

# Elektromigration

## Eine neue Herausforderung beim Entwurf elektronischer Baugruppen

### Teil 2: Stromabhängige Verdrahtung von Leiterbahnen

Jens Lienig, Dresden; Göran Jerke, Reutlingen

Zu hohe Stromdichten in Leiterbahnen von elektronischen Baugruppen können zu Schaltungsausfällen durch Elektromigration führen. Auf Grund der stetig abnehmenden Strukturabmessungen wird dieses Problem immer akuter. Nachdem im ersten Teil dieser Serie auf die Ursachen und Möglichkeiten ihrer Vermeidung eingegangen wurde (F&M 10/2002), wird hier eine Entwurfsstrategie zur stromabhängigen Verdrahtung vorgestellt, um bereits während der Layouterstellung die Stromdichte zu berücksichtigen.

Die Elektromigrationsanfälligkeit einer elektrischen Schaltung resultiert im Wesentlichen aus überhöhten Stromdichten in den Leiterbahnen und Vias. Idealerweise sollte daher schon beim Layoutentwurf die Leiterbahnbreite so gewählt werden, dass sie dem zu erwartenden Stromfluss genügt.

Leider existiert jedoch bisher kein Entwurfswerkzeug, welches auftretende Stromdichten von Signalnetzen vor dem Layoutentwurf berechnet und durch entsprechende Breitenanpassung der Leiterbahnen und Vias bei der Verdrahtung berücksichtigt. In der Literatur gibt es Ansätze, welche eine stromgerechte Verlegung der Stromversorgungsleitungen beschreiben (etwa [1],[2]). Diese stromgerechte Verlegung der Stromversorgungsleitungen erfolgt vor der eigentlichen Verdrahtung der Signalleitungen. Dabei wird grundsätzlich zuerst die Topologie der Verdrahtung erzeugt, und anschließend werden daraus die Stromwerte errechnet. Danach wird die Verdrahtung auf die für die Stromwerte erforderliche Breite ange-

passt, was oft größere Layoutveränderungen (einschließlich Platzierungsmodifikationen) einschließt. Derartige Layoutveränderungen sind jedoch nur möglich, weil die gesamte Substratfläche noch frei von jeglicher Signalverdrahtung ist und damit entsprechende Freiräume bestehen.

Diese sequenzielle Vorgehensweise - Topologieermittlung und anschließende Anpassung der Leiterbahnbreiten - lässt sich bei stromgerechter Verdrahtung von Signalleitungen auf Grund der viel höheren Verdrahtungsdichte nicht anwenden. Hier sollten also schon bei der Ermittlung der Verdrahtungswege die einzelnen Leiterbahnbreiten bekannt sein, um anschließende Layoutmodifikationen zu vermeiden.

Die Ströme lassen sich allerdings erst berechnen, wenn die komplette Topologie des Netzes

vorliegt, das heißt, nur nach Kenntnis der Lage aller Verdrahtungswege kann man deren Breite bestimmen. Beispielsweise lässt sich die Breite einer Zwei-Punkt-Verbindung einfach aus den an beiden Endpunkten anliegenden Maximalströmen berechnen. Wird jedoch ein dritter Anschlusspunkt (Pin) mit dieser Leiterbahn verbunden (zum Beispiel durch einen Steinerpunkt), so ändert sich die Strombelastung der Leiterbahn und damit auch die Breite. Verallgemeinert heißt das, dass jegliche Verbindung eines neuen Anschlusspunkts mit einer bereits bestehenden Netztopologie deren Stromwerte verändern kann. So kann nur nach Kenntnis aller Netzzweige zwischen Anschluss- und Steinerpunkten die stromgerechte Ermittlung der Verdrahtungsbreiten erfolgen.

