

Hierarchische, statistische Analyse analoger Schaltungen

Hierarchical, statistical analysis of analogue circuits

Christoph Sohrmann, Roland Jancke, Joachim Haase, Fraunhofer IIS/EAS, Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
{christoph.sohrmann, roland.jancke, joachim.haase}@eas.iis.fraunhofer.de

Kurzfassung

Die bei der Prozessierung mikroelektronischer Systeme auftretenden Schwankungen führen auf Chiplevel zu schwankenden Eigenschaften der Bauteile, Bauteilegruppen, Blöcke wie auch der Gesamtschaltung. Solche prozessbedingten Variationen nehmen mit abnehmender Strukturgröße zu und gewinnen daher stetig an Bedeutung für Zuverlässigkeit und Ausbeute. Bei der Behandlung statistischer Effekte wird meist Corner- und Monte-Carlo-Simulation herangezogen. Dazu werden Schwankungsinformationen auf Technologie- bzw. Transistorlevel verwendet. Sehr große Schaltungen lassen sich auf SPICE-Ebene meist kaum im Nominalpunkt simulieren und entziehen sich somit einer detaillierten Monte-Carlo-Analyse. Dieser Beitrag stellt eine hierarchische Modellierungsmethodik unter Berücksichtigung statistischer Schwankungen vor. Dabei werden parametrisierte, statistische Verhaltensmodelle von Teilschaltungen erstellt, welche das statistische Verhalten um den Nominalpunkt korrekt wiedergeben und dadurch eine schnelle Gesamtsystemsimulation auf Verhaltensmodellbasis ermöglichen.

Abstract

Variations occurring in the semiconductor fabrication process affect on chip level the characteristics of devices, modules, blocks, and the overall circuit. These process induced variations increase with shrinking technology dimensions are therefore gain importance for yield and reliability. Usually, to treat statistical effects, corner and Monte Carlo analysis is applied using information on variations from technology and transistor level. However, for large circuits of complex SoCs a nominal simulation on SPICE level is hardly feasible which renders a detailed Monte Carlo analysis of that circuit impossible. This paper presents a hierarchical modelling methodology with special consideration of statistical variations. Parameterized statistical behavioural models are established that represent the statistical behaviour around the nominal point and thus allow fast system simulation on behavioural level.

1 Einleitung

Statistische Fertigungsschwankungen im Halbleiterprozess stellen einen limitierenden Faktor für Zuverlässigkeit, Ausbeute und Performance integrierter Schaltungen dar [1]. Die International Technology Roadmap for Semiconductors ITRS [2] verweist in Zusammenhang mit dem Übergang zu kleineren Strukturbreiten auf die Auswirkungen von Variationen, u. a. auf die Schwellspannung und effektive Gatelänge von Transistoren. Eine Vielzahl von Publikationen auf diesem Gebiet belegt das andauernde Interesse an statistischen Betrachtungen im Designprozess [3][4][5]. Trotz zahlreicher Lösungsvorschläge für einzelne Probleme zeichnet sich ein allgemein bewährter durchgängiger, statistischer Designflow für komplexe Mixed-Signal-Schaltungen gegenwärtig nicht ab. Ein grundlegendes Problem ist in diesem Zusammenhang die Beantwortung der Frage, wie sich die Schwankungen auf der Bauelemente-Ebene auf die Schwankungen von Systemeigenschaften, beispielsweise den Leistungsverbrauch und Laufzeiten von Signalen, auswirken und ob diese noch in den geforderten Grenzen liegen.

Es zeigt sich, dass Corner-Analysen, bei denen Entscheidungen auf der Grundlage von Grenzwerten für Prozessgrößen, Versorgungsspannung und Temperatur (PVT) getroffen werden, den Anforderungen des Entwurfsprozesses

zunehmend weniger gerecht werden. Werkzeuge für derartige Analysen sind aber eingeführt und es ist daher naheliegend zu versuchen, die Vorteile dieses Ansatzes für ausgewählte Fragestellungen durch Modifikationen zu „retten“. So ist beispielsweise bei der Timing-Analyse im Digitalentwurf teilweise erfolgreich versucht worden, durch das Einführen von Korrekturfaktoren die Ergebnisse von Corner-Analysen zu präzisieren [6].

