. Dabei beschäftigt sich die Lösung des ersten Problemfalles mit dem Konzept einer *sich selbst vervielfältigenden Hardware*. Für den zweiten Problemfall wird mit Hilfe des Konzepts einer *sich selbst reparierenden Hardware* die Lösung mit erhöhter Fehlertoleranz vorgestellt.

In beiden Fällen dienen bestimmte biologische Konzepte der Natur als Grundlage bzw. Ideengeber, welche zusätzlich an entsprechender Stelle mit vorgestellt werden.

## 2 Sich selbst vervielfältigende Hardware

Im Folgenden soll das Konzept einer sich selbst heilenden Hardware vorgestellt werden. Dabei bezieht sich der Begriff *Hardware* ausschließlich auf integrierte Schaltkreise.

Ziel ist es, dafür zu sorgen, dass nur eine möglichst geringe Teilmenge von Schaltkreisen initialisiert werden muss, welche dann dafür sorgt, alle anderen Chips bei der Herstellung zu initialisieren. Dabei werden *1-zu-1 Klone* der Initialmenge von *von dieser selbst* erstellt. Dies soll dazu beitragen, integrierte Schaltkreise in zukünftigen Generation effektiv in großen Stückzahlen herstellen zu können.

Dabei ist die Grundlage des Konzepts die Art und Weise, wie in der Natur mehrzellige Organismen intern organisiert sind und wie sie überhaupt entstehen bzw. wachsen.

### 2.1 Biologische Grundlage

Betrachtet man die Art und Weise, wie mehrzelluläre Organismen aufgebaut sind, so stellt man fest, dass sie aus einer endlichen Anzahl aus Zellen bestehen. Jede dieser Zellen kann dabei einer größeren Gruppe wie z.B. Nervenzellen oder Muskelzellen zugeordnet werden. Auf Grund dieser Zuordnung besitzt jede Zelle eine charakteristische Funktion, welche sie ausübt, da sie z.B. die Funktion als eine Muskelzelle übernimmt, wobei durchaus mehrere Zellen ein und derselben funktionalen Gruppe zugeordnet werden.

Auffällig ist dabei, dass die räumliche Position häufig ausschlaggebend für die übernommene Funktionalität ist.

Es gibt allerdings auch eine bestimmte Menge an Zellen, welche (noch) kei-

ne Funktionalität zugewiesen bekommen haben. Diese Zellen können zu einem späteren Zeitpunkt, je nach Bedarf, eine beliebige Funktionalität übernehmen bzw. ausprägen, was bei schon *festgelegten* Zellen i.d.R. nicht mehr möglich ist.

Mehrzelluläre Organismen *wachsen* mit Hilfe des Vorgangs der *Zellteilung*. Dabei erstellt die Mutterzelle von sich selbst komplett identische Klone, welche wiederum den Prozess der Zellteilung einleiten und somit zu einem Wachstum des Organismus führen.

## 2.2 Übertragung auf Schaltkreise

Das aktuelle Konzept zur Übertragung dieser biologischen Konzepte auf den Schaltkreisentwurf sieht dabei jetzt folgendes vor.

Jede *Zelle* ist ein kleiner Mikroprozessor mit einer geringen Menge Arbeitsspeicher und befindet sich, wie bei der Massenherstellung von integrierten Schaltkreisen üblich, in einem Grid von solchen. Dieses Grid wäre vollständig initialisiert, wenn jede Zelle des Grids in ihrem Arbeitsspeicher das komplette *Programm* besäße und an Hand ihrer eigenen Position/Koordinate innerhalb des Grids wüsste, welchen Teil des Programms sie ausführen soll. Dabei wäre dieses *globale Programm* das Pendant zum biologischen Genom.

## 2.3 Zellen und Organismen

Um also nun ein gesamtes Grid von initialisierten Zellen zu erhalten, würde es ausreichen, nur eine initiale Menge von Zellen mit dem *Genom* und ihren Koordinaten auszustatten und dafür zu sorgen, dass noch uninitialisierte Zellen das *Genom* in ihren Arbeitsspeicher kopiert und dann eine Koordinate zugewiesen bekommen, an Hand derer sie ableiten können, welchen Teil des Genoms sie *anspringen*, d.h. ausführen sollen.

