

Eine Entwurfsmethodik für die Mikrosystemtechnik und Post-CMOS

Andreas Wagener, Kai Hahn
Institut für Mikrosystemtechnik
Universität Siegen
Hölderlinstr. 3, 57068 Siegen, Deutschland
wagener@rs.uni-siegen.de

Kurzfassung

Die Mikrosystemtechnik umfasst viele verschiedene Domänen des Ingenieurwesens. Jede dieser Domänen hat ihre eigene Entwurfsmethodik. Jedoch kann für die Mikrosystemtechnik nicht einfach die Summe der Einzelmethodiken benutzt werden. Es wird ein Überblick über die Entwurfsmethodik in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik gegeben und die Unterschiede werden herausgearbeitet. Weiterhin wird eine parallele Entwurfsmethodik vorgestellt, die es ermöglicht, die Entwicklungszeit in der Mikrosystemtechnik zu verkürzen und den Einsatz von Software voranzutreiben.

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik wird oft als die Schlüsseltechnologie dieses Jahrhunderts bezeichnet. Trotzdem ist die Entwicklung von Mikrosystemen immer noch harte Pionierarbeit. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über den Entwurf in der Mikroelektronik gegeben, stellvertretend für alle in der Mikrosystemtechnik involvierten Disziplinen. Anschließend wird der Entwurf in der Mikrosystemtechnik vorgestellt und eine Methodik eingeführt, die es ermöglicht, die Entwicklungszeit zu reduzieren und unterstützende Software zu entwickeln.

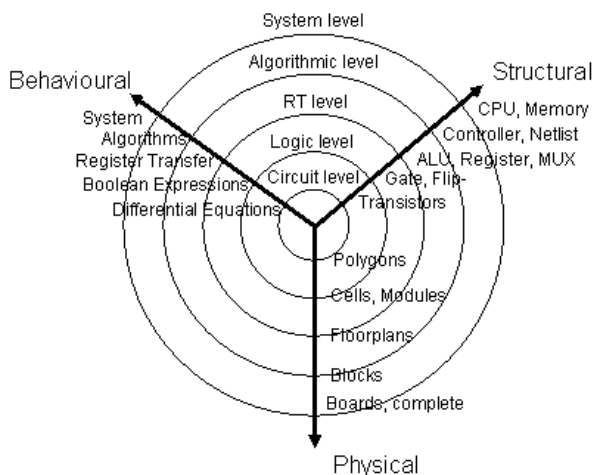


Abbildung 1: Y-Diagramm nach Gayski und Kuhn

2 Entwurf von digitalen Schaltungen

Der Entwurf von digitalen Schaltungen ist heutzutage kein Mysterium mehr. Bereits 1983 veröffentlichten Gayski und Kuhn ihr Y-Diagramm (siehe Abbildung 1), das sehr anschaulich und umfassend den Entwurf beschreibt. Aufgebaut ist das Y-Diagramm aus konzentrischen Kreisen, die die verschiedenen Abstraktionsebenen beschreiben. Die Kreise werden von drei Y-artig angeordneten Achsen geschnitten, die die drei Sichten (Verhalten, Struktur, Geometrie) darstellen. Das Y-Diagramm legt kein fixes Vorgehen für die Entwicklung von Digitalisierungen fest, jedoch hat sich eine spiralförmige Methodik, ausgehend vom Verhalten über die Struktur bis hin zur Geometrie, etabliert. Das Endergebnis des Digitalentwurfs ist ein Maskensatz, der den IC ausreichend beschreibt. Die Entwicklung des Fertigungsprozesses wird beim Y-Diagramm nicht berücksichtigt. Das liegt daran, dass bis auf kleine Variationen, die mittels Design Regeln bereits beim Entwurf berücksichtigt werden, die Prozesssequenz zur Fertigung der Chips unverändert bleibt.