### Verdrahtungsbreiten als zyklisches Problem

Zur Lösung dieses ›Henne-Ei-Problems‹ (nur nach der Topologieermittlung lassen sich die Breiten bestimmen, wobei die Breiten jedoch schon zur Topologieermittlung notwendig sind) muss also eine Vorgehensweise entwickelt werden, welche zuerst die Netze mit stromgerechten Netzzweigen abbildet. Eine Lösungsmöglichkeit besteht in der Festlegung der Verdrahtungsreihenfolge und anschließenden richtungsabhängigen Vorgehensweise bei der Erstellung einer Netztopologie. Dabei kann durch Anwendung der Kirchhoffschen Knotenregel (In jedem Verzweigungs-

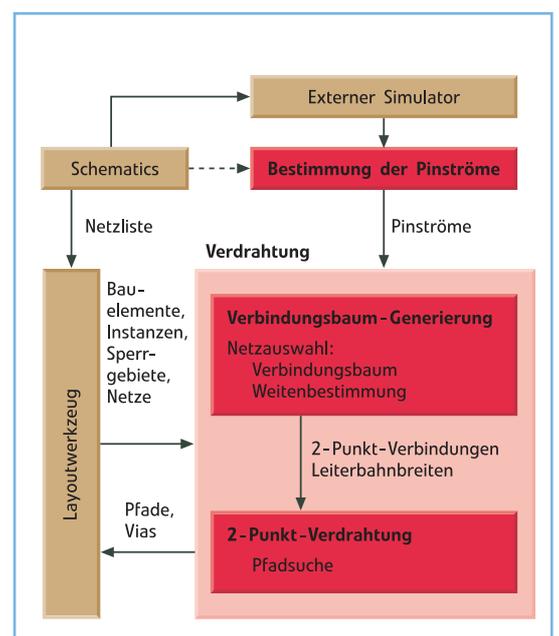


Bild 1. Ablauf der stromabhängigen Verdrahtung

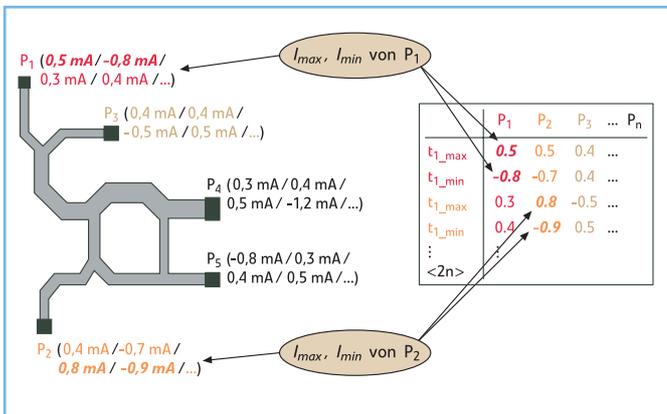


Bild 2. Die den einzelnen Pins P1 bis P5 zugeordneten Ströme sind einmal der maximale und der minimale Strom ( $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ) an diesem Pin. Weiterhin werden die Stromwerte dem Pin zugeordnet, die zum Zeitpunkt der maximalen/minimalen Ströme an den anderen Pins hier gerade anliegen

punkt muss die Summe der ankommenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme sein.) die Strombelastung – und damit die Breite – des jeweils aktuellen Zweigs ermittelt werden, ohne dass die Topologie des gesamten Netzes bekannt sein muss. Anschließend lässt sich die eigentliche Feinverdrahtung, bei der der Netztopologie konkrete Verdrahtungspositionen zugewiesen werden, als einfache Zwei-Punkt-Verdrahtung mit bekannten Stromwerten an beiden Endpunkten betrachten.

Nachfolgend wird ein derartiger Entwurfsablauf vorgestellt, bei dem die stromgerechten Netzweige mittels eines so genannten »Verbindungsbaums« ermittelt werden.

Bild 1 zeigt die wesentlichen Schritte einer stromabhängigen Verdrahtungsstrategie. Während der Stromcharakterisierung werden die Pinströme ermittelt, welche die während der Schaltungssimulation auftretenden Maximalströme beinhalten. Diese Pinströme werden zum stromabhängigen Verdrahtungswerkzeug entweder als ASCII-Datei oder als Bestandteil der schematischen Netzliste übertragen. Die stromabhängige Verdrahtung wurde an ein kommerzielles Layoutwerkzeug gekoppelt. Nach der Platzierung der Bauelemente mittels dieses Layoutwerkzeugs werden die wesentlichen Layoutkomponenten (Bauelemente, Instanzen, Sperrgebiete und Netze) der stromabhängigen Verdrahtung übergeben.

