

# Entwicklung und Test integrierter optoelektronischer Hochgeschwindigkeits-Schaltkreise bei Fujitsu

Von William Walker, Fujitsu Laboratories of America

E-mail an [Mike Woodward](mailto:mike.woodward@fujitsu.com)

Die Fujitsu Laboratories of America nutzen MATLAB® und die Instrument Control Toolbox™ für automatische Tests und Datenanalysen. In einem kürzlich abgeschlossenen Projekt konnte dadurch das Entwicklerteam seine Produktionspläne straffen und die Qualität, Geschwindigkeit und Reproduzierbarkeit von Tests während der Produktverifikation erhöhen.

## Verifikation eines optischen 40 Gbps-Transponders

Bei diesem Projekt – der Entwicklung eines Serializer/Deserializer (SERDES) mit einem Datendurchsatz von bis zu 40 Gbps – lag der Fokus vor allem auf der automatisierten Verifikation. Der SERDES-Chipsatz bildet die Basis für Fujitsus optischen Netzwerk-Transponder (Abbildung 1). Er ist ein Mixed-Signal Low-Power CMOS Schaltkreis, der neben digitaler Logik komplexe analoge Schaltkreise für die Begrenzungsverstärker (Limiting Amplifier, LA) sowie die Komponenten zur Takt- und Datenrückgewinnung (Clock Data Recovery, CDR) enthält. Die Systemspezifikationen fordern Bitfehlerraten (BERs) von weniger als einem Fehler pro Billionen Bits.

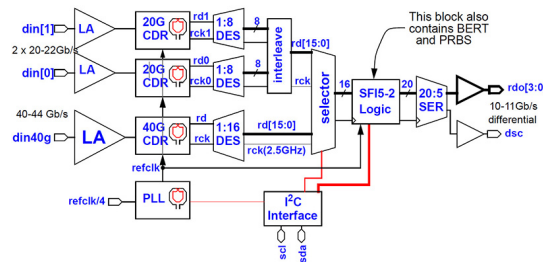


Abb. 1: Blockdiagramm des Deserializers.

Das System wird vor der ersten Fertigung umfassend simuliert. Einige Aspekte des Entwurfs wie Kapazitätsdioden, Induktoren und Feldeffekttransistoren (FETs) können aber trotz ausgiebiger Simulationen ausschließlich auf Silizium verifiziert werden. Die HF-Parameter der fertigen Hardware weichen teils erheblich von den in der Simulation eingesetzten Parametern ab. Diese Diskrepanzen können durch die physikalische Architektur des Entwurfs oder durch das Herstellungsverfahren verursacht sein. Liegen sie außerhalb der im Entwurf berücksichtigten Toleranzgrenzen, dann erfüllt der Chip mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die Qualitätsstandards.

Zur raschen und genauen Charakterisierung der Schaltungen auf dem Chip sowie zur Extraktion der wesentlichen analogen und HF-Parameter setzt Fujitsu automatisierte Tests ein. Durch Quantifizierung der Abweichungen zwischen dem Entwurf und dem Siliziumchip aus der Halbleiterfertigung lässt sich der Entwurf verfeinern und die Gesamtleistung des Chips verbessern.

## Testautomatisierung

In den Fujitsu-Labors wird eine Vielzahl von Testgeräten wie Signalgeneratoren, Messgeräte für Versorgungsspannungen und -ströme, Spektrum-Analysatoren, Netzwerk-Analysatoren und digitale Oszilloskopen eingesetzt (Abbildung 2).