Der heutige Digitalentwurf ist größtenteils automatisiert. Auch mit geringen Kenntnissen über die Fertigung des Chips kann der Designer ICs entwerfen. Das liegt zum einen daran, dass im Grunde genommen nur ein Bauteil, nämlich der Transistor, immer wieder in unterschiedlichen Dimensionen zu Einsatz kommt, zum anderen an den bereits oben erwähnten Invarianzen bei der Fertigung. Letzteres ermöglicht auch die relativ einfache Migration von Entwürfen von einer Fertigungslinie auf eine andere.

3 Entwurf von Analog- und Mixed-Signal-Schaltungen

Im Gegensatz zum Entwurf von digitalen Schaltungen erweist sich der Entwurf von analogen bzw. mixed-signal Chips schwieriger. Zwar zeigt der Trend, dass immer mehr analoge Schaltungen durch digitale mittels digitaler Signalprozessoren (DSP) ersetzt werden, allerdings geht dies nur bis zu einem gewissen Grad. Die Schnittstelle zur Umwelt, wie Antennen, Sensoren und Aktoren, bleibt weiterhin analog. Aber

auch die fortschreitende Miniaturisierung der digitalen Schaltungen zwingt die Entwickler sich mit Phänomenen, wie beispielsweise Übersprechen und Elektromigration, zu beschäftigen, die mehr aus der analogen Welt stammen.

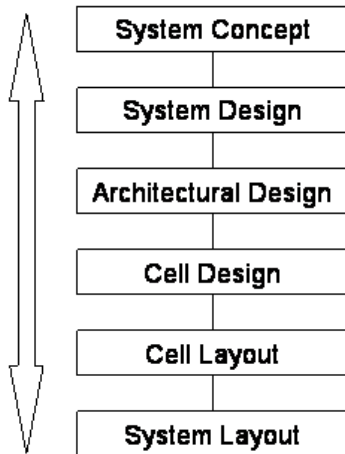


Abbildung 2: Analog und Mixed-Signal Designflow

Ein Pendant zum Y-Diagramm des Digitalentwurfs gibt es für die analoge Seite nicht. Allerdings wird die hier vorgestellte Entwurfsmethodik häufig in den nun aufkommenden Design-Werkzeugen implementiert [1]. Das Vorgehen soll hier nur kurz vorgestellt werden. Für eine detaillierte Beschreibung sei auf [1] verwiesen. Bei dem in Abbildung 2 zu sehenden Designflow handelt es sich um ein Top-Down Vorgehen. Der große Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass Fehler relativ früh erkannt werden. Damit halten sich die Kosten, die ein eventuelles Redesign mit sich bringt, stark in Grenzen. Der Entwurf startet mit einer Konzeptphase, in der sowohl das grundsätzliche Konzept des Systems als auch die Anforderungen festgeklopft werden. Anschließend werden in der Phase des System Designs die Systemblöcke aufgeteilt. Das bedeutet, dass festgelegt wird, welche Funktionalitäten mittels Software und welche mittels Hardware realisiert werden sollen. Bereits in dieser frühen Phase sind Simulationen auf Verhaltensebene zur Qualitätssicherung möglich. Im nächsten Schritt, dem Architektur Design, wird die Hardware in digitale und analoge Bereiche separiert. Mittels Hardwarebeschreibungssprachen (Verilog, VHDL, VHDL-AMS) kann das Verhalten überprüft werden. Der weitere Entwurf der digitalen Blöcke gestaltet sich nun so wie im vorigen Abschnitt beschrieben. Die analogen Bereiche werden in der Phase des Zelldesigns implementiert. Das Ergebnis dieser Phase sind Schematics, die als Vorlage für das Zelllayout erhalten. Während des Zelllayouts werden aus den Schematics konkrete Maskendaten erzeugt, die die exakten Dimensionen der Bauteile widerspiegeln. Durch eine Extraktion eines Schematics aus den Maskendaten wiederum, kann das Ergebnis überprüft werden (Layout-versus-Schematic, LVS). Anschließend

kann das komplette System zusammengesetzt werden. In der letzten Phase, dem System Layout, geschieht das Routing und Placing der Einzelkomponenten. Hier müssen besonders Abschirmung und Parasitäreffekte berücksichtigt werden. Nach einer finalen Simulation (Timing Analyse, Hardware-Software-Cosimulation) kann die Fertigung beginnen.