Mit Hilfe der Modulo-Funktion bei der Berechnung einer Koordinate einer noch uninitialisierten Zelle wird sichergestellt, dass sich im Laufe der Zeit auf dem gesamten Grid ein sich stets wiederholendes Pattern erkennbar wird. Solch ein *Pattern* wird dabei als ein *Organismus* aufgefasst, da alle zu einem *Organismus* gehörigen Zellen auf Grund ihrer paarweise verschiedenen Koordinaten (innerhalb des Organismus) jeweils einen anderen Teil des Genoms und somit als Kollektiv das gesamte Genom ausführen.

Auf dem gesamten Grid befinden sich dann also letztendlich nach einigen Zyklen Zellen, welche vorher uninitialisiert waren und welche nun nicht nur eine Koordinate zugewiesen bekommen haben und einen bestimmten Teil des Gesamtgenoms ausführen, sondern welche auch mit angrenzenden Zellen unbewusst als Kollektiv arbeiten und somit gedacht einen Organismus darstellen. Wobei das gesamte Grid dann aus Organismenklonen der ursprünglichen Initialmenge von

Zellen, d.h. dem ursprünglichen Organismus besteht (Abb. 1).

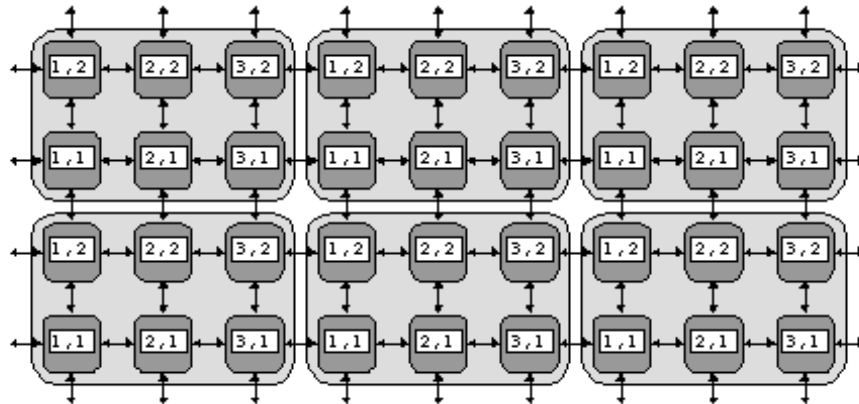


Abbildung 1: Mehrere Kopien eines Organismus in einem Zellgrid

## 2.4 Moleküle

Um solch ein Propagieren von Genom und Koordinate möglich zu machen besteht, sowie ein gedachter Organismus aus mehreren gedachten Zellen besteht, auch eine Zelle aus mehreren sog. *Molekülen*. Wobei es sich bei Molekülen nicht mehr um konzeptionelle Gebilde handelt sondern diese aus einem oder mehreren *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA) bestehen, d.h. aus wirklichen Schaltelementen.

Das besondere an FPGAs ist, das diese über eine Schaltungstabelle verfügen, über welche, durch das Anlegen bestimmter Eingangsbelegungen, die Funktion des FPGAs bestimmt wird. Das bedeutet man kann die Funktionalität dieses Schaltelements durch das Anlegen bestimmter Eingangsbelegungen auch "zur Laufzeit" ändern.

Das Besondere ist nun, dass das Grid aus den gedachten *Zellen* im Grunde nur ein Grid aus solchen FPGAs ist, wobei jeweils die Ausgänge eines FPGAs als die Eingänge eines weiteren FPGAs benutzt werden, wodurch Informationen über die Funktionalität von einem FPGA zum nächsten propagiert werden können.

Damit also nun Informationen bzw. Abarbeitungsbefehle von einem FPGA zum Nächsten, d.h. von einem Molekül zum Nächsten weitergegeben werden können, werden bestimmte Befehle benötigt, die angeben, in welche Richtung bzw. an welche Ausgänge die Informationen weitergeleitet werden sollen. Das bedeutet,

man muss zu Beginn ganz genau überlegen, welche Befehlsfolge zum einen dafür sorgt, dass jedes Molekül einer Zelle eine Funktionalität zugeordnet bekommt, zum anderen aber jedes Molekül bestimmte Befehle auch weitergibt, sodass anliegende Moleküle, welche noch nicht initialisiert/programmiert wurden sozusagen "aktiviert" bzw. initialisiert werden.