In vielen anderen Fällen bleibt jedoch die Frage, wie sich die Auswirkungen von Variationen auf der Bauelemente-Ebene auf der Systemebene auswirken, unbeantwortet. Dies ist hauptsächlich der kaum handhabbaren Komplexität heutiger heterogener Systeme geschuldet. Fertigungsschwankungen können vielfach unter Verwendung normalverteilter globaler und lokaler Variationen (Inter- bzw. Intra-Die) von Transistorparametern (TP) berücksichtigt werden und stehen dem Designer auf SPICE-Niveau zur Verfügung [1]. Allerdings ist bei neueren Technologien teilweise auch von nicht-normalverteilten Parametern auszugehen [3][7]. Eine Analyse des Gesamtsystems unter Verwendung der zugrunde liegenden Transistorschaltungen ist aber in der Regel wegen des damit verbundenen Aufwandes nicht möglich. Variationen auf der Transistorebene müssen auf einem Bottom-Up-Weg in Variationen von Systemeigenschaften überführt werden um z.B. Aussagen zur Einhaltung der Systemspezifikation

und der damit verbundenen Ausbeute treffen zu können. Die steigende Komplexität auf dem Weg vom Device zum System erfordert jedoch eine Abstraktion von Block-, Schaltungs- bzw. Systemeigenschaften sowie deren Verhalten. Lediglich für lineare Systeme ist eine vereinfachte Betrachtung bei der Abstraktion der Variationen über Hierarchieebenen möglich [8].

Bei der Analyse des Nominalverhaltens hat es sich bewährt, Teilschaltungen durch Verhaltensmodelle zu ersetzen. Aus den Nominalwerten der Transistorparameter ergeben sich die Nominalwerte der Parameter des Verhaltensmodells. Der vorliegende Beitrag stellt ein Vorgehen dar, um Parametervariationen der Modelle eines niedrigeren Abstraktionsniveaus durch eine geeignete Beschreibung des zufälligen Verhaltens der Parameter eines höheren Abstraktionsniveaus zu berücksichtigen. Mathematisch wird ausgehend von einer im Allgemeinen multivariaten Verteilung der Parameter eines Modells für einen Block auf niedrigerem Abstraktionsniveau die multivariate Verteilung der Parameter des Modells auf höherem Abstraktionsniveau ermittelt und geeignet charakterisiert. Auf diese Weise kann dann wieder zur nächst höheren Abstraktionsebene übergegangen werden. Eine Monte-Carlo-Simulation mit den so parametrisierten Verhaltensmodellen erfordert einen wesentlich geringeren Aufwand als eine derartige Simulation mit den ursprünglichen Transistormodellen. Der Ansatz eröffnet darüber hinaus auch die Möglichkeit zum Einsatz anderer Auswerteverfahren. Das Vorgehen kann damit als Grundlage für eine *hierarchische Analyse oder Simulation* verstanden werden.

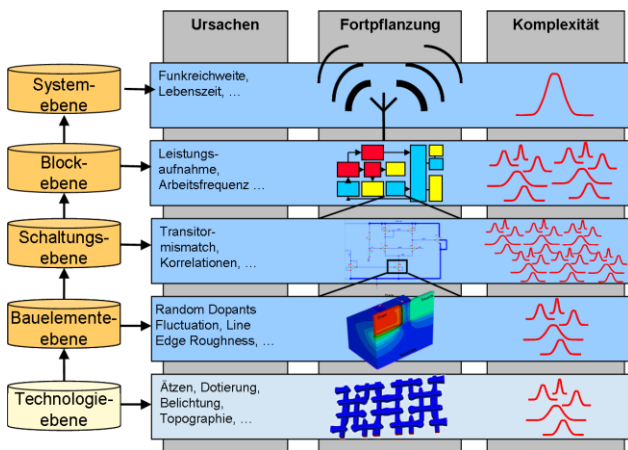


Bild 1 Hierarchische Fortpflanzung von Prozessschwankungen, Beispiel eines RFID-Frontends.

Bild 1 verdeutlicht den hierarchischen, statistischen Charakter eines komplexen Gesamtsystems am Beispiel eines RFID-Frontends.

Abschließend zu diesen einleitenden Bemerkungen soll kurz skizziert werden, welche Gesichtspunkte bei diesem Vorgehen berücksichtigt werden müssen. Auf der Transistorebene sind lokale und globale Schwankungen zu berücksichtigen. Eine Folge der globalen Schwankungen ist,

dass die Parameter der Verhaltensmodelle unterschiedlicher Blöcke nicht unabhängig voneinander gewählt werden können. Ein Ergebnis der lokalen Schwankungen ist andererseits, dass die konkreten Parameterwerte der Verhaltensmodelle zweier gleicher Blöcke in der Regel voneinander abweichen. Außerdem kann auch nicht vorausgesetzt werden, dass jeder einzelne Parameter für sich betrachtet normalverteilt ist.