4 Entwurf von Mikrosystemen und Post-CMOS Anwendungen

Die Mikrosystemtechnik wird von vielen unterschiedlichen Ingenieursbereichen beeinflusst. Neben der Mikroelektronik, die auch als Unterkategorie der Mikrosystemtechnik verstanden werden kann, kommen unter anderem auch Mechanik, Chemie, Optik und Biologie zum Tragen. Die Entwurfsstrategien der unterschiedlichen Domänen unterscheiden sich je nach Bereich mehr oder weniger. Jedoch kann man sagen, dass es oft schwierig genug ist, einen qualitativ hoch-

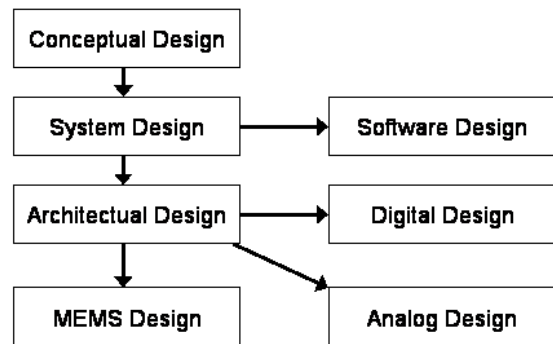


Abbildung 3: Überblick MEMS-Entwurf

wertigen Entwurf in einer Domäne zu garantieren. Kombiniert man nun zwei oder mehr Bereiche zu einer multidisziplinären Domäne, so ergibt sich eine ungleich komplexere Entwurfsmethodik. Ähnlich wie in der Mikroelektronik steigt der Bedarf an Mikrosystemen zusehend. Andererseits sinkt die Einsatzdauer solcher Systeme rapide, da immer neuere und kleinere Systeme auf den Markt drängen. Das verlangt eine Verkürzung der Entwicklungszeit, die aber nicht die Qualität der Produkte beeinträchtigen darf. Deshalb sind verlässliche und stabile Entwurfsmethodiken unabdingbar.

Im Gegensatz zur Mikroelektronik und anderen Bereichen, wie die Mechanik, die von Bauteilbibliotheken und IPs profitieren, ist in der Mikrosystemtechnik der Fertigungsprozess für eine Produktklasse nicht fixiert. Das heißt, dass bereits kleinste Änderungen am Design oder an der Spezifikation des Systems zu einer gänzlich anderen Fertigungsprozessfolge führen können. Ähnliches ist auch beim Post-CMOS-Entwurf zu verzeichnen. Der Entwurf von analogen, mixed-signal und hochfrequenten Bauteilen ist sehr komplex. Allerdings kann die dritte Dimension (die Höhe im Sinne eines Querschnitts) oft außer Acht gelassen werden. In der

Mikrosystemtechnik gehört der Umgang mit allen drei Dimensionen jedoch zur täglichen Arbeit. Besonders wichtig sind die Zusammenführung von Layout und Design mit den Prozessschritten und die Anpassung der unterschiedlichsten Prozessparameter.

