

# Entwurf Robuster Nanoelektronischer Systeme

Von Martin Barke, Lars Hedrich, Domenik Helms, Weiyun Lu, Markus Olbrich, Martin Radetzki, Björn Sander, Volker Schöber, Dieter Treytnar

**In diesem Projektbericht wird die Motivation zum Clusterforschungsprojekt ROBUST und ein Überblick über erste Ergebnisse zur Hälfte der Laufzeit dargestellt. Im Projekt werden erstmals Maße zur Quantifizierung der Robustheit komplexer Systeme definiert. Diese Maße werden mit Hilfe zu abstrahierender Robustheitsmodelle und unter Anwendung neuer Robustheitsanalyseverfahren für die Systemebene ermittelt. Die Robustheitsmaße werden eingesetzt, um beim Entwurf statische und dynamische Verfahren anzuwenden, die zur Verbesserung der Robustheit führen. Als Ergebnisse entstehen neue Methoden und prototypische Werkzeuge, welche im Rahmen eines Top-Down-Systementwurfs die Robustheit – beginnend von der Systemebene – berücksichtigen. Die Methoden und Prototypen werden durch Anwendung auf ein Demonstrator-Design evaluiert und den industriellen Projektpartnern für weiterführende Arbeiten zur Integration in ihren Entwurfsprozess zur Verfügung gestellt. Die Forschungspartner stellen neben einem neuen Ansatz zur Beschreibung der Robustheit ihre aktuellen Ergebnisse vor.**

## Einleitung und Motivation

Die zunehmende Miniaturisierung elektronischer Strukturen in Chips bei gleichzeitiger Steigerung der Komplexität führt zu einer wachsenden Störanfälligkeit elektronischer Systeme, was gleichzeitig eine sinkende Robustheit bedeutet. Darüber hinaus wächst der Einfluss von Degradationseffekten in der Elektronik im Betrieb. Das Clusterforschungsprojekt ROBUST nimmt sich dieser Problematik an und erforscht neue Methoden zur Analyse und Steigerung der Robustheit nanoelektronischer Systeme schon in der Entwurfsphase.

Mit dem Clusterforschungsprojekt ROBUST werden neue innovative Entwurfstechniken für die deutsche Industrie erforscht, um in 5–10 Jahren hochwertige elektronische Systeme für einen robusten Betrieb kostengünstig herstellen zu können. Dazu werden mit dem Projekt zum einen Robustheitsmaße erforscht, um Robustheit erstmals zu bewerten und zum anderen Entwurfsmethodiken, die diese Robustheit gezielt verbessern. Robustheit im Betrieb kann somit durch ROBUST über die ganze Lebensdauer in elektronischen Systemen erstmals auf Basis von Robustheitsmaßen quantifiziert und gezielt schon während des Entwurfs verbessert werden. ROBUST stellt dabei die neuen Entwurfsverfahren der deutschen Industrie prototypisch zur Verfügung, damit die Industrie die neuen Methoden für ihre Entwurfsprozesse evaluieren und den industriellen Anforderungen anpassen kann.

Unter Robustheit eines elektronischen Systems ist zu verstehen, dass das System seine spezifizierten Funktionalität auch erfüllen kann, wenn es im Fertigungsprozess zu Variationen sowie im Betrieb zu Schwankungen der Umgebungsparameter (z. B. Spannung, Temperatur), Alterung des elektronischen Systems oder auch Störungen durch die Umgebung (z. B. Strahlung, elektromagnetische Felder) kommt. Die Robustheit eines elektronischen Systems muss sowohl die Reaktion

auf Fertigungsschwankungen als auch auf zeitliche Variabilitäten im Betrieb umfassen. Insbesondere die Berücksichtigung der Betriebsphase schon während des Entwurfs ist zur Zeit weitgehend Gegenstand der Forschung. Um Lösungen zu erarbeiten, ist ein umfassendes Verständnis von Robustheit statt isolierter Einzellösungen erforderlich. Beispielsweise darf nicht nur ein physikalischer Effekt – wie Elektromigration – über die Betriebszeit betrachtet werden. Es müssen vielmehr alle Effekte, die eine Schaltung negativ beeinflussen können, analysiert und deren quantitative Bedeutung verglichen werden.

Die Auswirkungen einzelner Faktoren wie z. B. Alterungseffekte von Transistoren und Leitbahnen, Temperaturprofile durch den Nutzer oder Strahlung durch den Einsatz in rauer Umgebung müssen analysiert und modelliert werden können. Darauf aufbauend können Verfahren zum Entwurf robuster Systeme erforscht werden. Ohne neuartige Entwurfs- und Architekturansätze können notwendige Garantien bezüglich Robustheit, Zuverlässigkeit und eines definierten Zeitverhaltens nanoelektronischer Schaltungen und Systeme nicht für den gesamten Betriebszeitraum gegeben werden. Das Projekt will mit seinen Ergebnissen zur Robustheitsbewertung die Industrie unterstützen, ein industriell akzeptiertes Robustheitsmaß für Elektroniksysteme einzuführen.

## Gliederung des Projekts

Um die Robustheit nanoelektronischer Systeme im Entwurf zu berücksichtigen, gliedert sich das Projekt in drei Aufgabenbereiche (Abbildung 1.03), die die Themen Robustheitsmodelle, Analyse auf Systemebene sowie die Optimierung erforschen.

Als Querschnittsthemen im Projekt werden prototypische Demonstrationen aufgebaut sowie die Erforschung eines allgemeinen Robustheitsmaßes

## Zusammensetzung des Projektkonsortiums:

**Koordination**  
edacentrum GmbH

**Forschungspartner**  
FZI Forschungszentrum Informatik  
OFFIS e. V. – Institut für Informatik  
TU München  
Universität Frankfurt  
Universität Hannover  
Universität Stuttgart

**Industriepartner**  
Atmel Germany GmbH  
Cadence Design Systems GmbH  
CST – Computer Simulation Technology AG  
Infineon Technologies AG  
Northrop Grumman LITEF GmbH  
Melexis GmbH  
Robert Bosch GmbH  
X-Fab Semiconductor Foundries AG

**Förderkennzeichen**  
01 M 3087

**Laufzeit des Vorhabens**  
01.04.2009–31.03.2012

**Homepage**  
[www.edacentrum.de/robust/](http://www.edacentrum.de/robust/)



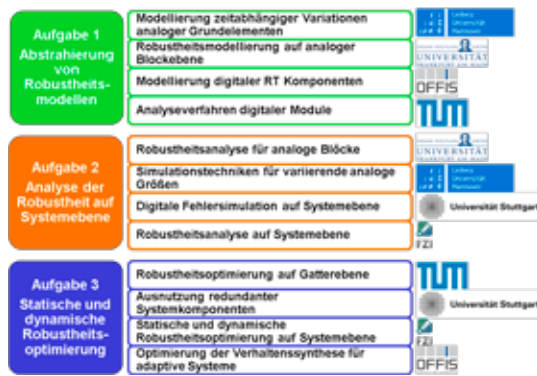


Abbildung 1.03: Strukturbild von ROBUST mit drei Aufgaben mit je vier Beiträgen

für Elektroniksysteme vorangetrieben. Die Arbeiten zum Robustheitsmaß erfolgen in Abstimmung mit den Industriepaten, wozu auch die jährlichen Projektworkshops genutzt werden. ROBUST hat dazu schon beachtliche Ergebnisse erreicht, die im Nachfolgenden beschrieben sind.

### Warum altern elektronische Systeme?

Alterungserscheinungen und daraus resultierende Robustheitseinbußen werden in aktuellen und kommenden Technologien einen bedeutenden Einfluss auf den Entwurf und das Verhalten digitaler Systeme haben. Was aber ist Alterung und wodurch wird sie verursacht?