Diese Zusammenhänge müssen in geeigneter Weise berücksichtigt und beschrieben werden. Dazu ist eine praktikable multivariate Charakterisierung der Parameter aller Verhaltensmodelle eines Systems erforderlich. Das angewandte Vorgehen bei der Datenerfassung wird in Abschnitt 2 beschrieben. Abschnitt 3 skizziert einige Gesichtspunkte, die bei der Wahl der Parameter der Verhaltensmodelle zu betrachten sind. Im Abschnitt 4 wird der Ansatz zur Charakterisierung der multivariaten Verteilungen der Parameter dargestellt. Es wird gezeigt, wie die zu charakterisierenden Randverteilungen unter Verwendung verallgemeinerter Lambda-Verteilungen [9] beschrieben werden können und wie die Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern durch Rangkorrelationskoeffizienten (Spearman-Korrelationskoeffizienten) berücksichtigt werden können. Abschließend wird das Vorgehen in Abschnitt 5 an Hand eines Beispiels demonstriert.

2 Methodik

Die hier vorgestellte Methodik zur Transformation von Fertigungsschwankungen auf höhere Entwurfsebenen basiert auf statistischer Verhaltensmodellierung, d.h. Erstellung von parametrisierten, statistischen Verhaltensmodellen (SBM – Statistical Behavioural Model) von Teilschaltungen. Das Gesamtsystem wird dabei in Teilsysteme zerlegt, welche über einen weiten Einsatzbereich vollständig multivariat charakterisiert werden.

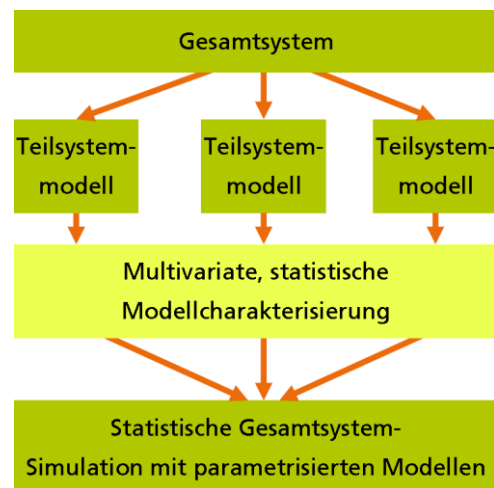


Bild 2 Methodik einer statistischen Analyse eines Gesamtsystems mithilfe hierarchischer Zerlegung.

Die Parameter der SBM der Teilsysteme können dabei als Satz von Zufallsgrößen aufgefasst werden, die einer mul-

tivariaten Verteilungsfunktion genügen. Diese muss in einem Charakterisierungsprozess bestimmt werden. Die charakterisierten SBMs können dann in einer schnellen Gesamtsystemsimulation eingesetzt werden, um die Statistik der Systemeigenschaften zu ermitteln. Das Vorgehen ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

Eine Zerlegung und Charakterisierung von Teilsystemen ist prinzipiell für beliebige Systeme möglich. Wir beschränken uns hier jedoch auf analoge Schaltungen, bei denen Schwankungen auf Transistorlevel auf Schwankungen der Gesamtschaltungseigenschaften abgebildet werden sollen.

Den Kern der Methodik stellt die multivariate, statistische Modellcharakterisierung dar, welche im Folgenden genauer erläutert wird. Dabei werden Stichproben aus der Statistik der TP gezogen und für jeden Block typische I-U-Kennlinien simuliert. Das parametrisierte SBM wird dann durch Optimierung an die simulierten Kennlinien angepasst. Damit ergibt sich eine multivariate Statistik der SBM-Parameter. Dieser Ablauf ist in Bild 3 dargestellt.

