

newsletter edacentrum Probeauszug

Bestellen Sie sich den kompletten Artikel über newsletter@edacentrum.de

edacentrum, Hannover, Juni 2006

On-Chip Verbindungsstrukturen – Engpaß und Herausforderung beim Schaltungsentwurf

von Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Grabinski

„Leitungen? Die sind nicht wichtig!“ Mit diesem Vorurteil haben nicht nur Mitarbeiter im Projekt LEONIDAS zu kämpfen. Warum die Berücksichtigung von Leitungseffekten bei zukünftigen Chipentwürfen enorm wichtig ist, beschreibt dieser Artikel.

Abbildung 1.14:

Leitungen verhalten sich seltsam: Obwohl das Eingangssignal (blaue Kurve) einer idealen Leitung endlicher Länge nach dem Einschalten konstant bleibt (Einheitssprung), ist das Ausgangssignal (rote Kurve) ein Rechtecksignal doppelter Amplitude. Letzteres ist auf Reflektionen sowohl am Leitungsende als auch am Leitungseingang zurückzuführen.

Schon zu Beginn der Erfolgsgeschichte integrierter digitaler Schaltungen wurde mit zunehmender Arbeitsgeschwindigkeit mikroelektronischer Systeme schnell deutlich, daß die als Schaltelemente eingesetzten Transistoren keineswegs ideale Schalter repräsentierten. Vielmehr mußte das mehr und mehr dominierende analoge Verhalten von Transistoren schon beim Schaltungsentwurf berücksichtigt werden, wobei als Analysewerkzeuge Programme wie SPICE und deren Derivate eingesetzt wurden und immer noch werden. Der Einfluß der die einzelnen Schaltelemente verbindenden Leitungsstrukturen auf die Schaltungsdynamik konnte lange Zeit vernachlässigt werden. Später, als die Schaltgeschwindigkeiten weiter zunahmen, wurden die Einflüsse von Verbindungsstrukturen z.B. mit Hilfe einzelner oder auch kaskadierter RC-Glieder näherungsweise berücksichtigt. In Ermangelung besserer Verfahren ist dies auch heute noch weitgehend der Fall.

Im Vergleich zu damals hat sich die Situation jedoch dramatisch verändert: Moderne digitale Schaltungen beinhalten mehrere Millionen Transistoren, die internen

Taktraten betragen einige Gigahertz, und die Gesamtlänge der Verbindungsleitungen innerhalb moderner Prozessoren beläuft sich auf jeweils mehrere Kilometer bei bis zu etwa 10 Verdrahtungsebenen. Für die nähere Zukunft werden Gesamtleitungslängen von ca. 30 km/Schaltung bei Taktraten von einigen 10 GHz prognostiziert, aber schon jetzt kämpfen Halbleiterhersteller massiv mit den parasitären Einflüssen von Verbindungsstrukturen. Letztere haben sich inzwischen als limitierender Faktor hinsichtlich der Arbeitsgeschwindigkeit moderner Schaltungen erwiesen und dominieren deren dynamisches Verhalten. Entsprechend besteht hier dringender Handlungsbedarf beim Entwurf moderner Schaltungen.

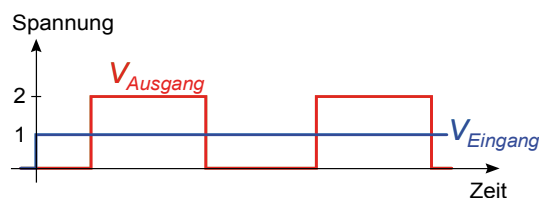


Abbildung 1.14

Problem 1: Wellenausbreitungseffekte

Bei den auf einzelnen Leitbahnen oder Leitbahnsystemen (z.B. Busstrukturen) auftretenden, parasitären Effekten handelt es sich im wesentlichen um Erscheinungen wie

- » endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit,
- » Dispersion,
- » Kopplung,
- » Reflektion und
- » Ein- und Abstrahlung

Mit Ausnahme der Kopplung (zumindest bei hinreichend niedrigen Signalfrequenzen) handelt es sich hierbei um typische Wellenausbreitungseffekte (vgl. Abb. 1.14), die mathematisch grundsätzlich anders formuliert werden, als dies bei der Behandlung konzentrierter Bauelemente der Fall ist: Letztere werden mit Hilfe gewöhnlicher Differentialgleichungen, erstere mit Hilfe partieller Differentialgleichungen beschrieben. Werkzeuge wie SPICE sind im wesentlichen Programme zur Lösung großer Systeme gewöhnlicher (auch nichtlinearer) Differentialgleichungen, und es ist recht schwierig, solche Programme mit Algorithmen zur Lösung partieller Differentialgleichungen zu „verheiraten“. Grundsätzlich gibt es bereits Lösungen für dieses Problem, es bedarf hier aber umfangreicher Modifikationen vorhandener Entwurfssoftware, und viele Anwender scheuen (aus durchaus nachvollziehbaren Gründen) hervor zurück.

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, überhaupt hinreichend leistungsfähige Algorithmen zur Beschreibung obiger Effekte zu finden. Es gibt hier vielversprechende Ansätze, aber das universelle Verfahren schlechthin existiert bis heute nicht.

Problem 2: Substrateffekte

Typisch für die derzeitigen integrierten Schaltungen ist es, daß sowohl aktive als auch passive Elemente über einem mehr oder weniger gut leitenden Substrat angebracht sind. Für Leitbahnen folgt daraus, daß die die Verbindungsstrukturen umgebenden elektromagnetischen Felder in das Substrat eindringen können, was zu einer signifikanten Beeinflussung der Signalübertragung führt (Abb. 1.15). Nimmt man etwa an, daß zumindest quer zur Signalausbreitungsrichtung eine quasistationäre Betrachtungsweise noch adäquat ist (was auf Chips eingeschränkt und auf Boards bei höheren Frequenzen gar nicht mehr gilt), man also elektrische und magnetische Felder getrennt voneinander betrachten kann, so wirkt ein schwach leitendes Substrat bei höheren Frequenzen als Isolator. Dies führt zu einer signifikanten Abnahme der Eigenkapazität und damit zu einer sehr stark frequenzabhängigen Zunahme kapazitiver Kopplung. Andererseits bewirkt das Eindringen des magnetischen Feldes in das Substrat aufgrund von Skin- und Proximityeffekten eine (durchaus wünschenswerte) Abnahme von Koppel- und Selbstinduktivitäten bei höheren Frequenzen, gleichzeitig aber