Jede neue Transistorgeneration ist kleiner als die vorhergehende. Mittlerweile ist der Transistorkanal weit weniger als 100 Atome lang. Bei dem Vorstoß in atomare Dimensionen nimmt die Zahl der parasitär auftretenden Effekte, die in der Vergangenheit nicht berücksichtigt werden mussten, immer weiter zu. Es gibt dabei vier wesentliche Effekte [1], die zu einer nachteiligen Veränderung des Systemverhaltens über dessen Lebenszeit (also zu einer Alterung) führen können. Diese Effekte sind teilweise bereits seit Jahrzehnten bekannt, werden aber erst jetzt relevant. Zwei der bekanntesten, und gleichzeitig auch relevantesten Alterungseffekte sind Negative-Bias-Temperature-Instabilität (NBTI) und Hot-Carrier-Injection (HCI).

- » Beim NBTI-Effekt, der nur eine der zwei grundlegenden Transistorarten, den PMOS, betrifft, kommt es im Betrieb zum Verlust von Wasserstoff im Kanal, was zu einer Verlangsamung des Transistors führt. Wird nach kurzer Betriebszeit der Transistor deaktiviert, findet ein Großteil des diffundierten Wasserstoffes an seinen Platz zurück, so dass der Schaden ausheilen kann. Durch häufige und/oder lange Betriebszeiten vor allem bei hohen Temperaturen kann der Wasserstoff aber auch so weit diffundieren, dass eine vollständige Regeneration des Systems nicht mehr möglich ist.
- » Der HCI-Effekt hingegen tritt nur in der anderen Transistorart (NMOS) nachteilig auf. Hier reichern sich über lange Zeiten Elektronen in der Gatteriso-

lierung an – ein Effekt, der auch zum Beschreiben einer Flash-Speicherzelle genutzt wird. Anders als bei den Flash-Speichern reicht die Versorgungsspannung aber nicht aus, um die Elektronen wieder aus der Isolation zu entfernen, so dass eine dauerhafte Vorladung des Transistors und dementsprechend eine Verringerung der Arbeitgeschwindigkeit resultiert.

Beide Effekte sind Beispiele für parametrische Alterung, die eine graduelle Reduktion der Arbeitgeschwindigkeit bewirkt. Aus Systemsicht treten diese Effekte zunächst sporadisch, dann immer häufiger als Fehler auf, die sich zunächst nur bei hohen Temperaturen, nach langer ununterbrochener Betriebsdauer oder als Reaktion auf große Spannungsschwankungen zeigen. Auf die Verlustleistung hat HCI einen geringen Einfluss, NBTI reduziert diese sogar leicht.

- » Bei der Elektromigration (EM) können die Rumpftome der Metall-Leitungen aufgrund des Impulsübertrags der Elektronen bei hohen Temperaturen und Stromstärken aus ihrer Ausgangslage gebracht werden. Das kann bei Fehlstellen zu einem erhöhten Leitungswiderstand oder auch zu Leitungsunterbrechungen führen. Bei Ansammlungen der Rumpftome kann dies hingegen zu Kurzschlüssen führen.
- » Beim Time-Dependent-Dielectricity-Breakdown (TDDB) kann aufgrund von Gitterfehlern, Verunreinigungen oder Ladungen (vgl. HCI) im Isolator des Transistors die Feldstärke kritisch ansteigen, so dass es zu einem Durchschlag und somit zu einem vollständigen Ausfall des jeweiligen Transistors kommt.

Alle diese Effekte sind in ihrer Wechselwirkung stark abhängig vom Nutzungsprofil des Systems im Betrieb. Aus Systemsicht können sich EM und TDDB sehr unterschiedlich zeigen, je nachdem, welche Art von Leitung von der EM betroffen ist: Datenleitungen führen nur geringe Ströme, welche zudem bidirektional fließen können; beides reduziert den Effekt von EM. In den unidirektionalen Versorgungsleitungen fließen sehr hohe Ströme, dafür sind diese Leitungen sehr breit, was auch EM reduzierend ist. Es ist also von der Dicke der Versorgungsleitungen abhängig, ob EM in den Versorgungs- oder Datenleitungen auftritt. Ein EM-Schaden in einer Datenleitung bewirkt genau wie der TDDB-Zusammenbruch eines Transistors einen sofortigen und permanenten Ausfall eines oder einiger Gatter, was üblicherweise (wenn keine Redundanzen wie beispielsweise in Speicherblöcken vorhanden sind) zum Ausfall einer ganzen Komponente führt. Ein EM-Schaden in einer Versorgungsleitung hingegen führt je nach Layout des Versorgungsnetzwerkes zu einem starken Spannungsabfall oder sogar zu einem vollständigen Ausfall einer ganzen Standardzellenreihe und führt dementsprechend zum sofortigen Ausfall gleich mehrerer Komponenten des Systems.

## Alterungsresistente Systeme

Zunächst erscheint der genaue Grund für ein Systemversagen irrelevant. Wenn Systeme nicht mehr einwandfrei arbeiten, werden sie ausgetauscht. Dieser aktuell verfolgte Ansatz führt jedoch zu Instandhaltungs- und Ausfallkosten, die die Kosten der ausgefallenen Elektronik um ein Vielfaches übersteigen. Die Kenntnis um den Ausfallgrund ist jedoch notwendig, wenn der Schaden schon in der Entwurfsphase durch ein verbessertes Design vermieden werden soll. Das System wird damit robuster und erscheint alterungsresistenter.

Fehlern, die aufgrund von parametrischen Effekten auftreten, kann ebenfalls parametrisch entgegengewirkt werden: Ein parametrisch defektes System kann durch eine Reduktion der Taktfrequenz, und/oder Anhebung der Versorgungsspannung weiter lauffähig gehalten werden. Dafür gibt es heute leistungsfähige Verfahren, die eine Detektion parametrischer Fehler zur Laufzeit ermöglichen [2,3]. Derartige Systeme sind also reparabel, wenn eine entsprechende Verschlechterung von Performanz und/oder Energieverbrauch hinnehmbar ist.

Fehler, die lokal permanent auftreten, wie EM auf Datenleitungen, können nach bisherigem Kenntnisstand ausschließlich durch Redundanzen behoben werden. Hierbei kann je nach Regularität des Systems auf verschiedenen Ebenen Redundanz eingeplant werden, beispielsweise durch eine zusätzliche Zell-Reihe in Speichern oder zusätzliche arithmetische Einheiten in Prozessoren.

## Ergebnisse: Quantifizierung der Robustheit nanoelektronischer Systeme

In vielen technischen Zusammenhängen und auch in alltäglichen Lebenssituationen wird der Begriff Robustheit verwendet, ohne dass es eine formale oder gar quantifizierbare Definition davon gibt. Das kann zu Verwirrung oder begrifflicher Redundanz führen, die sich zum Beispiel in der nicht selten gehörten Aussage „Robust ist, wenn die Mean-Time-to-Failure hoch ist“ äußert, welche Robustheit implizit mit Zuverlässigkeit identifiziert.

Ein Beispiel aus dem Alltag zeigt dagegen, dass Robustheit und Zuverlässigkeit verwandte, aber zu unterscheidende Eigenschaften sind: Leidet ein Mensch bei normalen, komfortablen mitteleuropäischen Lebensbedingungen lediglich einmal im Jahr an einer leichten Erkrankung, etwa einer Erkältung, kann man zu Recht sagen, dass der Körper zuverlässig arbeitet und die Person mit einer verlässlichen Gesundheit ausgestattet ist. Doch genügt das, um jemand eine robuste Gesundheit zu bescheinigen? Nein; im üblichen Sprachgebrauch erfreut sich dieser eine Person, die auch unter ungewöhnlichen Bedingungen, etwa bei fortwährender Arbeit im Freien bei schlechtem Wetter oder bei Aufenthalt in extremen Klimazonen, nicht ernsthaft erkrankt.