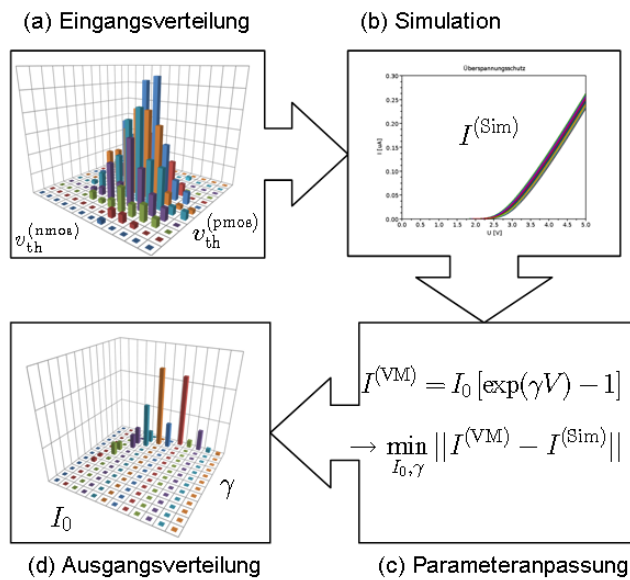


Bild 3 Ablauf des Charakterisierungsprozesses: Mit der multivariaten (a) Verteilung der Transistorparameter werden (b) I-U-Kennlinien simuliert, welche dann auf die Parameter eines SBM durch (c) Optimierung abgebildet werden. Schließlich ergibt sich (d) eine multivariate Verteilung der SBM-Parameter.

Da unterschiedliche Schaltungsblöcke aus gleichen Transistoren aufgebaut sind, entstehen signifikante Korrelationen auf Blocklevel, welche keinesfalls vernachlässigt werden dürfen [10]. Die multivariate Charakterisierung stellt sicher, dass alle Korrelationen korrekt erfasst werden. Blöcke können zwar einzeln charakterisiert werden, allerdings müssen dabei immer die gleichen Sätze von TPs benutzt werden. So werden auch Korrelationen zwischen unterschiedlichen Blöcken korrekt berücksichtigt. Es können entweder alle Blöcke gleichzeitig innerhalb einer Testbench charakterisiert werden, oder es werden

Sätze von TPs zuvor ausgewürfelt und bei der Charakterisierung eingelesen, statt diese mit einem internen Zufallszahlengenerator zu erzeugen.

Zusammenfassend kann die vorgestellte Methodik in die im Folgenden beschriebenen Schritte unterteilt werden. Zur Vereinfachung der Darstellung wird dabei nur der Übergang von der Transistorebene zur nächst höheren Abstraktionsebene – hier mit Verhaltensmodellebene bezeichnet – beschrieben:

1. Zerlegung des Gesamtsystems in Teilsysteme, für die Beschreibungen auf Transistorebene vorliegen
2. Erstellung von Verhaltensmodellen für die Teilsysteme
3. Erstellung von Testschaltungen zur Bestimmung der Parameter der Verhaltensmodelle
4. Monte-Carlo-Simulation der Testschaltungen unter Verwendung der Beschreibungen auf der Transistorebene. Dabei ist sicherzustellen, dass jeweils in der i. Simulation für alle Testschaltungen gleiche globale Parameter verwendet werden.
5. Anpassung der Parameter der Verhaltensmodelle an die Simulationsergebnisse
6. Approximation der multivariaten Modell-Parameter-Statistik der Verhaltensmodelle durch verallgemeinerte Lambda-Verteilungen (GLD) sowie Rangkorrelationskoeffizienten (siehe Abschnitt 4)
7. Beschleunigte Simulation der Gesamtschaltung mit statistischen Verhaltensmodellen (SBM)

3 Verhaltensmodellierung

Ein zentrales Element der Methode ist die Erstellung geeigneter Verhaltensmodelle. Dies ist nach wie vor ein schwer automatisierbarer Prozess und verlangt Finger-spitzengefühl. Je mehr Freiheitsgrade ein Block besitzt, desto mehr Zusammenhänge können sich innerhalb des Blocks verbergen und desto komplexer kann die Modellierungsaufgabe ausfallen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Automatismus in Zukunft verfügbar sein wird. In der Literatur werden seit vielen Jahren Verfahren zur automatisierten Erstellung effizienter Verhaltensmodelle untersucht [11][12][13]. Zur Diskussion stehen dabei verschiedene Ansätze, die von der symbolischen Approximation des entstehenden Gleichungssystems [14][15] bis hin zu numerischen Verfahren auf der Grundlage von tabellierten Daten [11] reichen. Sobald Wissen über die interne Struktur und die Funktion eines Blockes vorliegen, bieten sich auch Template-basierte Modellierungsverfahren an [16][17].