Im Endeffekt reicht eine sorgsam erstellte Befehlsfolge von wenigen Befehlen aus, um eine Verbreitung dieser Befehle über das gesamte Grid zu bewirken.

### 3 Sich selbst reparierende Hardware

Nachdem bisher das erste Konzept einer sich selbst vervielfältigen Hardware vorgestellt wurde, soll im folgenden das Konzept einer sich selbst reparierenden Hardware vorgestellt und genau erläutert werden.

Auch hier bezieht sich der Begriff *Hardware* ausschließlich auf integrierte Schaltkreise.

Ziel dieses Konzept ist es, die Fehlertoleranz zukünftiger Generationen integrierter Schaltkreise zu erhöhen.

#### 3.1 Biologische Grundlage

Wie schon beim Konzept einer sich selbst vervielfältigen Hardware sind auch hier wieder biologische Konzepte die Ideengeber. Wo vorher allerdings mehrzelluläre Organismen als solche betrachtet wurden, ist an dieser Stelle interessanter, mit welcher Art und Weise eine Spezies für ihr Überleben sorgt. Dabei ist der wichtigste Faktor der, der Redundanz.

Wenn man eine beliebige Population einer Spezies betrachtet, so stellt man fest, dass diese Population zwar aus mehreren individuellen und unabhängigen Organismen besteht, diese allerdings alle die gesamte und somit alle die gleiche Erbinformation der Spezies in sich tragen. Das bedeutet logischer Weise, dass die Spezies existiert, solange ein Individuum existiert. Alle anderen Individuen sind, wenn auch etwas drastisch formuliert, Redundanz, um eventuellen Ausfällen einzelner Organismen vorzubeugen.

Genau so bestehen wiederum einzelne Organismen dieser Population aus Zellen, wobei jede Zelle die komplette Erbinformation des Organismus in sich trägt. Erst wenn man noch ein weiteres mal rekursiv Absteigt findet man zwar, dass die Zelle wiederum aus einzelnen Molekülen besteht, diese jedoch keine weitere Redundanz bieten. Man ist also an der Basis angekommen.

Das bedeutet nun also, dass die Natur nicht versucht ihren Fortpflanzungspro-

zess zu perfektionieren und damit Mutationen auszuklammern, sondern vielmehr, dass sie mit Fehlertoleranz in Form von Redundanz einen Weg gefunden hat, mit einer permanenten Fehlerrate erfolgreich umzugehen.

