

Neue Herausforderungen an die Verdrahtungsvorhersage beim 3D-Layoutentwurf

Tilo Meister, Jens Lienig

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design
Technische Universität Dresden
D-01062 Dresden, Germany

Kurzfassung

Während des Layoutentwurfs einer elektronischen Schaltung unterliegen Zwischenlösungen einer ständigen Bewertung, wobei ein typisches Bewertungskriterium die Verdrahtbarkeit ist. Sie dient dazu, möglichst frühzeitig ungültige Lösungen auszusortieren und so die besten Zwischenlösungen für nachfolgende Entwurfsschritte zu identifizieren. Die aktuelle 3D-Integration elektronischer Baugruppen und die daraus resultierenden dreidimensionalen Verdrahtungsstrukturen erfordern ein neues Herangehen an dieses Problem. Diese Arbeit gibt zuerst einen Überblick über die Methoden zum Abschätzen der Verdrahtbarkeit, wobei diese nach ihrem jeweiligen Auflösungsgrad systematisch aufbereitet und verglichen werden. Der Beitrag untersucht anschließend die neuen Herausforderungen an die Verdrahtbarkeitsanalyse beim 3D-Layoutentwurf. Anhand von Lösungsmöglichkeiten wird gezeigt, dass bei entsprechender Berücksichtigung der 3D-spezifischen Besonderheiten auch hier eine effektive Verdrahtbarkeitsvorhersage möglich ist.

Abstract

Routability is an essential measure to evaluate intermediate results in electronic design automation. Recent advancements of 3D integration technologies for electronic devices impose new challenges on routability prediction. In this paper, we first provide a systematic survey of approaches to routability prediction. Next, we analyze current 3D integration technologies with respect to their implications on routability prediction. Thereafter, we provide an approach to extend routability prediction to effectively handle 3D integrated circuits.

1 Einleitung

Der Layoutentwurf einer elektronischen Schaltung ist eine komplexe Aufgabe, die in einer Kette überschaubarer Entwurfsschritte abgearbeitet wird. Einer der letzten Schritte ist das Festlegen der Verdrahtungsgeometrie (Verdrahtung) und damit der elektrischen Eigenschaften der Schaltung. Um eine bestmögliche Verdrahtung zu erzielen, werden zuvor erzielte Zwischenergebnisse des Layoutentwurfs anhand ihrer *Verdrahtbarkeit* (engl. routability) bewertet und optimiert. Dementsprechend ist die Abschätzung der Verdrahtbarkeit fester Bestandteil vieler Entwurfsschritte. Die aktuelle Entwicklung zur dreidimensionalen (3D) Integration elektronischer Baugruppen und die damit verbundenen komplexeren Verdrahtungsmodelle erfordern neue, an 3D-Strukturen angepasste Vorgehensweisen bei der Verdrahtungsvorhersage.

Diese Arbeit gibt zuerst systematisierend einen Überblick über die vielfältigen Methoden zur Vorhersage der Verdrahtbarkeit. Dabei wird offensichtlich, dass die entwickelten Verdrahtungsabschätzungen nicht nur auf unterschiedlichen Auflösungsgraden beruhen, sondern auch hinsichtlich ihrer Effizienz (Rechenzeit) verschiedene Eigenschaften besitzen, was wiederum Rückschlüsse auf ihre passende Anwendung erlaubt. Anschließend werden die neuen Herausforderungen an die Verdrahtungsvorhersage beim 3D-Layoutentwurf untersucht. Unter Nutzung der zuvor dargestellten Merkmale einzelner Methoden wird ein effektives Modell der Verdrahtungsressourcen bei 3D-Strukturen abgeleitet und bei der 3D-Verdrahtungsvorhersage angewendet.

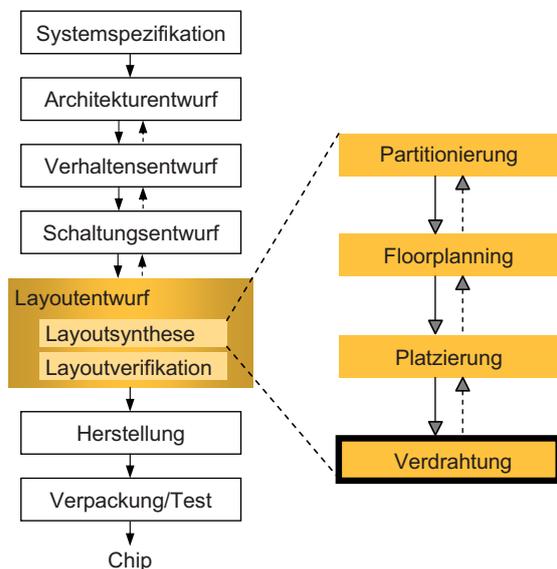


Bild 1 Vereinfachte Darstellung der wesentlichen Schritte beim Entwurf elektronischer Schaltungen mit der Verdrahtung als abschließendem Schritt der Layoutsynthese.

Die systematisierende Darstellung der verschiedenen Methoden der Verdrahtungsvorhersage sowie die gezeigte Adaption einer zweidimensionalen Vorhersagemethode für 3D-Strukturen sollen Layoutentwerfer in die Lage versetzen, die deutlich komplexeren Anforderungen an Verdrahtbarkeitsuntersuchungen bei heterogenen 3D-Strukturen zu meistern.

2 Verdrahtbarkeit

Die Verdrahtung ist einer der letzten Schritte beim Layoutentwurf elektronischer Schaltungen (**Bild 1**). In diesem Entwurfsschritt werden die Verdrahtungsgeometrie der elektronischen Schaltung und damit gleichzeitig die elektrischen Eigenschaften sowie die Leistungsfähigkeit der Schaltung festgelegt. Um dabei bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, muss bei den vorangehenden Entwurfsschritten eine gute *Verdrahtbarkeit* angestrebt werden.