Erfolgversprechende Ansätze sind das Einteilen der Schaltungsblöcke in Klassen, die sich mit gleichen funktionalen Abhängigkeiten beschreiben lassen. Falls vorhanden, könnten an dieser Stelle auch Modelle, die beim Top-Down-Entwurf entstanden sind, zum Einsatz kommen bzw. als Ausgangspunkt dienen. Eine korrekte Verhaltensmodellierung kann als größte Komplikation beim

Einsatz dieses Verfahrens gesehen werden. Für das vorgestellte Beispiel wurden die Modelle individuell erstellt. Dabei wurden aus Sicht der mathematischen Kondition einige Grundsätze guter Verhaltensmodelle offenbar, die bei diesem Vorgehen unbedingt zu beachten sind:

- Ähnliche Größenordnung der Parameter wählen
- Nur einen Parameter pro „Freiheitsgrad“
- Modell und ggf. auch Ableitung sollte stetig sein
- Stückweise Modellierung erzeugt oft Unstetigkeiten bzw. Bereiche, wo Ableitungen verschwinden und Gradientenverfahren instabil werden
- Nur den tatsächlich notwendigen Arbeitsbereich des Blocks genau modellieren, außerhalb jedoch eine sinnvolle Fortsetzung wählen (z. B. für Anfangswertbestimmung des Simulators)
- Bei zu komplexem Verhalten sollte eine hybride Modellierung erwogen werden (Transistoren teilweise im Modell belassen)

Die mathematische Stabilität der Modelle spielt eine entscheidende Rolle bei der Parameteranpassung. Werden die genannten Grundregeln missachtet, kann der numerische Optimierungsprozess ggf. keine eindeutige Lösung finden und es entstehen Artefakte in der Statistik der SBM-Parameter.

Die vorgestellte Methode beschränkt sich nicht auf die Analyse statischer Probleme. Die im Folgenden beschriebenen Schritte lassen sich ebenso auf transiente Verhaltensmodelle mit zeitunabhängigen Parametern anwenden.

4 Modellierung der Verteilungen

Wurden die Modelle korrekt parametrisiert, muss die bei der Charakterisierung ermittelte Statistik des Modells erfasst werden. Diese wird im allgemeinsten Fall durch eine blockübergreifende, hochdimensionale Verteilungsfunktion beschrieben. Eine praktikable Approximation ist die Trennung zwischen der Beschreibung der Randverteilungen und der Abhängigkeitsstruktur. Zur Beschreibung der Randverteilungen werden die Häufigkeitsverteilungen der Modellparameter auf verallgemeinerte Lambda-Verteilungen (GLD) abgebildet [9]. Die GLD ist eine parametrisierte Familie von Verteilungsfunktionen, deren Parameter sich mit Kenntnis der ersten vier empirischen Momente einer Stichprobe in den meisten Fällen sehr gut bestimmen lassen. Die GLD ist gegeben durch ihre Quantilsfunktion, also als Inverse der Verteilungsfunktion:

$$x = Q_X(y) = \lambda_1 + \frac{y^{\lambda_3} - (1 - y)^{\lambda_4}}{\lambda_2}$$

wobei $\lambda_1, \dots, \lambda_4$ die GLD-Parameter sind, y das Quantil und x der zum Quantil gehörende Wert der Zufallsgröße. Die analytische Form der Quantilsfunktion ist vorteilhaft bei der Erzeugung von Zufallszahlen für die so beschriebene Verteilung. Zufallszahlen können leicht unter Verwendung (0,1)-gleichverteilter Zufallszahlen generiert werden:

$$x = Q_X(y), \quad y \sim U(0,1).$$

Auf Bauelement-Ebene (SPICE-Ebene) werden statistische Abhängigkeiten häufig durch Normalverteilungen beschrieben, was bereits eine grobe Approximation darstellt. Unter diesem Gesichtspunkt kann die GLD natürlich keine „Verbesserung“ herbeiführen. Die GLD stellt jedoch sicher, dass die sich aus nichtlinearen Abhängigkeiten ergebenden, nichtnormalverteilten Größen korrekt abgebildet werden und der zusätzliche Approximationsfehler aufgrund der Methodik gering gehalten wird.

Neben der Beschreibung der Randverteilungen muss die Abhängigkeitsstruktur zwischen den Modellparametern erfasst werden. Diese wird in Form von Rangkorrelationskoeffizienten (Spearman-Korrelationskoeffizienten) abgelegt, welche aus zwei Stichproben wie folgt gewonnen werden (sofern alle Beobachtungen verschieden):

$$r_S = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{mit} \quad d_i = rg(x_i) - rg(y_i)$$

wobei $rg(x_i)$ die Position der i -ten Beobachtung in aufsteigender Sortierung aller Beobachtungen darstellt. Der Rangkorrelationskoeffizient entspricht dem üblicherweise verwendeten (Pearson-)Korrelationskoeffizienten, wenn anstelle der Werte der einzelnen Beobachtungen deren Ränge verwendet werden. Der Rangkorrelationskoeffizient zweier Zufallsgrößen ändert sich nicht, wenn diese der Transformation mit einer monoton steigenden Abbildung unterworfen werden.