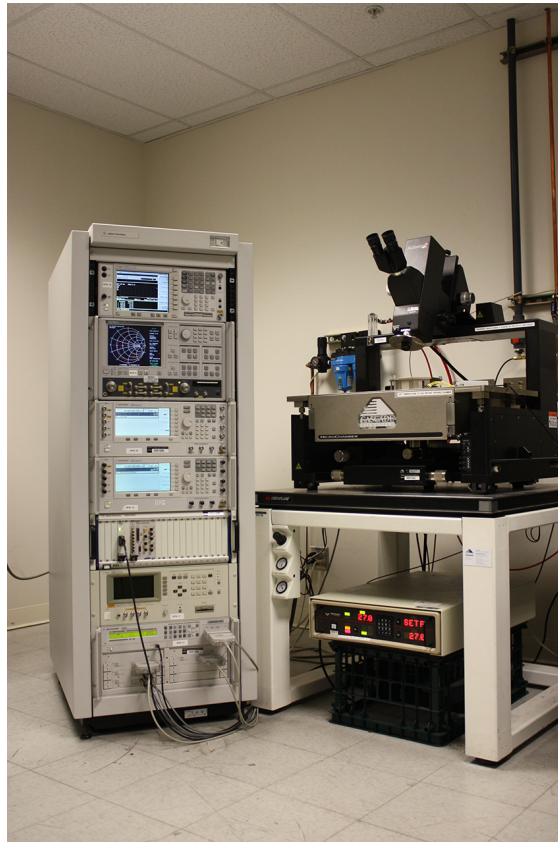


Abb. 2: Teil des Fujitsu-Testlabors.

Manuelle Tests, aber auch halbautomatische Tests mithilfe der Steuersoftware des jeweiligen Instrumentenherstellers, sind zeitraubend, mühsam und arbeitsintensiv. Besonders schwierig ist es, die Software verschiedener Hersteller automatisch zu steuern. Dies gilt umso mehr, wenn Produkte mehrerer Hersteller Teil derselben Testsuite sind. Noch gravierender ist, dass man bei manueller Durchführung der Tests nur schwer reproduzierbare Testergebnisse erhält.

Aus diesen Gründen werden sämtliche Komponenten der Testausrüstung mithilfe von MATLAB-Skripten und der Instrument Control Toolbox gesteuert. Obwohl die Gerätehersteller Software zum Betreiben ihrer Instrumente mitliefern und manche sogar über eingebaute Microsoft® Windows®-PCs verfügen, hat sich die Instrument Control Toolbox als die effektivere Lösung erwiesen, weil sie auf einem einzigen Hostrechner eine einheitliche Schnittstelle zu sämtlichen Instrumenten bereitstellt. Das Umgehen der Benutzeroberflächen der Hersteller und das Erstellen von MATLAB-Skripten für die Ausführung von Tests als Alternativansatz erhöht zwar anfangs den Aufwand, diese Investition macht sich aber im weiteren Projektverlauf vielfach bezahlt.

Der wichtigste Vorteil ist, dass mit der Instrument Control Toolbox von einem zentralen Hostrechner aus alle Instrumente in einer Testsuite gemeinsam bedient und diese Suite durch ein einziges Skript gestartet werden kann. Eine Testsuite führt in der Regel eine Reihe von Messungen unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen aus – beispielsweise Messungen bei verschiedenen Frequenzen – und setzt zur Ermittlung verschiedener Eigenschaften eines Geräts gleich mehrere Instrumente ein.

Die Testdaten müssen sofort verarbeitet werden, um entscheiden zu können, ob nachfolgende Tests überhaupt sinnvoll sind. Wird etwa ein Kurzschluss entdeckt, dann hat es wenig Sinn, den nächsten Test vorzunehmen. Die MATLAB-basierte Software von Fujitsu kann auch aufwändige Datenanalysen ausführen und ermöglicht so komplexe Entscheidungen für die jeweiligen Folgeschritte. Dieser Automatisierungsgrad ist ausschließlich durch die Integration von Datenanalyse und Instrumentensteuerung erreichbar.