Diese Auffassung von Robustheit spiegelt sich auch in folgender enzyklopädischen Definition wider: „Robust-

heit (lat. *robustus*, von *robur* Hart-, Eichenholz) ist die Fähigkeit eines Systems, seine Funktion auch bei Schwankungen der Umgebungsbedingungen aufrecht zu erhalten. Meist ist es sinnvoll anzugeben, wogegen das System robust ist (zum Beispiel gegen Änderung der Umgebungstemperatur oder gegen Fehlbedienung)“ [4]. Auf verschiedenen mathematisch-technischen Gebieten, etwa der Regelungstechnik [5], der Algorithmik [6] und der Statistik [7], gibt es spezialisierte Varianten dieses qualitativen Robustheitsbegriffes.

Übertragen auf das Gebiet der Automobilelektronik und Elektromobilität, in dem die zunächst angestrebten Anwendungen des Projekts ROBUST liegen, bedeutet dies: Ein Fahrzeug, das während der üblichen erwarteten Lebensdauer von etwa 13 Jahren bei normaler Nutzung ohne größere Reparaturen funktioniert, ist zuverlässig. Robustheit hingegen liegt vor, wenn das Fahrzeug auch unter verschärften Bedingungen oder aber für eine über das Übliche hinausgehende Zeit die erwarteten Eigenschaften erfüllt.

## Ein Ansatz zur mathematischen Beschreibung der Robustheit

Um den Robustheitsbegriff stärker zu formalisieren und Robustheit zu quantifizieren, ist es erforderlich, die erwarteten Eigenschaften genau zu erfassen. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei lediglich um eine Unterscheidung „funktioniert“ oder „funktioniert nicht“. Im Allgemeinen ist hingegen zu erwarten, dass verschiedene Eigenschaften funktionaler und nichtfunktionaler Art von einem System einzuhalten sind. Handelt es sich um  $n$  Eigenschaften, so spannen diese einen  $n$ -dimensionalen Raum auf. In jeder Dimension können die zulässigen Wertebereiche der Eigenschaftsgröße spezifiziert werden. Aus dem Kreuzprodukt dieser Bereiche ergibt sich das Teilgebiet des Eigenschaftsraums, in dem das System wie gewünscht funktioniert. Durch Angabe eines nicht-orthogonalen Gebiets können auch Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften erfasst werden.

In Analogie zu den erwarteten Eigenschaften müssen auch die normalen Betriebsbedingungen erfasst werden. Im Automobilbereich sind diese durch sogenannte „Mission Profiles“ spezifiziert, welche Ober- bzw. Untergrenzen für die als üblich angenommene Beanspruchung eines Automobils und seiner elektronischen Subsysteme vorgeben. Jede relevante Einflussgröße kann als eine Dimension eines  $m$ -dimensionalen Raums der Störeinflüsse erfasst werden. Durch Angabe eines Teilgebiets dieses Raumes wird ein Mission Profile festgelegt.

Abbildung 1.04 zeigt auf der linken Seite als Beispiel für Störeinflüsse die Umgebungstemperatur  $T$  sowie eine Schwankungsbreite der Versorgungsspannung  $U$ . Als normal aufgefasste Werte sind durch das Gebiet  $\Pi$  angegeben. Auf der rechten Seite sind als einzuhaltende Eigenschaften die Leistungsaufnahme  $P$  sowie

die Verzögerung (Latenz)  $d$  angegeben. Ein System  $F$  ist nun durch eine Abbildung charakterisiert, die angibt, wie die Störeinflüsse die Systemeigenschaften beeinflussen. Die klassische Methode zur Bestimmung dieser Abbildung ist der Test von Systemprototypen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Das Projekt ROBUST beabsichtigt, durch Analyse- und Simulationsverfahren eine entsprechende Bewertung bereits in frühen Entwurfsphasen zu ermöglichen.

Ein System, das, wie in Abbildung 1.04 dargestellt, schon für einige „Arbeitspunkte“ innerhalb des Mission Profile die spezifizierten Eigenschaften verletzt, ist nicht als robust zu bezeichnen. Nur wenn im Normalbetrieb alle Eigenschaften erfüllt sind, kann durch Tolerieren von Störeinflüssen, die über das Normale hinaus gehen, Robustheit geschaffen werden. Dies ist in Abbildung 1.05 der Fall: Über das Gebiet  $\Pi$  hinaus werden auch alle im Gebiet  $\Pi^f$  liegenden Störeinflüsse in akzeptable Eigenschaften abgebildet. Alternativ lässt sich Robustheit im Eigenschaftsraum dadurch erkennen, dass bei normalen Störeinflüssen die entstehenden Eigenschaften  $\Phi^f$  einen Spielraum zu den Grenzen des Gebiets  $\Phi$  aufweisen, so dass auch mit noch stärkeren Störungen umgegangen werden könnte. Nur in den rot dargestellten Gebieten führen die Störeinflüsse zu Eigenschaftsverletzungen.

Zwecks Bewertung der Robustheit wird im Handbuch für Robustheitsvalidierung [8] der Sicherheitsabstand zwischen dem Mission Profile  $\Pi$  und dem als Safe Operating Area bezeichneten Gebiet  $\Pi^f$  herangezogen. Dieser Abstand lässt sich jedoch nur für einzelne Dimensionen bestimmen; eine Abstandsmetrik, die Größen mit unterschiedlichen physikalischen Einheiten vermischt, wäre weder wohldefiniert noch sinnvoll interpretierbar. Um dennoch die verschiedenen Aspekte mit einem gemeinsamen Robustheitsmaß quantifizieren zu können, verfolgt ROBUST den Ansatz, Robustheit als Wahrscheinlichkeit zu definieren.

Robustheit verstehen wir in diesem Ansatz als die Wahrscheinlichkeit, dass ein System auch unter ungünstigen Störeinflüssen im Rahmen der spezifizierten Eigenschaften funktioniert. Dies kann auf die Störeinflüsse bezogen werden, die das Mission Profile überschreiten. Damit ist Robustheit die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass die Eigenschaften eingehalten werden, wenn das System außerhalb des Mission Profile arbeitet. Diese lässt sich im linken ebenso wie im rechten Diagramm von Abbildung 1.05 bestimmen als Quotient der Wahrscheinlichkeit des dunkelgrünen Gebiets und der Wahrscheinlichkeit des Komplements des hellgrünen Gebiets. Eine begriffliche Variante verzichtet auf das Mission Profile und betrachtet die Funktionswahrscheinlichkeit des Systems unter allen möglichen Störeinflüssen.

In der wahrscheinlichkeitsbasierten Definition spiegelt sich die begriffliche Nähe von Robustheit und Zuverlässigkeit wider. Jedoch setzt Robustheit erst bei Über-

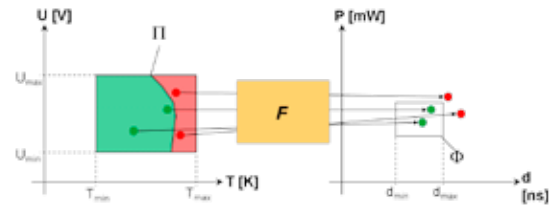


Abbildung 1.04: Abbildung der Störeinflüsse (links) in den Eigenschaftsraum (rechts) durch ein nicht-robustes System  $F$

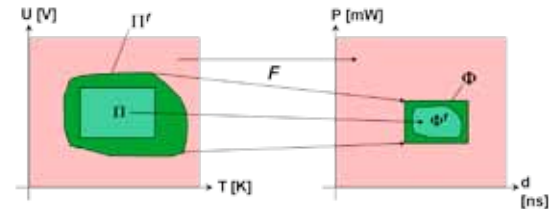


Abbildung 1.05: Ein robustes System  $F$  toleriert Anforderungen des Mission Profile übersteigende Störeinflüsse

schreiten des Rahmens des normalen Betriebs ein, innerhalb dessen Zuverlässigkeit bewertet wird. Zudem erlaubt es dieser Ansatz, den Robustheitsbegriff, die betrachteten Störeinflüsse und Eigenschaften explizit anzugeben, wodurch festgelegt wird, wogegen und bezüglich welcher Eigenschaften ein System robust sein soll. Mehr Details zu dem hier nur grob vorgestellten Ansatz sowie zu verwandten Arbeiten sind in [9] verfügbar.