Eine Quantilsfunktion einer stetigen Zufallsgröße ist eine solche monoton steigende Funktion. Damit eröffnet sich ein Weg zur Beschreibung von Zufallsvariablen mit gegebener Rangkorrelationsmatrix. Für normalverteilte Zufallsvariablen existiert ein analytischer Zusammenhang zwischen Rangkorrelationskoeffizienten und (Pearson-)Korrelationskoeffizienten. Damit ist es möglich, normalverteilte Zufallszahlen mit gegebener Rangkorrelationsmatrix zu generieren. Aus diesen Zufallszahlen können gleichverteilte Zufallszahlen mit gleicher Rangkorrelationsmatrix unter Verwendung der Inversen der Verteilungsfunktion Φ der Standardnormalverteilung abgeleitet werden. Diese gleichverteilten Zufallsvariablen können dann mittels der GLD-Quantilfunktionen in Zufallsvariablen zur Beschreibung der Parameter der Teilsysteme überführt werden

$$x = Q_X(\Phi^{-1}(z)), \quad z \sim N(0,1), x \sim \text{GLD}$$

(zu Einzelheiten und weiterführender Literatur siehe z. B. [18]). Die Beschreibung der Korrelationen muss für alle Parameter des Gesamtsystems erfolgen, um sämtliche Abhängigkeiten zwischen den Blöcken zu berücksichtigen. Ein statistisches Verhaltensmodell ist somit ein parametrisiertes Verhaltensmodell mit einer Beschreibung der Verteilung der Parameter (Randverteilungen) plus Beschreibung der Korrelation zu allen anderen Parametern des Systems. Mit diesen Bausteinen kann schließlich eine Simulation auf Basis von SBMs mit Variationen der Mo-

dellparameter durchgeführt werden. Damit werden Monte-Carlo-Simulationen sehr großer Schaltungen möglich, bei denen die Statistik auf Transistorlevel zwar korrekt erhalten bleibt, jedoch nicht mehr explizit im Modell angegeben wird.

5 Beispiel RFID-Frontend

Die hier vorgestellte Methodik wurde an dem Beispiel der Leistungsaufnahme eines RFID-Frontends getestet. Damit können Aussagen zur Reichweiteschwankung des Gesamtchips aufgrund von Prozessschwankungen der Bauelemente getroffen werden. Die überschaubare Größe der Gesamtschaltung mit ca. 100 BSIM-Transistoren wurde so gewählt, dass die Methodik mit einer Monte-Carlo-Simulation auf Transistorlevel verglichen werden kann. Der Geschwindigkeitsgewinn durch Verhaltenssimulation hängt stark von der Größe der modellierten Einzelblöcke, also der Zahl der Transistoren im Block, ab. Für kleinere Blöcke wird die Simulation durch den Einsatz von Verhaltensbeschreibungssprachen nicht zwangsläufig effizienter. So war auch in dem hier betrachteten Beispiel keine signifikante Beschleunigung der Simulation zu verzeichnen. Bei zunehmender Größe der Blöcke sind jedoch merkbare Geschwindigkeitsgewinne zu erwarten.

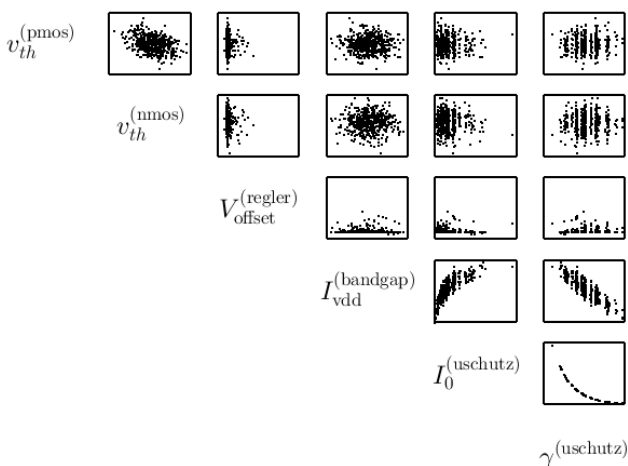


Bild 4 Scatterplots ausgewählter Transistor- und Modellparameter für 500 Stichproben.