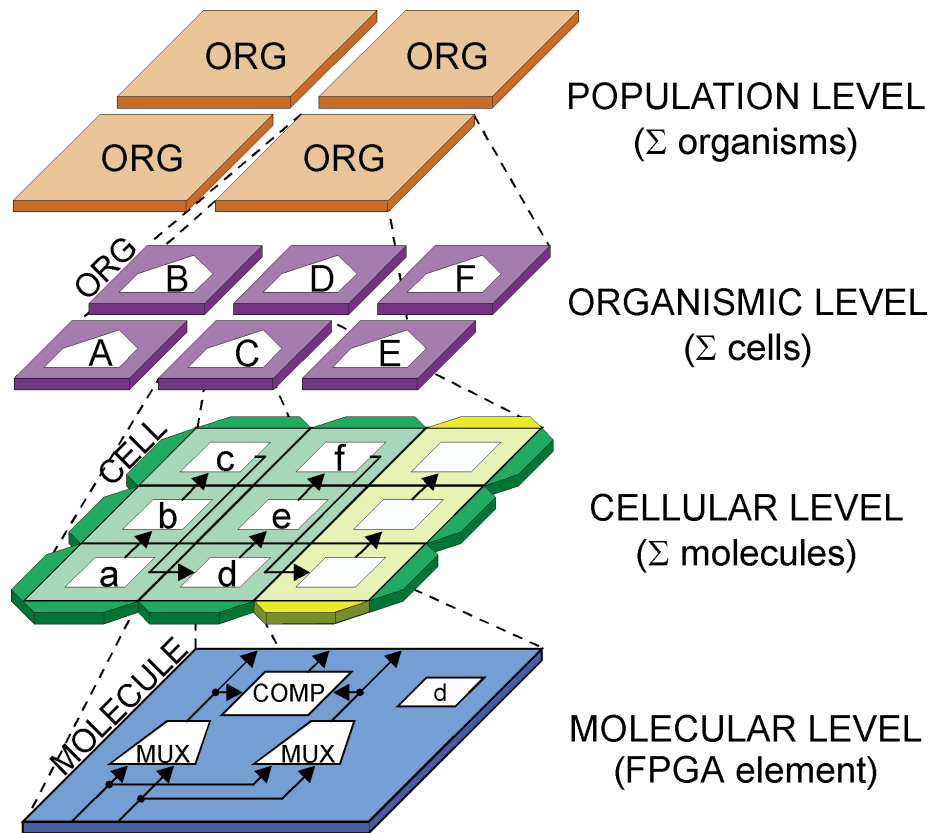


Abbildung 2: Konzept der einzelnen Ebenen

### 3.2 Übertragung auf Schaltkreise

Überträgt man diese Idee der mehrschichtigen Redundanz nun auf den Schaltkreisentwurf, bietet es sich an, mit den schon oben eingeführten Konzepten wie Molekülen, Zellen und Organismen weiterzuarbeiten, wobei auch hier ein gedachtes Molekül aus einem FPGA besteht und eine Zelle einen aus mehrere Molekülen bestehender Mikroprozessor inklusive Speicher und ein Organismus einen aus mehreren Zellen bestehenden "Mehrkern"-Prozessor darstellt (Abb. 2).

Diesmal auf der Ebene der Moleküle beginnend stellt man fest, dass es für einen



Produktionsfehler/Ausfall eines FPGAs keine Möglichkeit gibt, diesen im Nachhinein zu korrigieren. Die einzige Möglichkeit die sich an dieser Stelle anbietet, ist es, das kaputte Molekül mit einem funktionierenden Molekül zu ersetzen. Dafür ist es nötig, Moleküle zu haben, welche im Normalfall keine Funktionalität besitzen, sondern nur als Ersatzmoleküle für einen Fehlerfall dienen.

Das gute ist dabei, dass die Anzahl dieser Ersatzmoleküle variable bestimmt werden kann, da beim Initialisieren des Grids wie im Abschnitt 2 (s.o.) in der verwendeten Befehlsfolge nur dafür gesorgt werden muss, dass bestimmte Moleküle bzw. Zellen keine Funktionalität erhalten, sondern erhaltene Informationen ersteinmal nur weiterleiten. Somit kann man die Fehlertoleranz des Systems je nach Einsatzgebiet passend wählen.

Sollte ein Molekül also ausfallen, werden seine Registerinhalte innerhalb der Zelle des Moleküls zu seinem rechten Nachbar transferiert. Sollte es sich dabei nicht um ein Ersatzmolekül handeln, gibt auch diese Molekül seine Registerinhalte zu seinem rechten Nachbar weiter, solange bis innerhalb der Zelle ein Ersatzmolekül erreicht wird. Sollte kein Ersatzmolekül innerhalb der Zelle verfügbar sein, wird der Reparationsmechanismus auf der nächsthöheren, also der zellulären Ebene aktiviert.

Sollte ein Fehler auf molekularer Ebene nicht behandelbar sein, wird an die betroffene Zelle ein sog. "KILL"-Signal gesendet. Dieses bewirkt, dass die betroffene Zelle, oder der Einfachheit der Realisierung halber, die gesamte Spalte von Zellen stirbt.