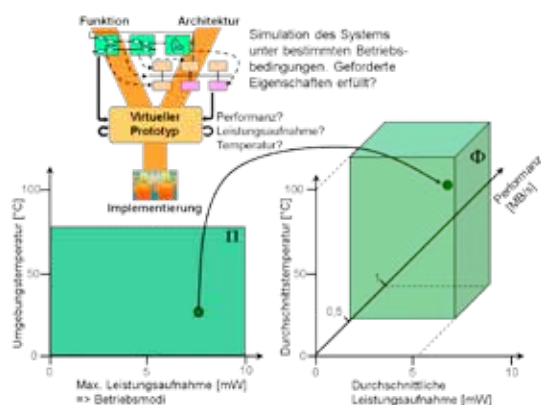
Im folgenden Abschnitt werden Arbeiten der Projektpartner zum Robustheitsmaß dargestellt.

### FZI: Robustheitsuntersuchungen auf Systemebene

Aus Komplexitätsgründen gewinnt die Systemebene (Electronic System Level, ESL) als Startpunkt des Entwurfs zunehmend an Bedeutung. Designalternativen werden auf ESL bezüglich verschiedener Entwurfsziele bewertet, in letzter Zeit einschließlich der Temperatur und der Zuverlässigkeit. Neben neuen Methoden zur Energieabschätzung sind in den vergangenen Jahren auch innovative Ansätze für Temperaturabschätzungen und temperaturbasierte Zuverlässigkeitsanalysen vorgeschlagen worden. Aber auch wenn die Notwendigkeit schneller Temperatur- und Zuverlässigkeitsanalysen in frühen Entwurfsphasen erkannt wird, ist bislang der Einfluss solcher Arbeiten auf die tägliche industrielle Systementwurfpraxis eher gering. Ein wichtiger Grund dafür mag die Tatsache sein, dass entsprechende ESL-Modelle und -Werkzeuge Effekte, die ihre Ursprünge tief in der Hardware haben, oft nicht in ausreichendem Maße berücksichtigen. Beispielsweise werden grobgranulare Abschätzungen der Energie, z. B. auf Prozessorebene, häufig als Basis für nachfolgende Temperaturbetrachtungen herangezogen. Temperaturen in Halbleiterbauteilen (und damit eventuell verbundene Zuverlässigkeitsprobleme) werden jedoch wesentlich durch lokale Effekte bestimmt. Eine Modellierung der Temperatur sollte deshalb auf einer möglichst feinen Granularitätsebene, d. h. auf Transistor- oder Gatterebene, erfolgen, um Hot Spots erkennen zu können.

Da aber für Analysen auf niedriger Ebene tatsächliche Nutzungsdaten nur selten vorhanden sind, wird hierbei häufig ein Worst-Case-Verhalten von Gattern bzw. Transistoren angenommen. Dies führt schnell dazu, dass das gesamte System am Ende des Entwurfs überdimensioniert und daher auch entsprechend teuer ist. Darüber hinaus ist die Betrachtung größerer Systeme aus Komplexitätsgründen oft kaum möglich und eine Einbeziehung der Umgebung des Systems – z. B. der Temperatur, die innerhalb eines Motorraums herrscht – überhaupt nicht vorstellbar. Auf der Systemebene hingegen sind die Charakteristika realer Applikationen verfügbar, wodurch eine Optimierung des Entwurfs speziell für den gedachten Anwendungsfall möglich ist. Umgebungsbedingungen sowie das Verhalten des Endverbrauchers können modelliert und einbezogen werden. Eine Verringerung der Lücke zwischen den Zielapplikationen auf der einen Seite und der hinreichend genauen Modellierung der Hardware andererseits ist eine der herausragenden Aufgaben auf Systemebene.

Vor diesem Hintergrund wird ein am FZI erforschter plattformbasierter Entwurfsablauf innerhalb des Projektes um applikationsabhängige Robustheitsaspekte erweitert. Wie man in Abbildung 1.06 erkennen kann, wird mit Hilfe einer Systemsimulation, die mit virtuellen Prototypen durchgeführt wird, eine Abbildung in den Eigenschaftsraum vorgenommen. Hierbei stehen insbesondere die Performanz, die Leistungsaufnahme sowie die Betriebstemperaturen des betrachteten Systems im Vordergrund. Die von den Projektpartnern in ROBUST erforschten Komponentenmodelle, mit denen sich alterungsabhängige Timing- und Leistungsdaten bestimmen lassen, werden dabei abstrahiert im Entwurfsfluss eingebracht. Unter Verwendung einer Aktivitätsanalyse werden für die betrachtete Plattform geeignete Mechanismen zur Reduzierung der Leistungsaufnahme abgeleitet und die Robustheit des Gesamtsystems berechnet. Eine stressreduzierende Applikationsabbildung auf eine Plattform kann durch die Untersuchung von Alternativen im Rahmen eines Explorationsprozesses erreicht werden.



**Abbildung 1.06:** Robustheitsuntersuchung auf Electronic System Level mit Hilfe virtueller Prototypen

## Universität Stuttgart: Fehlersimulation auf Systemebene

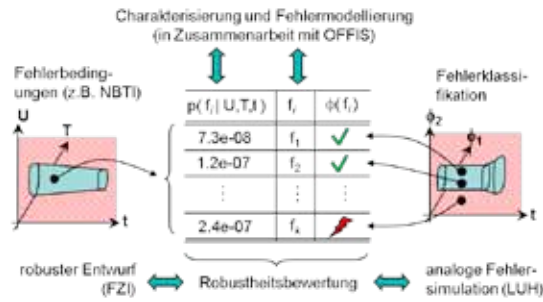
Der Schwerpunkt der Arbeiten der Universität Stuttgart liegt in der Untersuchung von Methoden und Verfahren zur Fehlersimulation digitaler Teile eines Systems und ergänzen die Arbeiten der Universität Hannover. Die Ergebnisse werden mit Hilfe der gemeinsamen genutzten Systemmodellierungsbibliothek SystemC-AMS sowie durch die angestrebte integrierte Robustheitsbewertung des Gesamtsystems zusammengeführt. An den Berührungspunkten zwischen analogen und digitalen Komponenten sind zudem die unterschiedlichen Fehlermodelle der beiden Welten ineinander zu übersetzen.

Im Zusammenhang mit dem oben beschriebenen Robustheitsmodell dient die Fehlersimulation dazu, die durch das System generierten Eigenschaften  $\Phi$  bei unterschiedlichen Störeinflüssen zu bewerten. Sie stellt damit letztlich die Abbildung von dem Raum der Störeinflüsse in den Eigenschaftsraum her. Allerdings kann diese Abbildung nicht in einem einzigen Schritt berechnet bzw. simuliert werden, da im Falle digitaler Systemteile ein direkter Schluss von analogen Störgrößen auf das resultierende Verhalten aufgrund der gewollten Abstraktion digitaler Modelle von analogen Details nicht möglich ist.

Stattdessen wird die Verbindung zwischen Störungen und Eigenschaften unter Nutzung des Konzepts bedingungsorientierter Fehlermodelle als Bindeglied hergestellt (vgl. Abbildung 1.07). Ein solches Fehlermodell basiert zunächst auf einer Menge von Fehlern, die für das digitale Modell angenommen werden. Anstelle klassischer Fehlermodelle – wie dem von der Gatterebene bekannten Stuck-at-Modell – können auf der Systemebene abstraktere Fehlermodelle eingesetzt werden. Die betrachteten Simulationsverfahren werden diesbezüglich flexibel ausgelegt, so dass Fehlermodelle austauschbar sind.