Die Schaltung des RFID-Frontends ist in folgende Blöcke unterteilt:

- Überspannungsschutz
- Bandgap
- LDO-Regler
- Spannungsteiler
- Power-on Reset

Um das wesentliche Verhalten eines Blocks bis zur notwendigen Genauigkeit korrekt wiederzugeben, reichten für das Beispiel zwischen 2 und 10 Parameter pro Block aus, insgesamt also 25 SBM-Parameter. Auf SPICE-Niveau wird jeder der 100 BSIM-Transistoren mit mehr als 150 Parametern beschrieben, für die Gesamtschaltung

also ca. 15000 TP. Für jeden Block wurde eine separate Charakterisierungs-Testbench aufgebaut. Diese wurden wiederum in einer gemeinsamen Testbench nebeneinander angeordnet, um sicherzustellen, dass bei der Charakterisierung für alle Blöcke die gleichen Sätze an TP verwendet werden (siehe Abschnitt 2).

Ergebnisse

Die statistische Charakterisierung wurde für alle Blöcke mit 500 Stichproben durchgeführt. Die sich ergebenden Abhängigkeiten zwischen den Modellparameter können sehr anschaulich in einem Scatterplot dargestellt werden, bei dem jeweils ein Wertepaar zweier Parameter als Punkt eingezeichnet wird. Darüber hinaus können auch Abhängigkeiten zwischen Transistor- und Modellparameter dargestellt werden. Bild 4 zeigt Scatterplots beispielhaft für je zwei Transistorparameter sowie vier Modellparameter aus drei unterschiedlichen Blöcken (Regler, Bandgap, Überspannungsschutz).

Die beiden Parameter des Überspannungsschutzes zeigen die stärkste Korrelation und könnten ggf. durch einen Parameter ersetzt werden. Signifikante Korrelationen zwischen Transistor- und Modellparametern sind unter den ausgewählten Parameter nur bei V_{offset} des Reglers zu erkennen. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, werden diese Korrelationen quantitativ mit Rangkorrelationskoeffizienten beschreiben.

Schließlich wurde auf Basis der SBM die Leistungsaufnahme des gesamten Frontends ermittelt und mit einer SPICE-Simulation verglichen. Es wurden 500 Simulationen mit SPICE und 5000 Simulationen mit SBMs durchgeführt. In Bild 5 sind die Häufigkeitsverteilungen beider Methoden vergleichend dargestellt. Die ersten beiden empirischen Momente der Verteilungen sind im Diagramm kenntlich gemacht und zeigen sehr gute Übereinstimmung.

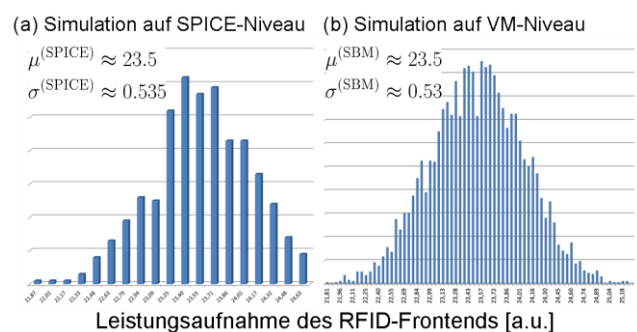


Bild 5 Häufigkeitsverteilung der Leistungsaufnahme ermittelt auf Basis (a) 500 SPICE-Simulationen und (b) 5000 SBM-Simulationen. Mittelwerte und Streuungen sind in den Diagrammen dargestellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Methodik zur statistischen, hierarchischen Simulation analoger Schaltungen vorgestellt. Da für große Schaltungen eine detaillierte Monte-Carlo-Analyse auf Transistorlevel oftmals nicht möglich ist, basiert diese Methode auf einer Zerlegung des Systems in Teilsysteme bzw. Blöcke, von welchen parametrische, statistische Verhaltensmodelle (SBM) erstellt werden, auf Basis derer eine schnelle, statistische Gesamtsystemsimulation möglich wird. Der limitierende Faktor dieses Ansatzes liegt bei der Erstellung stabiler Verhaltensmodelle. Diese wurden für das Beispiel manuell erstellt. Es wurde eine statistische Simulation der Leistungsaufnahme eines RFID-Frontends auf Basis von SBMs mit SPICE verglichen und eine sehr gute Übereinstimmung erzielt.

Zukünftige Arbeiten sind auf die weitere Automatisierung des vorgestellten Verfahrens und die Untersuchung komplexerer Beispielschaltungen ausgerichtet. Bisher wurde die Methodik nur auf statische Probleme angewandt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der Internen Programme der Fraunhofer Gesellschaft gefördert unter der Fördernummer MAVO 817 759. Die Autoren danken den Gutachtern für ihre Hinweise.