Zu Beginn wird von jedem Netz ein Verbindungsbaum generiert, der die konkrete Reihenfolge, mit der die einzelnen Pins des Netzes angeschlossen werden,

festlegt. Wie bereits erwähnt, lassen sich so mit Hilfe der Kirchhoffschen Knotenregel die Einzelströme und somit auch die einzelnen Pfadweiten zeiteffektiv berechnen.

Die dabei ermittelte Anschlussreihenfolge und die einzelnen Pfadweiten werden dann einem einfachen Zwei-Punkt-Verdrahter [3] übergeben. Vor jeder einzelnen Verdrahtung werden hier sämtliche nicht zu dem aktuellen Netz gehörenden Objekte (Hindernisse und andere Netze) entsprechend der aktuellen Pfadweite »aufgeweitet«. Danach kann die eigentliche Pfadermittlung mit einer Minimalbreite erfolgen, bevor der erzeugte Verdrahtungszweig auf seine stromabhängige Breite erweitert wird. (Auf Grund der zuvor erfolgten temporären Aufweitung aller netzfremden Objekte ist diese Erweiterung immer Design-Rule-korrekt durchführbar.)

### Bestimmung der maximalen Pinströme durch Simulation

Da die Bauelemente einer Schaltung in unterschiedlichen Arbeitspunkten betrieben werden, liegen an den Pinanschlüssen eines Verdrahtungsnetzes zu unterschied-

lichen Zeitpunkten verschieden große Ströme an. Zur Bestimmung der kritischen Pinströme lassen sich die maximalen Ein- und Ausgangsströme aller betrachteten Verdrahtungsnetze durch Simulation ermitteln. Die Beschränkung auf die Zeitpunkte des minimalen und des maximalen Stroms an jedem Pin ermöglicht eine deutliche Verringerung der Anzahl von zu speichernden Pinstromvektoren, da nur diese beiden Stromwerte und die Stromwerte zu deren Zeitpunkten an den anderen Pins gespeichert werden. Für ein Netz mit n Anschlusspunkten sind damit pro Pin maximal 2n Stromwerte zu speichern (Bild 2) [4].

### Ermittlung der Leiterbahnbreiten

Auf Grund der Temperaturabhängigkeit des Elektromigrationsprozesses werden die minimal zulässigen Leiterbahnbreiten  $w_{min}$  unter Einbeziehung der maximal zulässigen Stromdichte  $J_{max}$  für eine bestimmte Leiterbahntemperatur  $T_{ref}$  ermittelt:

$$w_{min} = \max \left\{ \frac{I_{max} \cdot s}{d_{Layer} \cdot J_{max}(T_{ref})}, w_{min\_process} \right\}$$

Dabei verkörpert  $I_{max}$  den maximal auf diesem Pfad zu erwartenden Strom, s einen Sicherheitsfaktor (s = 1,1 bis 1,2),  $d_{layer}$  die Dicke der Leiterbahn und  $J_{max}$  die ma-