Die objektorientierten Programmierfunktionen der MATLAB-Sprache haben sich in der Testumgebung als besonders nützlich erwiesen. Für jedes Testinstrument wird eine MATLAB-Klasse erzeugt. Diese Klassen erleichtern es, Zustandsinformationen während eines Tests

zu speichern und darauf zurückzugreifen, falls der Test aus irgendeinem Grund unterbrochen werden muss. Die Klasse für neubeschaffte Testinstrumente kann einfach durch Modifikation einer vorhandenen MATLAB-Klasse von ähnlichen Geräten erzeugt werden. Da diese Klassen die gleiche Schnittstelle nutzen, ist ein neues Instrument in der Regel innerhalb eines Tages einsatzbereit. Auch neue Testskripte lassen sich auf diese Weise schneller und einfacher erzeugen.

### Tests auf Schaltkreisebene

Um Schaltkreissimulationen mit der erforderlichen Genauigkeit durchführen zu können, testen und charakterisieren die Ingenieure die Schaltkreise direkt auf dem Chip. MATLAB und die Instrument Control Toolbox ermöglichen dabei die Erfassung und Verarbeitung großer Mengen an Testdaten.

Durch Automatisierung der Tests mit MATLAB lässt sich der genaue Ablauf und die zeitliche Ausführung der vorzunehmenden Schritte jeder Testmethode festlegen. Mit Skripten können etwa Parameter-Sweeps auf einfache Weise eingerichtet und ausgeführt werden. Alle Testergebnisse werden automatisch gespeichert, was Bedienfehler ausschließt, und sämtliche ausgeführten Schritte werden protokolliert. So gibt es beispielsweise ein Skript, das vom Netzwerkanalysator gemessene Daten ausliest und Streuparameter (S-Parameter) bei verschiedenen Frequenzen speichert.

In diesem Testaufbau können die unterschiedlichsten Testinstrumente eingesetzt werden, ohne dass die Verbindung zum getesteten Schaltkreis physikalisch verändert werden muss. Dadurch lassen sich etwa S-Parameter und das Leistungsspektrum eines Schaltkreises über dieselbe physikalische Verbindung mithilfe unterschiedlicher Instrumente messen. Dies beschleunigt die Tests erheblich. Die Ingenieure können eine Testabfolge einrichten und durchlaufen lassen und währenddessen Mittagessen gehen oder andere Aufgaben erledigen. Zurück am Teststand warten dann bereits die Ergebnisse und können analysiert werden (Abbildung 3).

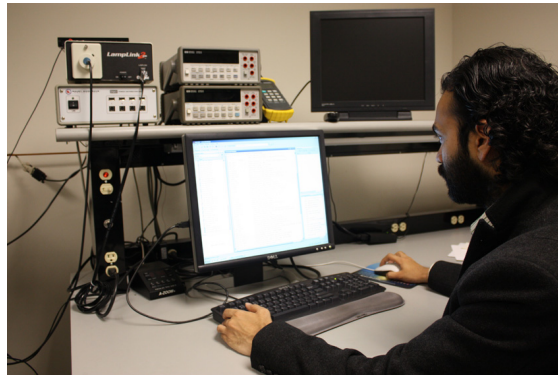


Abb. 3: Ein Mitarbeiter bei der Analyse der Testergebnisse.

Über die Verbesserung des Testprozesses hinaus macht die Automatisierung bestimmte Tests überhaupt erst praktikabel. Die manuelle Charakterisierung eines FET würde beispielsweise zehnmal so lange dauern wie mit automatisierten Skripten. Darüber hinaus würde man bei einer manuellen Wiederholung der Charakterisierung aufgrund leichter Unterschiede im Testaufbau wahrscheinlich andere Ergebnisse erhalten. Im Gegensatz dazu lässt sich ein automatisiertes Skript immer wieder verwenden und so jedes Mal dasselbe Ergebnis erzielen. Diese Ergebnisse sind so zuverlässig, dass damit sogar festgestellt werden kann, wenn Testgeräte altern und neu kalibriert werden müssen.