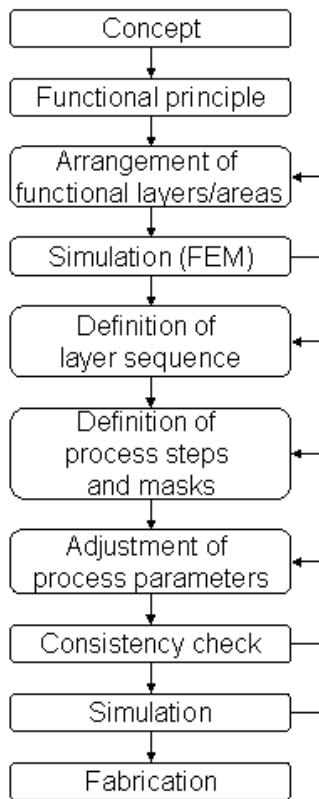


Abbildung 4: MEMS Designflow im Detail

Betrachtet man die verschiedenen Entwurfsmethodiken, so stellt man eine gewisse Ähnlichkeit in den frühen Phasen des Top-Down Entwurfs fest. Je mehr man sich jedoch der Fertigung nähert, um so mehr differieren die einzelnen Methodiken. In der Regel gehen die Methodiken aus den bibliotheksbasierten Domänen überhaupt nicht auf den fertigungsnahen Entwurf ein. Darum ist auch eine schlichte Übernahme der Entwurfsvorgehensweisen für die Mikrosystemtechnik nicht machbar.

Der Designer hat nicht allein mit Top-Down oder Bottom-Up Vorgehen zu tun, sondern mit einer Kombination aus beiden. Bedingt wird das durch die Komplexität der Fertigungsschritte. Bei einem einfachen Top-Down Vorgehen würde der Entwickler zuerst ein 3D-Modell und anschließend die verschiedenen Schichten für den Aufbau definieren. Aber hier kann es ihm passieren, dass sein Entwurf technisch überhaupt nicht fertigbar ist. Das bedeutet, dass viel Geld und Zeit in den Entwurf gesteckt wurde, der anschließend komplett revidiert werden muss. Um das zu verhindern, ist es sinnvoll, den Entwurf des 3D-Modells gleichzeitig mit dem Entwurf der Prozessschritte für die Fertigung durchzuführen. In Abbildung 3 ist ein grober Überblick über den Entwurfsablauf in der Mikrosystemtechnik zu sehen.

Analog zum Entwurf in der Mikroelektronik beginnt der MEMS-Entwurf mit einer Konzeptphase. Anschließend wird während des System Designs die Software von der Hardware getrennt. Die Hardware wiederum kann dann aufgeteilt werden in analoge, digitale und nichtelektrische Blöcke.

Abbildung 4 geht etwas detaillierter auf den Entwurf des nichtelektrischen Bereichs ein. Da der Entwurf der mikroelektronischen Komponenten im Komplexitätsvergleich erst an zweiter Stelle kommt, wird das oft in der Mikrosystemtechnik mittels CMOS-Kompatibilität berücksichtigt. Das bedeutet, dass in der Prozessfolge für das System auch ein kompletter CMOS-Prozess integriert ist. Auf diese Weise wird die Fertigung der elektronischen Komponenten berücksichtigt. Allerdings reduziert das die Anzahl der Freiheitsgrade. Das Konzept für die nichtelektronischen Komponenten kann in der Regel aus dem Gesamtkonzept erschlossen werden. Anschließend wird das Funktionsprinzip festgelegt. Beispielsweise lässt sich ein Drucksensor kapazitiv oder auch resistiv realisieren. Eine erste Simulation zeigt, ob man auf dem richtigen Weg ist. Die gewählten Funktionsprinzipien werden dann in Funktionsschichten bzw. -blöcke aufgeteilt. Bereits diese Aufteilung beeinflusst stark die Qualität des späteren Produkts. In der nächsten Phase kann dann mittels Finite Elemente Methode (FEM) das Verhalten überprüft werden. Als nächstes folgt die Festlegung der Prozesssequenz. Hier muss nicht nur die Fertigung der Funktionsschichten berücksichtigt werden, sondern auch alle Hilfsschichten. Denn in der Regel können die Funktionsschichten nicht einfach nacheinander erzeugt werden. Vielmehr sind Haft- und Opferschichten unabdingbar. Für alle diese Schichten, sowohl Funktions- als auch Hilfsschichten, müssen geeignete Prozessschritte gefunden und parametrisiert werden. Problematisch ist oft die Auswahl des richtigen Schritts, da eine Schicht auf mehrere Arten erzeugt werden kann. Hinzu kommt natürlich noch, dass auch die entsprechenden Masken erstellt werden müssen.