Auf der zellulären Ebene bedeutet dies, dass auch hier die Inhalte der betroffenen Zellen zu ihrem rechten Nachbarn transferiert werden, bis eine Spalte von Ersatzzellen erreicht wird. Danach werden die betroffenen Zellen als tot markiert und jeglicher Informationstransfer in Zukunft um diese Zellen herum geleitet. Desweiteren müssen in diesem Falle alle Koordinaten der Zellen innerhalb des betroffenen Organismus neu berechnet bzw. neu bestimmt werden.

## 4 Zusammenfassung

Nachdem die Konzepte einer sich selbst vervielfältigenden und einer sich selbst reparierenden Hardware vorgestellt und erläutert wurden, sollen im Folgenden nochmal die Eckpunkte der beiden Konzepte zusammengefasst und ein Überblick über die Erfüllung der Anforderungen an diese beiden Konzepte gegeben werden. Dabei sei darauf hingewiesen, dass auch, wenn diese beiden Konzepte in dieser Arbeit getrennt vorgestellt und behandelt wurden, sie doch eine gemeinsame Symbiose darstellen und für den kollektiven Einsatz gedacht sind.

## 4.1 Selbst reparierende Hardware

Das in Abschnitt 3 vorgestellte Konzept einer sich selbst reparierenden bzw. selbst heilenden Hardware in Bezug auf integrierte Schaltkreise bietet einige Denkansätze, welche in Zukunft mit Sicherheit weiter ausgebaut werden.

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Konzepts und der damit verbundenen Verfahren sind sicherlich, dass die erreichte Fehlertoleranz des Systems nicht nur auf einer Ebene oder an einer bestimmten Stelle vorhanden ist, sondern sich, wie im natürlichen Vorbild, durch mehrere Ebenen zieht. Dadurch wird erreicht, dass die "Reparatur" nicht über einen zentralen Kontrollmechanismus gesteuert werden muss, sondern so lokal wie nur möglich erfolgen kann.

Die große Einschränkung besteht allerdings darin, dass eine wirkliche Reparatur auf Molekülebene, also auf FPGA Ebene, unrealistisch ist und somit nicht erfolgen kann. Das bedeutet, die eigentliche *Reparatur* wird Verlagert in ein *Ersetzen* fehlerbehafteter Moleküle.

Ob nun, bei immer kleiner werdendem Fertigungsmaßstab, auch die Anzahl der Erzahlmoleküle in einer solcher Form steigt, dass sich Vorteile des kleineren Fertigungsmaßstab und der Nachteil der dann benötigten Ersatzmoleküle relativieren, bleibt zur Zeit ungeklärt.

## 4.2 Selbst vervielfältigende Hardware

Das in Abschnitt 2 vorgestellte Konzept einer sich selbst vervielfältigenden Hardware in Bezug auf den Entwurf integrierter Schaltkreise bildet die eigentliche Grundlage der beiden hier vorgestellten Konzepte, da es sich im Kern auf der Informationsfortpflanzung zwischen FPGAs stützt.

Die Idee, eine große Menge an Chips nur mit einer Initialaktion sich selbst programmieren zu lassen, wird von diesem Konzept vollständig umschlossen. Die Schwächen des Konzepts liegen aber vor allem darin, dass es kein Konzept zur eigentlichen Herstellung von integrierten Schaltkreisen liefert, da es sich ausschließlich in einem schon vorbereiteten, d.h. schon erstellten Grid von FPGAs ausbreiten und diese schon vorhandenen Elemente programmieren kann. Hinzu kommt, dass alle von dem Konzepten erzeugten Schaltkreisorganismen identische Klone des Ausgangsorganismus sind, da eine Abbildung des natürlichen Konzepts der Mutation, z.Z. auf FPGA Ebene noch nicht möglich ist.

## 5 Quellen

[1] G. Tempesti, D. Mange, A- Stauffer, "Bio-Inspired Computing Architectures: The Embryonics Approach", in Proceedings of the Seventh International Workshop on Computer Architecture for Machine Perception (CAMP'05)  
[Online]: <http://www-users.york.ac.uk/~gt512/Publications/2005/CAMP05-Tempesti.pdf>

Abbildung 1:

<http://lslwww.epfl.ch/pages/embryonics/thesis/Thesis-11.gif>

Abbildung 2:

<http://www-users.york.ac.uk/~gt512/Images/4Level.gif>