Literatur

- [1] Srivastava, A.; Sylvester, D.; Blaauw, D.: Statistical Analysis and Optimization for VLSI: Timing and Power. New York: Springer Science + Business Media, 2005.
- [2] The International Technology Roadmap on Semiconductors, 2009 issue – siehe www.itrs.net.
- [3] Kovac, U. et. al.: A Novel Approach to the Statistical Generation of Non-normal Distributed PSP Compact Model Parameters using a Nonlinear Power Method, Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), 2010.
- [4] Banerjee, N.; Chandra, S.; Ghosh, S.; Dey, S.; Raghunathan, A.; Roy, K.: Coping with Variations through System-Level Design. 22nd Int. Conference on VLSI Design, pp.581-586, 5-9 Jan. 2009
- [5] Springer, S. K.; Lee, S.; Lu, N.; Nowak, E. J.; Plouchart, J.-O.; Watts, J. S.; Williams, R. Q.; Zamdmer, N.: Modeling of Variation in Submicrometer CMOS ULSI Technologies. IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-53 (9), pp. 2168-2178, 2006.
- [6] PrimeTime. Datenblatt der Firma Synopsys. http://www.synopsys.com/Tools/Implementation/SignOff/Documents/primetime_suite_ds.pdf
- [7] Lorenz, J.; Bär, E.; Clees, T.; Jancke, R.; Salzig, C.; Selberherr, S.: "Hierarchical Simulation of Process Variations and their Impact on Circuits and Systems: Methodology", to appear in IEEE Trans. Electron Devices, Special issue on *Characterization of Nano CMOS Variability by simulation and measurement*, vol. 58, no. 8, Aug. 2011
- [8] Jancke, R.; Kampen, C.; Kilic, O.; Lorenz, J.: Hierarchischer Ansatz für die Monte-Carlo-Simulation komplexer Mixed-Signal-Schaltungen. Proc. 11. ITG/GMM-Fachtagung ANALOG 2010, Erfurt, Germany, 2010, S. 185-190
- [9] Karian, Z. A.; Dudewicz, E. J.: Fitting statistical distributions: The Generalized Lambda Distribution and Generalized Bootstrap methods. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [10] Lange, A.; Sohrmann, C.; Jancke, R.; Haase, J.; Cheng, B.; Kovac, U.; Asenov, A.: A General Approach for Multivariate Statistical MOSFET Compact Modeling Preserving Correlations. Angenommen zur Veröffentlichung, ESSDERC 2011, Sept. 2011
- [11] Senger, P.; Xiao, S.; Dölling, R.; Rosenstiel, W.: Automatische Generierung elektrischer Verhaltensmodelle mittels effizienter datenbasierter Methoden. in Proc. 11. ITG/GMM-Fachtagung ANALOG 2010, Erfurt, Germany, 2010, S. 45-52
- [12] Gielen, G.: Design and modeling tools for analog/RF circuits in mixed-signal integrated systems on chip. Proc. FDL'02, Marseille, Sept. 2002
- [13] Borchers, C.: Automatische Generierung von Verhaltensmodellen für nichtlineare Analogschaltungen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 254, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1997
- [14] Nähnke, L.; Volodymyr B.; Hedrich, L.; Barke, E.: Hierarchical Automatic Behavioral Model Generation of Nonlinear Analog Circuits based on Nonlinear Symbolic Techniques. Proc. DATE 2004, Vol.1, pp. 442-447, Feb. 2004
- [15] Sommer, R.; Platte, D.; Broz, J.; Dreyer, A.; Halfmann, T.; Barke, E.: Automatic nonlinear behavioral model generation using sequential equation structure. Proc. SMACD, 2006, pp. 79-84
- [16] Frevert, R.; Harasymiv, I.; Hartong, W.; Knöchel, U.: Automatische Generierung templatebasierter HF-Basisband-Modelle. Proc. ANALOG'05, Hannover, März 2005
- [17] Jancke, R.; Schwarz, P.: Supporting Analog Synthesis by Abstracting Circuit Behavior Using a Modeling Methodology, Proc. Internat. Symp. Circuit and Systems, ISCAS 2006, Kos, Greece, May 2006
- [18] Phoon, K.-K. et. al.: Simulation of non-Gaussian processes using fractile correlation. *Probabilistic Engineering Mechanics* 19, 2004, pp. 287-292.