Der „bedingungsorientierte“ Anteil eines Fehlermodells beschreibt, wie wahrscheinlich das Auftreten eines Fehlers bei vorgegebenen Bedingungen, z. B. eines Fehlermechanismus wie NBTI und zugehöriger Parameter wie Spannung  $U$ , Temperatur  $T$  und Alter  $t$ , ist. Auf diese Weise wird eine Verbindung zum Raum der Störeinflüsse hergestellt. Die parameterabhängigen Wahrscheinlichkeiten müssen zu diesem Zweck für unterschiedliche Systemkomponenten individuell charakterisiert werden. Dies geschieht unter Nutzung der am OFFIS erforschten Verfahren. In diese fließen wiederum Informationen über die Stressbelastung der Komponenten im Systembetrieb ein, welche durch die Systemsimulation ermittelt werden.

Um nun die Robustheit eines Systems zu bestimmen, wird dieses zunächst mit Fehlern simuliert, wobei die Fehler bezüglich ihrer Auswirkungen klassifiziert werden. Dabei geht es vor allem darum, zu bestimmen,



**Abbildung 1.07:** Schematische Übersicht der Robustheitsbewertung mittels Systemfehlersimulation und bedingungsorientiertem Fehlermodell (Mitte).

ob das Auftreten eines Fehlers zu einer Verletzung spezifizierter Eigenschaften  $\Phi$  führt. Dieser Schritt ist aufwändig, da er systematisch für alle Fehler durchgeführt werden muss. Dies ist aber bei gegebenem System nur einmal erforderlich. In einem zweiten Schritt werden die Fehler mit ihrer charakterisierten Auftretenswahrscheinlichkeit  $p$  bei unterschiedlichen Störeinflüssen (im Beispiel der Abbildung 1.07:  $U$ ,  $T$  und  $t$ ) bewertet. Durch Summation wird die Wahrscheinlichkeit einer Eigenschaftsverletzung bestimmt, und es kann mit dem oben beschriebenen mathematischen Ansatz die Robustheit berechnet werden.

Zwecks gegenseitiger Validierung werden im weiteren Verlauf des Projekts die charakterisierten Fehlermodelle und das Simulationsverfahren zur Bewertung robustheitssteigernder Entwurfsmaßnahmen eingesetzt, die Gegenstand der Forschung am FZI sind.

### Universität Frankfurt: Alterungsmodelle analoger Schaltungen

Besonders relevant für die Bestimmung der Robustheit einer analogen Schaltung sind durch Alterung bedingte Verhaltensänderungen. Dies liegt mitunter daran, dass analoge Schaltungen, die selbst nur wenige Transistoren enthalten, komplexe Regel- und Messaufgaben bewältigen müssen, die eine sehr präzise Funktion erfordern. Um das Verhalten auch nach langem Betrieb zu gewährleisten, ist es notwendig, den Einfluss der Alterung auf die Funktion zu berechnen. Während des Entwurfs werden diese Eigenschaften durch Simulationen abgesichert, die in der Regel noch keine Alterungseffekte modellieren, sondern von einem frisch gefertigten Chip ausgehen.

Eine übliche Methode, um das Verhalten nach Alterung einiger Tage, Wochen, Monate und Jahre zu simulieren, basiert auf der Kenntnis der Alterungsdaten der Einzelteile. Vereinfacht geht man davon aus, dass die Modelle der Einzelteile für jedes Alter und die bis dato erfahrene Belastung bekannt sind – man simuliert mit entsprechend der Alterung veränderten Modelleigenschaften. Handelt es sich um digitale Schaltungen, so stelle man sich etwa die Schwellspannung eines Transistors in Abhängigkeit von der Anzahl der Schaltvorgänge und der Betriebsdauer vor. Tabellen mit solchen Daten lassen sich durch Simulation physikalischer

Modelle oder durch Messungen empirisch erstellen. Die Alterung analog betriebener Bauteile kann nicht so einfach modelliert werden, da sich im direkten Vergleich weder für die Betriebsdauer, noch für Anzahl von Schaltvorgängen eine sinnvolle Entsprechung findet: Ein Transistor, der einer Wechsellast ausgesetzt ist, ist die meiste Zeit weder an, noch aus, sondern befindet sich auf einem Zustand zwischen den Extremen. Schalt- und Umladevorgänge finden nicht zwischen den zwei bekannten Zuständen statt. Somit können tabellenorientierte Verfahren, wie sie in der Digitaltechnik eingesetzt werden, nur wenig Auskunft über den Alterungszustand eines analog betriebenen Bauteils liefern.

Ein möglicher Ausweg ist hier die Simulation der Gesamtschaltung unter Verwendung physikalischer Modelle für die Einzelteile über einen großen Zeitraum. Dieser Ansatz wird aktiv verfolgt und lässt eine Möglichkeit zur effizienten Simulation der Auswirkungen der wichtigsten Effekte – etwa HCI und BTI samt Heilung – erwarten. Hier ist es notwendig, geeignete Modelle für die physikalischen Effekte zu finden, die das Zusammenspiel von zwei sich in der Größenordnung stark unterschiedlichen Simulationszeiten erlauben: Das Verhalten einer Schaltung lässt sich typischerweise nach Simulation weniger Betriebs-Millisekunden charakterisieren, wobei diese Simulation einige Minuten beanspruchen kann. Da die Simulationszeiten für längere Betriebszeiträume zu groß werden, muss das physikalische Modell nach solch einer kurzen Simulation zuverlässig Aussagen über den Alterungszustand nach einigen Tagen Betrieb ermöglichen und somit sinnvolle Fehlerabschätzungen unterstützen. Gelingt dies, so wird das „wenige Tage alte System“ simuliert, und es kann mit den gesammelten Daten im besten Falle ein nächster, möglichst größerer Zeitschritt in der Alterung des Systems hergeleitet werden. Unter Verwendung einer solchen Vorgehensweise wird es möglich sein, Schaltungen simulativ nach ihrer Anfälligkeit auf Alterung zu klassifizieren und quantitative Aussagen über ihre Verhaltensänderung zu geben. Benötigt werden nur Parameter für die zugrundeliegenden physikalischen Modelle, keine vollständige Kenntnis der durch verschiedene Betriebsmodi induzierten Alterungsvorgänge.

Eine simulative Auswertung des Verhaltens einer Schaltung ist die Voraussetzung für die Bestimmung von Robustheit aller Art und für deren Optimierung. Hierzu benötigt ein Simulator eine Vielzahl von Schaltungsbeschreibungen mit den für den Zeitabschnitt zu erwartenden degradierten physikalischen Eigenschaften. Es ist jedoch unmöglich, für alle möglichen Alterungszustände eine klassische Schaltungsbeschreibung zu erstellen, wie dies für Einzelfälle möglich wäre. Es ist jedoch möglich, mit Hilfe des Simulators Alterungseffekte gezielt qualitativ zu beobachten und alterungsfähige Modelle für ganze analoge Blöcke zu entwerfen. Solche Modelle benötigen keine Transis-

ternetzlisten, sondern imitieren nur deren Verhalten. Damit umgeht man die komplexe und rechenintensive Modellierung physikalischer Effekte auf Transistorebene. Derartige abstrahierte Blockmodelle können mit gewonnenen Simulationsdaten parametrisiert und somit an vorhandene Technologiedaten angepasst werden. Für größere Systeme, die aus solchen Blöcken bestehen, wird so eine Simulation ermöglicht, die die Alterungserscheinungen auf Transistorebene berücksichtigt, und trotzdem in überschaubarer Zeit durchführbar ist.

### **OFFIS: Alterungsmodelle von Gatterebene zur RT Ebene**

Aufgabe des OFFIS im Projekt ist die Erforschung des Übergangs von konkreten Alterungsmodellen einzelner Gatter bzw. RT-Komponenten, wie sie von der TU München entwickelt werden, hin zu einer abstrakten Vorhersage der Alterungseffekte ganzer Systeme. Dabei sind verschiedene Aspekte wesentlich. Die Temperatur innerhalb des Systems, von der die Alterungseffekte maßgeblich abhängen, wird nicht nur von der Außentemperatur, sondern in komplexer Weise auch von der Aktivität sowie dem geometrischen und materiellen Aufbau des Systems beeinflusst. In aktuellen Systemen wird dieser Effekt durch eine elektro-thermische Kopplung noch verstärkt, so dass die Systemtemperatur stark von dynamischer und statischer Verlustleistung und damit wiederum von Prozessvariationen abhängt.