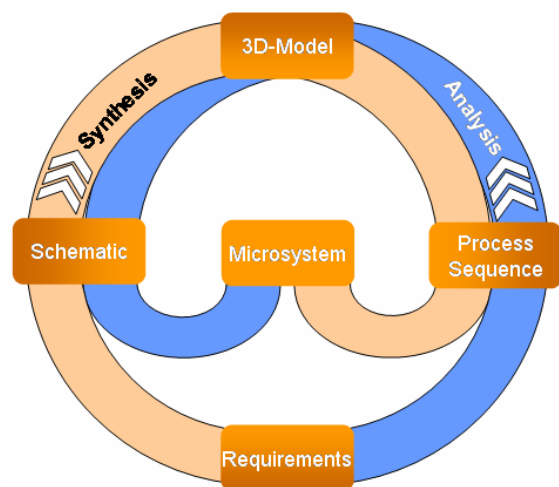


Abbildung 5: Brezel-Modell des MEMS-Entwurfs

Normalerweise reicht ein Durchgang durch den Entwurfsablauf nicht aus. Die Regel sind eher mehrere Durchläufe, bei denen die Schichtfolgen und das gesamte Design auf einander abgestimmt werden müssen. Ein Ziel ist es dabei, die Schrittfolge zur Konsistenz zu bringen. Das bedeutet, dass alle Wechselwirkungen der einzelnen Prozessschritte untereinander verstanden und im Design berücksichtigt worden sind. An dieser Stelle kann es vorkommen, dass das gesamte Design überarbeitet werden muss, weil keine konsistente Prozessfolge zu finden ist. Idealerweise wird, nachdem die Prozessfolge konsistent ist, eine letzte Simulation der Fertigung durchgeführt, um die Machbarkeit auch zu garantieren. Allerdings gibt es noch keine adäquaten Werkzeuge für solch eine Simulation.

Viel Zeit kann aber gespart werden, wenn einige Schritte in der Entwurfsmethodik umgestellt werden. Führt man die Entwicklung des Layouts zusammen mit der Findung der passenden Prozessschritte aus, so kann man sich eventuell Iterationen sparen. Das so genannte Brezel-Modell (Abbildung 5) erläutert neben dem einfachen Top-Down und Bottom-Up Entwurf auch den parallelen Entwurf von Mikrosystemen. Das Design des 3D-Modells wird hier von zwei Seiten angegangen. Zum einen wird es vom Verhalten beeinflusst und zum anderen von den Fertigungsmöglichkeiten. Ein besonderes Augenmerk gilt dem fertigungsnahen Entwurf. Im Brezel-Modell ist er zwischen 3D-Modell und Prozesssequenz einzuordnen. Der fertigungsnaher Entwurf lässt sich schön darstellen mit dem Kreismodell [2] (von Brück und Hahn erstmals vorgestellt), das noch etwas modifiziert wurde (Abbildung 6).

Es ist jedoch klar, dass die parallele Entwicklung von Layout, Querschnitt, Masken und Prozesssequenzen nicht so einfach zu bewerkstelligen ist. Jedoch würde ein Software-Werkzeug, das den Ingenieur beim parallelen Entwurf unterstützt, enorm Zeit und Geld sparen. Aus diesem Grund wird am Institut für Mikrosystemtechnik an der Universität Siegen an der Umsetzung der neuen Entwurfsmethodik in ein Softwarewerkzeug gearbeitet [5]. Realisiert werden soll ein System, das die parallele Entwicklung von Layout und