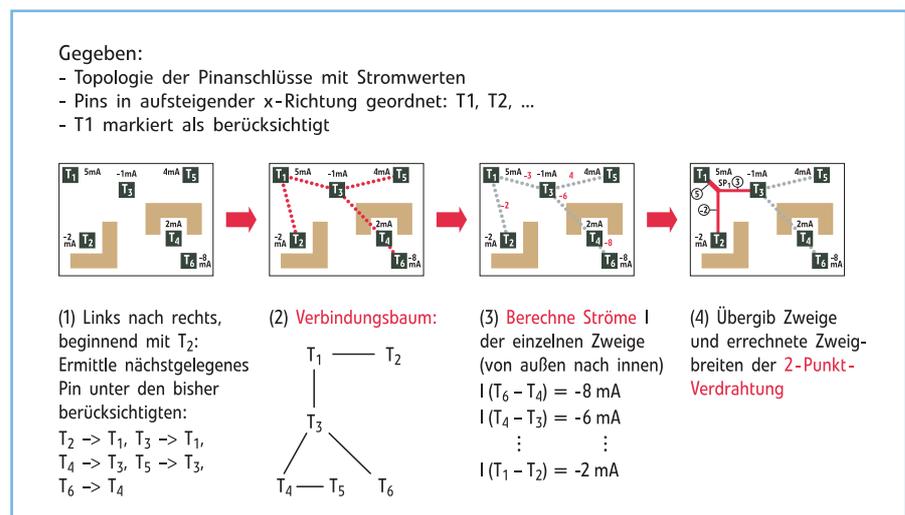


Bild 3. Grafische Darstellung der Verbindungsbaumgenerierung: Die angegebenen Stromwerte dienen nur zur Illustration, da in Wirklichkeit sämtliche dem Pin zugeordnete Stromwerte berücksichtigt werden müssen

ximal zulässige Stromdichte des Leiterbahnmaterials bei der zu erwartenden Leiterbahntemperatur  $T_{ref}$ . Darüber hinaus darf  $w_{min}$  nicht eine lagen- und prozessabhängige minimale Strukturbreite ( $w_{min\_process}$ ) unterschreiten.

### Generierung eines Verbindungsbaums

Wie eingangs erwähnt, steht jede stromgerechte Verdrahtung vor dem Problem, dass sich die Ströme in bereits verdrahteten Teilnetzen ändern, sobald neue Netzsegmente angeschlossen werden. Um die Stromwerte der einzelnen Netzsegmente noch vor der eigentlichen Feinverdrahtung zu ermitteln, muss mindestens die Verdrahtungsreihenfolge, mit der die einzelnen Pins angeschlossen werden, bekannt sein. In diesem Fall kann man durch Benutzung der Kirchhoffschen Knotenregel schon vor der eigentlichen Feinverdrahtung die Teilströme in allen Segmenten berechnen. Trotz der sequenziellen Natur der Feinverdrahtung bleiben diese Ströme unverändert, es werden also von Anfang an die richtigen Weiten berücksichtigt.

Wie baut man einen derartigen Verbindungsbaum auf? Ausgehend von der »geografischen« Lage der Pinanschlüsse wird richtungsabhängig (zum Beispiel von links nach rechts) immer das nächstgelegene bisher schon berücksichtigte Pin ausgewählt und jeweils als Paarverbindung abgelegt, bis sämtliche Pins erfasst sind (Bild 3, Schritt 1). Aus der Verknüpfung der einzelnen Paare untereinander ergibt sich ein Verbindungsbaum (Bild 3, Schritt 2). Bei diesem braucht man dann nur noch »von außen nach innen« die einzelnen Stromwerte zu ermitteln (Bild 3, Schritt 3), und schon kennt man die den einzelnen Baumsegmenten zugeordneten Teilströme. Die einzelnen Baumsegmente und deren Teilströme werden dann einem Zwei-Punkt-Verdrahter übergeben (Bild 3, Schritt 4).

### Feinverdrahtung

Bei der Zwei-Punkt-Verdrahtung werden die exakten Koordinaten und die Ebenenzuordnungen der einzelnen Baumsegmente ermittelt. Vor der Zwei-Punkt-Verdrahtung eines Baumsegments werden alle nicht zum Netz gehörenden Polygone um die Weite  $s$  aufgeweitet. Der Wert  $s$  ergibt sich dabei aus  $s = d_{min} + w/2$  ( $d_{min}$  = minimaler Abstand auf der aktuellen Ebene,  $w$  = aktuelle Leiterbahnbreite). Diese