Um die oben erwähnte Abhängigkeit vom Systemverhalten zu berücksichtigen, muss dieses simulativ bestimmt werden. Zwischen der Zeitskala für Systemsimulationen (Nanosekunden) und der für Alterungseffekte (Jahre) liegen allerdings 17 Größenordnungen. Diese Spanne überfordert eine direkte Simulation. Auch wenn die Komponentenmodelle von individuellen Eingangsdaten abstrahiert werden, gelten sie dennoch für ein System nur unter bestimmten Umweltbedingungen. Prozessvariationen zwischen einzelnen Systemen, unterschiedliches Einsatzalter sowie unterschiedliche Umweltbedingungen über die bisherige Einsatzzeit können mit derartigen Modellen noch nicht berücksichtigt werden.

Die Alterungseffekte gruppieren sich in Fehlerklassen, die sich sehr unterschiedlich auf das System auswirken. Aus Sicht des Gesamtsystems bewirkt eine parametrische Drift von Laufzeit und Leistung, wie sie etwa durch NBTI bewirkt wird, zunächst keinen Fehler. Erst wenn Sicherheitsmargen im Timing – die wiederum stark von Prozessvariationen und momentaner Temperatur beeinflusst werden – aufgebraucht sind, werden zunächst sporadisch, dann zunehmend häufiger kritische Ausführungszeiten überschritten, was zu immer häufigeren sporadischen Fehlern führt. Dahingegen akkumulieren sich beispielsweise beim TDDB-Effekt elektrische Defekte innerhalb jedes einzelnen Transistors (von außen nicht beobachtbar), bis es schließ-

lich zu einem spontanen und permanenten Ausfall des Transistors und damit üblicherweise auch einer ganzen Komponente führt.

Um all diese Aspekte zu berücksichtigen wird folgendermaßen vorgegangen: Es wird zunächst wiederholt für das zu untersuchende System aus einer großen Menge repräsentativer Prozessvariationsklassen eine explizite zufällig ausgewählt. Für dieses System wird eine Historie (bezüglich Außentemperatur, Versorgungsspannung, Strahlungs-dosis, etc.) erzeugt, die der statistischen Beschreibung des Missionsszenarios entspricht. Für das Probesystem, das jetzt in allen Aspekten explizit bekannt ist, wird die zeitliche und örtliche Verteilung von Aktivität, Leistungsumsatz, Selbsterwärmung, Stromdichte, etc. über einen kurzen Zeitraum bestimmt und dann statistisch beschrieben. Anschließend wird für einen wesentlich längeren Evaluationszeitraum die Alterung unter allen äußeren Einflüssen des Missionsszenarios extrapoliert. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich das Systemverhalten durch Alterung im Evaluationszeitraum nicht wesentlich ändert. In Experimenten haben sich hier Evaluationszeiten von Wochen bis Monaten bewährt. Nach dem ersten Alterungsschritt wird die Fehlerwahrscheinlichkeit für das System aufgrund der verschiedenen Alterungseffekte bestimmt. Um das Probesystem dann Schritt für Schritt altern zu lassen, wird das System im momentanen Alterungszustand neu analysiert, um daraus den nächsten Evaluationsschritt zu extrapolieren. Viele Daten müssen dabei nur im allerersten Schritt bestimmt werden (z. B. die Aktivitätsverteilung im System), da sich diese Daten nicht aufgrund des Alterns ändern.

Als Ergebnis erhalten wir für viele explizite Systeme die Auswirkung der Alterung über die Lebenszeit des jeweiligen Systems hinweg. In einem letzten Schritt wird nun jedes Probesystem (das sich von den anderen nur durch Prozessvariationen unterscheidet) in jedem Alterungsschritt als möglicher Systemzustand angesehen. Über die bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung verschiedener Prozessvariationsklassen und über die im Missionsszenario angegebene Verteilung des Einsatzalters wird die Wahrscheinlichkeit für jeden dieser Systemzustände bestimmt.

Da für jeden Zustand die Fehlerwahrscheinlichkeiten bekannt sind, kann nun leicht der Erwartungswert der Fehler aufgrund von Alterung bestimmt werden. Aus den Fehlerwahrscheinlichkeiten, die alle oben genannten Aspekte berücksichtigen, lassen sich nun leicht verschiedene Maße ableiten, wie etwa die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gerät, das das untersuchte System enthält, aufgrund eines Fehlers in dem System ausfällt (und nicht das im Missionsszenario spezifizierte Alter erreicht). Zudem lässt sich für jeden der Systemzustände eine außergewöhnliche, einmalige Störung untersuchen, um so auf die im Projekt definierte Robustheit zu schließen. Hier lassen sich die Wahr-

scheinlichkeiten der überlebenden Systeme einfach aufaddieren.

### Technische Universität München: Robustheit im Kontext von Alterungsanalyse und Optimierung auf Modul- und Gatterebene

Im Rahmen von ROBUST ist es Ziel der TU München, zum einen eine Alterungsanalyse oberhalb der Transistor- bzw. Gatterebene zu realisieren und dabei nach Möglichkeit auch Fertigungsvariation zu berücksichtigen. Zum anderen werden Optimierungstechniken umgesetzt, die eine alterungsbedingte Degradation der Schaltungseigenschaften minimieren.

Um je nach Anwendungsgebiet eine Auswahl zwischen verschiedenen Designvarianten treffen zu können, bzw. um etwaige Verbesserungen nach einem Optimierungsschritt besser vergleichen und somit bewerten zu können, muss auch auf dieser Abstraktionsebene ein Robustheitsmaß ermittelt werden. Wie bereits zuvor beim Robustheitsmaß beschrieben, wird hierzu eine Anpassung der allgemeinen Robustheitsdefinition an die vorliegenden Rahmenbedingungen benötigt. Bei den durch die Modelle der TUM berücksichtigten Alterungseffekten handelt es sich um die Degradationseffekte NBTI und HCI. Beide Effekte sind im Wesentlichen von der Betriebsspannung  $U$  sowie der Betriebstemperatur  $T$  abhängig. Somit lässt sich der  $\Pi$ -Raum (Störeinflüsse) mit den Durchschnittswerten dieser Größen im Laufe der Betriebsdauer auf zwei Dimensionen reduzieren.

Die von der TUM durchgeführte Alterungsanalyse ist eine Timing-Analyse mit gealterten Elementen. Aus der Laufzeit des gealterten kritischen Pfades lässt sich die maximale Taktfrequenz ermitteln, mit der die zu untersuchende Schaltung charakterisiert werden kann. Auch wenn Rückschlüsse auf weitere Schaltungseigenschaften wie z. B. den Leistungsverbrauch möglich wären, beschränken wir uns zunächst auf die maximale Taktfrequenz als charakteristische Schaltungseigenschaft, so dass sich der  $\Phi$ -Raum für die Berechnung der Robustheit auf eine Dimension reduzieren lässt. In Abbildung 1.08 ist die hier vorgenommene Anpassung von Eigenschafts- und Parameterraum schematisch dargestellt.