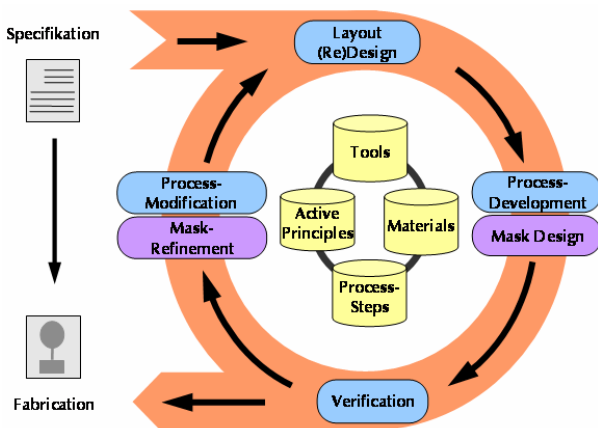


Abbildung 6: Erweitertes Kreismodell für den fertigungsnahen Entwurf

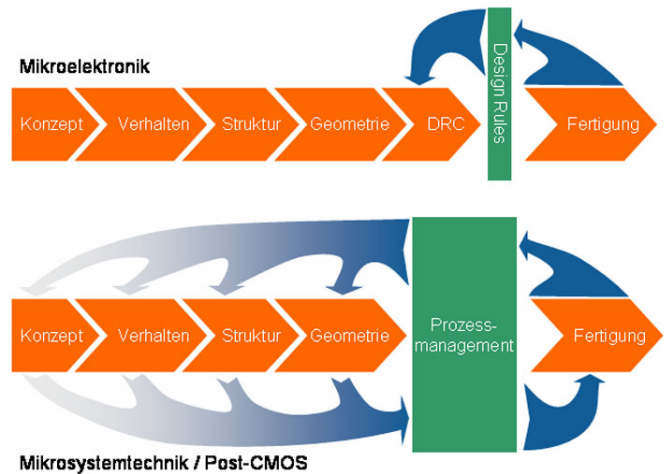


Abbildung 7: Unterschied Entwurf in der Mikroelektronik und MEMS

Prozesssequenz unterstützt und teilweise automatisiert. Zu diesem Zweck wird ein mächtiges Prozessmanagementwerkzeug entwickelt, das sowohl Prozessschritte und -sequenzen mit allen nötigen Parametern verwaltet, als auch einen direkt daran gekoppelten Layouteditor zur Verfügung stellt.

5 Fazit

Der Entwurf von Mikrosystemen ist ungleich komplizierter als der Entwurf von Systemen der involvierten Einzeldisziplinen. Abbildung 7 zeigt deutlich, dass Wechselwirkungen und Rückkopplungen der einzelnen Entwurfsphasen im Vergleich zur Mikroelektronik eine sehr bedeutende Rolle spielen. Mit einfachen Ein-Wege-Methodiken kann der wachsenden Komplexität nicht mehr begegnet werden. Es wurde eine Methodik vorgestellt, die dieser Forderung gerecht wird und einen parallelen Ansatz verfolgt.

Literatur

- [1] Gielen, G.; Rutenbar, R. A.: *Synthesis of Analog and Mixed-Signal Integrated Electronic Circuits*, in Formal Engineering Design Synthesis, Erik K. Antonsson und Jonathan Cagan, Cambridge University Press, 2001
- [2] Hahn, K.: *Methoden und Werkzeuge zur fertigungsnahen Entwurfsverifikation in der Mikrotechnik*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [3] Miyahara, Y.; Oumi, Y.; Moriyama, S.: *Design Methodology for Analog High Frequency ICs*. DAC 96, Las Vegas, 1996
- [4] Wagener, A.: *System- und Anforderungsanalyse für ein Prozessdesign-Werkzeug in der Mikrosystemtechnik*. Diplomarbeit, Universität Siegen, 2001
- [5] Wagener, A.; Popp, J.; Hahn, K.; Brück, R.: *Requirements to a physical design support tool for microsystem technology*. Proceedings 14th European Simulation Symposium (ESS), Dresden, October 2002