### Testen auf Chipebene

MATLAB und die Instrument Control Toolbox werden zudem auch zur Initiierung und Verwaltung der eingebauten Selbsttests von Chips über die JTAG- (IEEE 1149.1) und I2C-Schnittstellen eingesetzt (Abbildung 4).

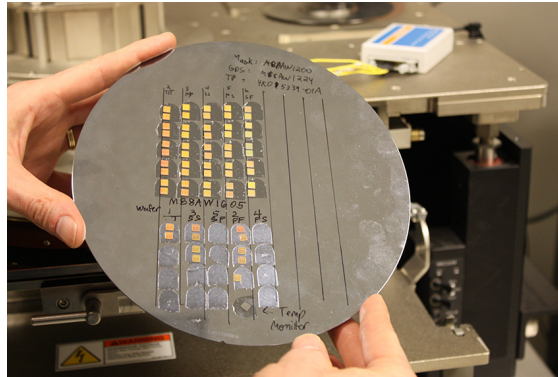


Abb. 4: SERDES-Testchips aus der Fertigung.

Ein typisches Skript für einen frisch aus der Fertigung gelieferten Chip beginnt etwa damit, den Chip an die Versorgungsspannung anzuschließen und seine Leistungsaufnahme zu messen. Nimmt er zu viel Strom auf, liegt ein Kurzschluss vor und der Test wird beendet. Ist das nicht der Fall, verifiziert das MATLAB-Skript zunächst die Testlogik mithilfe eines vordefinierten Verfahrens und führt erst dann grundlegende Tests an der Schaltung durch.

Da der SERDES-Chip von Fujitsu mit extrem hohen Datenraten arbeitet, sind Bitfehlerraten-Tests (Bit Error Rate, BER) mit branchenüblichen Geräten aus Kostengründen völlig ausgeschlossen. Stattdessen wurden Generatoren für Pseudozufalls-Bitsequenzen (Pseudo-Random Bit Sequences, PRBS) sowie Schaltkreise für Bitfehlerraten-Tests (BERT) in die SERDES-ICs integriert. MATLAB-Skripte können die PRBS über die I2C-Schnittstelle anweisen, welches Muster für wie viele Zyklen an den CDR gesendet werden soll. Am Ende solcher Tests liest das Skript die Fehlerzahl aus den BERT-Listen aus und speichert die Daten.

## Ergebnisanalysen und Ausblick

Die Ergebnisse dieser mittels automatisierter Tests vorgenommenen Schaltkreis-Charakterisierung fließen in die Verbesserung der Modellierung und der Entwürfe der jeweiligen Schaltung ein. Die Simulationsmodelle werden so angepasst, dass sie die gemessenen Daten noch genauer widerspiegeln, woraufhin der Entwurf weiter verfeinert wird. Da die nächste Iteration des Schaltungsdesigns auf genaueren Daten basiert, erfüllt dessen Verhalten auch die Spezifikationen besser.

Aufgrund ständig wachsender Kosten für die Halbleiterherstellung können sich nur wenige Unternehmen eine Fehleranalyse am fertigen Chip leisten. Langfristiges Ziel ist es daher, nur ein einziges Tape-Out an die Fertigung zu geben und keinen weiteren Durchlauf zu benötigen. Durch den Einsatz des automatisierten Verifikationsverfahrens hat Fujitsu seine kurzfristigen Ziele bereits erreicht, die in einer Reduzierung der Entwicklungszeit sowie der schnellen und exakten Schaltkreischarakterisierung bestanden.

### Eingesetzte Produkte

- MATLAB®
- Instrument Control Toolbox™

### Weitere Informationen

- Frühzeitige Verifikation von Digital-Analog-Designs durch Co-Simulation auf Systemebene
- Ansteuerung von Instrumenten mit Schnittstellen-Objekten

Weitere Artikel und Newsletter-Abonnement unter [www.mathworks.de/newsletters](http://www.mathworks.de/newsletters).