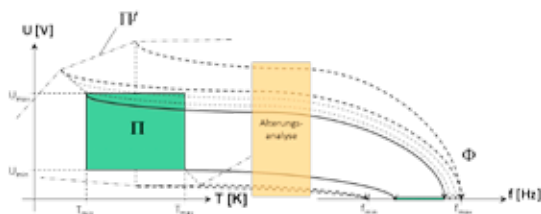


Abbildung 1.08: Abbildung der Parameter (links) in den Eigenschaftsraum (rechts)

Aus der Spezifikation erhält man die maximalen und minimalen Werte für  $U$  und  $T$ , die somit die schraffierte Fläche aufspannen. Führt man für die auf dem Rand liegenden Wertepaare – insbesondere für die Ecken – eine Alterungsanalyse durch, ergibt sich ein bestimmter Frequenzbereich im  $\Phi$ -Raum. Unter der Annahme, dass das

System die Spezifikation erfüllt, liegen diese Frequenzen innerhalb des spezifizierten Bereichs (siehe durchgezogene Pfeile in Abbildung 1.08). Da die Schaltung nach der Spezifikation in diesem Beispiel aber sowohl noch etwas schneller als auch langsamer betrieben werden kann, erfolgt im nächsten Schritt, ebenfalls durch eine Alterungsanalyse, ein Herantasten an die maximalen Frequenzwerte  $f_{\min}$  und  $f_{\max}$  (hier gestrichelt dargestellt). Dieses inkrementelle Vorgehen ist nötig, da mit den uns zur Verfügung stehenden Methoden nur eine Abbildung vom  $\Pi$ -Raum in den  $\Phi$ -Raum mittels der Alterungsanalyse möglich ist und nicht umgekehrt.

Nach diesem Verfahren lässt sich nun eine Begrenzung des noch tolerierten Gebietes  $\Pi'$  im  $\Pi$ -Raum ermitteln (hier mit Strich-Punkt dargestellt). Mittels dieser Grenzen kann, wie im Abschnitt zur Robustheitsmodellierung beschrieben, eine Robustheitszahl ermittelt werden. Die hierzu zusätzlich benötigten Verteilungen der Parameter  $U$  und  $T$  sind für den gesamten tolerierten Raum zu berücksichtigen und können jeweils dem Mission Profile entnommen werden. Dabei lässt das Modell beliebige Verteilungen zu. Zur Berücksichtigung von Fertigungsvariationen (nicht dargestellt) kann bei der Abbildung vom Parameter- in den Eigenschaftsraum ein ebenfalls der Spezifikation zu entnehmender Yield berücksichtigt werden.

Im weiteren Verlauf des Projektes wird erwartet, dass sich dieses Robustheitsmaß als hilfreiches Werkzeug für die Zusammenarbeit mit Projektpartnern, die sich mit der Modellierung und Optimierung auf höheren Ebenen beschäftigen (OFFIS/FZI), herausstellen wird.

### Leibniz Universität Hannover

Eine ausreichende Verifikation von modernen analogen Schaltungen wird durch stetig aufwändigere Modelle zunehmend schwieriger. Seit dem Unterschreiten einer Strukturgröße von 100 nm steigt die Bedeutung von Degradationseffekten. Ein robuster Schaltungsentwurf erfordert so nicht nur die Berücksichtigung von Parametervariationen durch Fertigungsschwankungen, sondern insbesondere von Alterungseffekten. Die Leibniz Universität Hannover hat sich deshalb in diesem Projekt unter anderem zum Ziel gesetzt, die abstrahierte Schaltungssimulation mit affiner Arithmetik um solche Effekte zu erweitern.

Bei der affinen Arithmetik handelt es sich um eine erweiterte Intervallarithmetik, welche es ermöglicht, anstelle von einzelnen Werten mit Parameterintervallen zu simulieren, z. B. ein Widerstand hat 9–11 kOhm. Eine reine Intervallarithmetik liefert jedoch bei fast allen Operationen aufgrund fehlender Korrelationsinformation ein viel zu großes Ergebnisintervall. Durch die Vielzahl verschiedener Parameter sind keine brauchbaren Schaltungssimulationen möglich. Daher werden bei der affinen Arithmetik alle Parameter durch einen zentralen Wert und für jede Variation durch jeweils ein weiteres Symbol beschrieben, im vorherigen Beispiel 10 kOhm



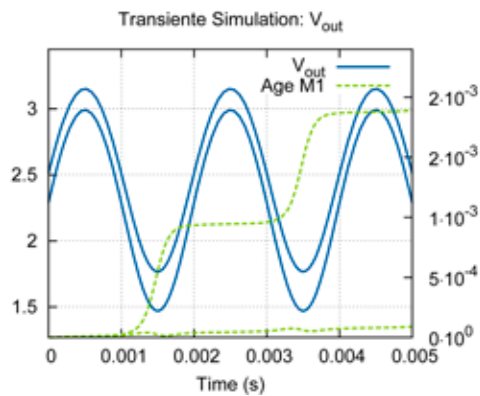


Abbildung 1.09: Beispiel einer affinen Schaltungssimulation mit Degradation

$\pm 1 \text{ k}\Omega \cdot X_{1.1}$ . Das Ergebnis der sich damit ergebenden sogenannten semi-symbolischen Schaltungssimulation schließt alle möglichen Wertekombinationen sicher ein und wird zur Veranschaulichung (vgl. Abbildung 1.09) als zeitabhängige Intervallgröße dargestellt. Es ist aber anhand der Symbole auch möglich, für jede Schaltungsgröße die Auswirkung jeder einzelnen Parameterabweichung zurück zu verfolgen.

Ein weit verbreiteter Ansatz zur Berücksichtigung der Degradation ist es, einen zusätzlichen Simulator zu verwenden. Dazu wird abwechselnd eine Analogsimulation über einen kurzen Zeitraum, z. B. über 1 s, und eine Degradationssimulation über einen langen Zeitraum, z. B. 1 Jahr, durchgeführt. Die Degradationssimulation approximiert anhand der Ausgaben der Analogsimulation den Grad des Parameterdrifts, welcher wiederum als Ausgangspunkt für die nachfolgende Analogsimulation dient. Bei einer affinen Schaltungssimulation kann ein anderer effizienterer Ansatz verfolgt werden. Die Integration der Degradationsmodelle direkt in die Bauteilmodelle ermöglicht eine deutlich einfachere und schnellere Simulation, eine zeitliche Verfolgung der Ursache und der Auswirkung der Degradation und ermöglicht auch die Untersuchung neuer Verfahren zur beschleunigten Degradationssimulation. Ein Beispiel einer affinen Schaltungssimulation mit Degradation zeigt Abbildung 1.09, in welcher die Ausgangsspannung der Schaltung in blau und die Alterung eines Bauelements M1 in grün dargestellt ist.

Die beschriebenen Simulationsverfahren dienen als Ausgangsbasis für die Analyse der Robustheit. Parametervariationen im II-Gebiet können dank affiner Darstellung aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen direkt in affine Größen umgewandelt werden. Die affinen Ausgaben der Simulation können anschließend mit den Vorgaben im  $\Phi$ -Raum verglichen werden, um die Robustheit der Schaltung zu bewerten. Ein weiteres Ziel der Leibniz Universität in diesem Projekt ist es, die affine Arithmetik in SystemC zu integrieren, sowie die affine analoge Schaltungssimulation einzubinden. Damit können nicht nur einzelne analoge Blöcke und Systeme auf ihre Robustheit hin untersucht werden, sondern gesamte Mixed-Signal-Systeme.

## Zusammenfassung und Ausblick

Der Entwurf robuster Elektronik stellt die Industrie vor große Herausforderungen und wird ein wichtiges Innovationsthema für die nächsten Jahre sein. Neue Entwurfsansätze aus der Forschung verfolgen das Ziel, dass Robustheit als ein neues Entwurfskriterium für elektronische Systeme eingeführt wird. Wurde bisher im Wesentlichen die Elektronik zum Produktionszeitpunkt betrachtet, geht man mit neuen Verfahren dazu über, in Entwurfsverfahren die Betriebs- und Nutzungseigenschaften für den Entwurf zu berücksichtigen. Diese Ansätze konzentrieren sich in der Regel auf nur einen oder wenige Aspekte, beispielsweise die Robustheit bei erhöhter Strahlung. Die Zusammenführung unterschiedlicher Effekte und Verfahren zu einem zusammenhängenden Entwurfsprozess und einer einheitlichen Betrachtung ist noch Gegenstand der Forschung. Mit ROBUST wird diese Forschung unterstützt, um zu einem integrierten Entwurfsprozess zu gelangen.