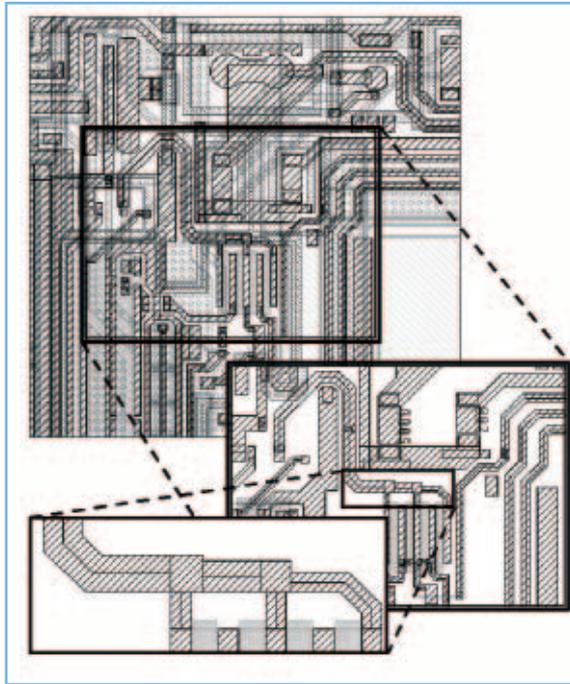


Bild 4. Ausschnitt aus einer realen Analogschaltung mit stromabhängigen Verdrahtungsweiten

Aufweitung ermöglicht die effektive Pfadsuche mit minimaler Breite mit anschließender konfliktloser Erweiterung der Leiterbahnen auf ihre erforderliche Breite [3].

Ein Ausschnitt aus einer realen Analogschaltung, die mit der hier vorgestellten stromabhängigen Verdrahtungsstrategie erzeugt wurde, ist in Bild 4 dargestellt. Für weitere experimentelle Ergebnisse und nähere Angaben zur Implementierung sei auf [4] verwiesen.

### Fazit

Mit dem beschriebenen Lösungsansatz lassen sich bereits während der Verdrahtung die zu erwartenden Ströme in den einzelnen Verdrahtungszweigen berücksichtigen. Damit erhält der Entwickler eine Möglichkeit, schon während der Layouterstellung potenzielle elektromigrationsbedingte Probleme zu erkennen und deren negative Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen zu minimieren.

Diese Vorgehensweise, bei der lediglich über die Anschlussreihenfolge der Pins die Strombelastung der einzelnen Pin-zu-Pin-Verbindungen ermittelt wird, ist dabei die »grobmaschigste« Methode in einer Reihe von denkbaren Lösungsansätzen. »Feinmaschigere« Ansätze, bei denen zum Beispiel auch Steinerpunkte in die stromgerechte Vorverdrahtung einbezogen werden, sind

ebenso realisierbar. Nach Meinung der Autoren erfordern diese jedoch einen größeren algorithmischen Aufwand, ohne dass die Ergebnisse zwangsläufig besser sind [4].

Der abschließende Teil dieser dreiteiligen Beitragsreihe über Elektromigration wird sich mit einer automatischen Berechnungsmethode von Stromdichten in Leiterbahnen unterschiedlicher Geometrien beschäftigen.

### Literatur

- 1 T. Mitsuhashi, E. S. Kuh: »Power and Ground Network Topology Optimization«; Design Automation Conference, 1992, S. 524-529
- 2 Z. A. Syed, A. Gamal: »Single Layer Routing of Power and Ground Networks in Integrated Circuits«; In: Journal of Digital Systems, vol. VI, no. 1, 1982, S. 53-63
- 3 J. Scheible, T. Adler: »An Interactive Router for IC Design«; Design, Automation and Test in Europe Conference (DATE), 1998, S. 414-420
- 4 J. Lienig, G. Jerke, T. Adler: »Electromigration Avoidance in Analog Circuits: Two Methodologies for Current-Driven Routing«; 7th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC) and 15th International Conference on VLSI Design, 2002, S. 372-378

### Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig wechselte 2002 nach langjähriger Industrietätigkeit an die TU Dresden, wo er als Professor das Institut für Feinwerktechnik leitet. Dipl.-Ing. Göran Jerke arbeitet an seiner Promotion bei Robert Bosch in Reutlingen.

### KONTAKT

Institut für Feinwerktechnik,  
Technische Universität Dresden,  
01062 Dresden,  
Tel. 03 51 /4 63 -3 47 42,  
Fax 0351 /4 63 -3 71 83,  
www.ifwt.et.tu-dresden.de

Robert Bosch GmbH,  
Abteilung AE/DIC,  
72762 Reutlingen,  
Tel. 0 71 21 /35 -17 34,  
Fax 0 71 21 /35 -26 87,  
www.bosch.de