Mit dem Clusterforschungsprojekt ROBUST sind nach der ersten Halbzeit schon herausragende Ergebnisse erzielt worden. Hervorzuheben sind die Arbeiten zu einem einheitlichen Verfahren zur Beschreibung der Robustheit in elektronischen Systemen, welches es auch ermöglicht, ein quantitatives Maß für die Robustheit unabhängig von der physikalische Größe einzuführen. Diese Ergebnisse wurden bereits den Industriepartnern auf dem letzten Industriepartner-Workshop vorgestellt und auf dem nationalen Workshop „Zuverlässigkeit und Entwurf“ wissenschaftlich diskutiert. Weiterhin haben die Forschungspartner ihre Arbeitsgebiete und Verfahren skizziert und erste Anwendungen des Robustheitsmaßes beschrieben.

In der zweiten Hälfte des Projekts werden die erforschten Verfahren und Methoden der Partner weiter vorangetrieben und prototypisch in Werkzeuge und Modelle implementiert. Der Fokus in der zweiten Hälfte des Projekts wird auf eine sinnvolle Zusammenführung der Methoden hin zu einer gemeinsamen Betrachtungsweise zur Analyse und Steigerung der Robustheit gelegt. Hierzu werden auch bilaterale Kooperationen mit den Industriepartnern angeregt, um einen weiteren Schritt zu gehen, damit sich eine neue Entwurfsmethodik in den nächsten 5–10 Jahren in der Industrie etablieren kann.

Die aktuelle Diskussion um Zuverlässigkeit und Robustheit von elektronischen Systemen hebt die Bedeutung dieser Arbeiten hervor. In nahezu allen Wirtschaftsbereichen sind wir von Elektronik abhängig. Durch die physikalischen Effekte und die Miniaturisierung wird die Robustheit mit neuen Technologien weiter abnehmen. Ziel muss es daher sein, in Zukunft die Robustheit elektronischer Systeme zu steigern. Hierzu eignen sich neue Entwurfskonzepte, die Degradationseffekte vorhersehen und beherrschbar machen. ROBUST wird dazu einen großen Beitrag leisten.

Nächster Industriepartner-Workshop ist für April 2011 geplant. Interessenten wenden sich bitte an den Projektkoordinator.

**Kont@kt (ROBUST):**

Volker Schöber  
fon: (05 11) 7 62 – 1 96 88  
schoeber@edacentrum.de

**Zum Stand der Technik**

- [1] D. Rittman: *Nanometer Reliability*, [www.tayden.com/publications/nanometer\\_reliability.pdf](http://www.tayden.com/publications/nanometer_reliability.pdf), 2008.
- [2] D. Ernst et al: *Razor: A Low-Power Pipeline Based on Circuit-Level Timing Speculation*, Intl. Symp. on Microarchitecture, 2003.
- [3] J. Tschanz et al: *Adaptive Body Bias for Reducing Impacts of Die-to-Die and Within-Die Parameter Variations on Microprocessor Frequency and Leakage*, ISSCC 2002.

**Zur Definition**

- [4] Wikipedia, „Robustheit“, online: <http://de.wikipedia.org/wiki/Robustheit>, 11.3.2010.
- [5] Ackermann, J., Bartlett, A., Kaesbauer, D., „Robuste Regelung“, Springer-Verlag, 1993.

- [6] Highham, N.J. „Accuracy and Stability of Numerical Algorithms“, Society of Industrial and Applied Mathematics, 1996.
- [7] Huber, P.J., „Robust Statistics“, 2nd edition, Wiley, 2009.
- [8] SAE International Standard J1879, „Handbook for Robustness Validation of Semiconductor Devices in Automotive Applications“, April 2007.
- [9] Radetzki, M., Bringmann, O., Nebel, W., Olbrich, M., Salfelder, F., Schlichtmann, U., „Robustheit nanoelektronischer Schaltungen und Systeme“, in: *Zuverlässigkeit und Entwurf*, 4. GMM/GI/ITG-Fachtagung vom 13.–15. September 2010 in Wildbad Kreuth, VDE-Verlag, 2010.

## Europaweit dem Fehler auf der Spur

Das EU-Projekt DIAMOND im siebten Rahmenprogramm

**Das Verbundforschungsprojekt DIAMOND – Diagnosis, Error Modelling and Correction for Reliable Systems Design, Förderkennzeichen FP7-2009-IST-4-248613, wird von der Europäischen Union im 7. Rahmenprogramm gefördert. DIAMOND zielt auf die Verbesserung der Produktivität im Schaltkreis- und Systementwurf, sowie auf die Erhöhung der Verlässlichkeit der resultierenden Systeme ab. Dies soll durch eine integrierte Umgebung für Diagnose und Korrektur von Fehlern erreicht werden.**

**DIAMOND**

Förderkennzeichen:  
FP7-2009-IST-4-248613

**Projektkoordinator:**  
TU Tallinn (Estland)

**Projektkonsortium:**  
Ericsson AB (Schweden)  
IBM (Israel)  
TU Graz (Österreich)  
TU Tallinn (Estland)  
Testonica Lab (Estland)  
TransEDA Systems (Ungarn)  
U Bremen (Deutschland)  
U Linköping (Schweden)

**Webseite:**  
<http://fp7-diamond.eu>

**Motivation**

Steigende Entwurfskosten sind eine der wichtigsten Herausforderungen für die Halbleiter-Industrie. Dabei stellt die Absicherung der funktionalen Korrektheit des Entwurfes eines der größten Probleme dar. Während ausgereifte Werkzeuge zur Entdeckung eines Fehlers im Entwurf zur Verfügung stehen, ist das anschließende Debugging – die Lokalisierung und die Korrektur der Fehlerursache – nur unzureichend automatisiert. Hierzu existieren deutlich weniger Software-Werkzeuge und auch deutlich weniger wissenschaftliche Arbeiten. Abbildung 1.10 stellt den Anteil verschiedener Entwurfsschritte auf einer linearen Zeitskala dar. Es wird ersichtlich, dass etwa zwei Drittel der gesamten Entwurfszeit auf die Verifikation entfallen. Wiederum zwei Drittel der Verifikationsdauer werden durch Lokalisierung und Korrektur verursacht.



**Abbildung 1.10:** Zeitlicher Aufwand im Entwurf

Ein zusätzliches Problem für die weitere Entwicklung ist die rapide ansteigende Rate sogenannter Soft-Errors, die im Nanometer-Bereich auftreten. In Zukunft werden Soft-Errors in Logikkomponenten eine viel größere Rolle spielen als in Speicherbausteinen, bei denen sie schon heute berücksichtigt werden. Allerdings existieren auch in diesem Bereich noch keine adäquaten Entwurfswerkzeuge, die automatisch analysieren, welche Soft-Errors

die funktionale Korrektheit eines sequentiellen Schaltkreises beeinflussen bzw. stören können.

Das Projekt DIAMOND adressiert die oben genannten Herausforderungen durch eine systematische Vorgehensweise und eine integrierte Umgebung für Lokalisierung und Korrektur von Fehlern auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen und aus verschiedenen Quellen.

**Zielsetzung**

Um Hindernisse, die der Fehlerlokalisierung und -korrektur während des Entwurfes sowie von Soft-Errors im Feld im Wege stehen, auszuräumen, werden in DIAMOND folgende Ziele adressiert:

- » Erarbeitung eines einheitlichen Diagnosemodells für Entwurfsfehler und Soft-Errors,
- » Automatisierung der Lokalisierung und der Korrektur basierend auf dem Diagnosemodell, sowohl während des Entwurfs (pre-silicon) als auch im produzierten Chip (post-silicon),
- » Implementierung einer Umgebung für Lokalisierung und Korrektur, die formale, semi-formale und dynamische Techniken umfasst, sowie
- » Integration automatisierter Korrekturmethode mit den Lokalisierungsmethoden.

DIAMOND geht damit über den Stand der Technik hinaus, indem ein integrierter Ansatz für die Lokalisierung und Korrektur sowohl beim Entwurf als auch