2.1 Was ist Verdrahtbarkeit?

Die Verdrahtbarkeit ist ein wichtiges Bewertungskriterium für Zwischenlösungen einzelner Entwurfsschritte bzw. für deren Endergebnis. Um die Verdrahtbarkeit beim Layoutentwurf effektiv zur Bewertung einzusetzen, muss sie als quantitative Aussage, wie z. B. als Zahlenwert, vorliegen und einen Anhaltspunkt über den späteren Erfolg oder Misserfolg und über die Güte des Verdrahtungsergebnisses liefern. Dazu ist jedoch kein absoluter Bezug des Verdrahtbarkeitswertes zu einer allgemeingültigen Referenz notwendig. Es reicht aus, wenn der Wert eine hohe Wiedergabereue besitzt, das heißt, der Wert für die Verdrahtbarkeit muss für verschiedene Zwischenergebnisse des gleichen Designs und auch für möglichst viele verschiedene Designs vergleichbar sein. Für die Entwurfsautomatisierung ist diese quantitative Bewertung der Verdrahtbarkeit einer Zwischenlösung jedoch nur bedeutsam, wenn sie deutlich schneller gefunden wird als die Verdrahtungsgeometrie selbst. Außerdem ist die Bewertung der Verdrahtbarkeit nicht nur direkt vor der Verdrahtung von Interesse, sondern muss nach *jedem* Schritt des Layoutentwurfs ermittelbar sein. Diese Anforderungen werden nur erfüllt, wenn dem Bestimmen der Verdrahtbarkeit sinnvolle Vereinfachungen zugrunde liegen. Dabei gilt allgemein, dass je früher im Entwurfsfluss die Verdrahtbarkeit abgeschätzt wird, umso mehr Vereinfachungen anzunehmen sind.

2.2 Kriterien für die exakte Bestimmung der Verdrahtbarkeit

Es ist offensichtlich, dass die einzig exakte Bestimmung der Verdrahtbarkeit eines Designs darin besteht, die Verdrahtung tatsächlich durchzuführen. Dabei sind sowohl der Aufwand des Verdrahtungsprozesses, als auch die Güte der Verdrahtungsgeometrie hinsichtlich vorgegebener Optimierungskriterien zu bewerten. In der Praxis bedeutet das üblicherweise, dass ein kommerzielles, automatisiertes Verdrahtungswerkzeug auf das Design angewendet wird. Die Verdrahtbarkeit ergibt sich dann aus zahlreichen Messwerten, wie beispielsweise

- Laufzeit des Autorouters,
- Vollständigkeit (Completion) der Verdrahtung,
- Verdrahtungslänge,

- Anzahl der Vias (Durchkontaktierungen),
- Laufzeit kritischer Signale,
- Übersprechen.

2.3 Praktische Kriterien zur Vorhersage der Verdrahtbarkeit

Wie in Abschnitt 2.2 angedeutet, ist ein großer Aufwand erforderlich, um anhand einer exakten Verdrahtungsrealisierung die Verdrahtbarkeit exakt zu ermitteln. Soll diese als Bewertungskriterium für Zwischenlösungen beim Entwurf dienen, muss sie deutlich schneller bestimmt werden. Daher sind sinnvolle Vereinfachungen notwendig, womit lediglich eine prognostische Abschätzung der Verdrahtbarkeit erfolgt.

Üblicherweise werden dazu Vorhersagen über die spätere Verdrahtungsgeometrie aufgestellt, was nachfolgend als *Verdrahtungsvorhersage* bezeichnet wird. Sie ist damit ein auf Vereinfachungen basierendes Abschätzen der Qualität der später ermittelten Verdrahtungsgeometrie.

Von bestimmten, vorhersagbaren Verdrahtungseigenschaften ist bekannt, dass sie mit der tatsächlichen Verdrahtbarkeit gut korrelieren. Die wichtigsten dieser zur Vorhersage der Verdrahtbarkeit nutzbaren Eigenschaften sind

- geschätzte Gesamtverdrahtungslänge aller Netze,
- geschätzte Verdrahtungslängen einzelner Netze,
- lokale Verdrahtungsdichte,
- lokale Verdrahtungsdichte in Bezug zu den örtlichen Verdrahtungsressourcen,
- Anzahl der Signalkreuzungen,
- Anzahl der erwarteten Vias.

3 Methoden zur Verdrahtungsvorhersage

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, ist die Verdrahtungsvorhersage ein Abschätzen von Eigenschaften der späteren, realen Verdrahtungsgeometrie. Mithilfe dieser Abschätzungen kann die Verdrahtbarkeit von unterschiedlichen Zwischenlösungen des Layoutentwurfs bewertet, verglichen und optimiert werden. Diese Vorhersagen sind stets ein Kompromiss aus Rechenaufwand und Vorhersagegenauigkeit. Zudem hängt die Verlässlichkeit der Vorhersage von der Genauigkeit der Ausgangsinformationen ab. Ist bei-

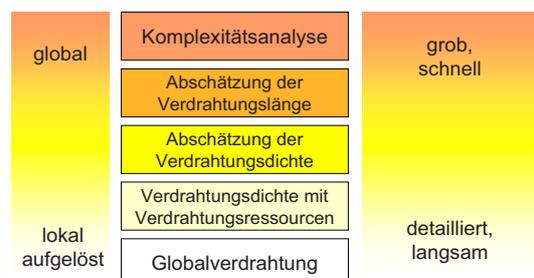


Bild 2 Methoden der Verdrahtungsvorhersage mit ihrem Auflösungsgrad, der Genauigkeit der Vorhersage und dem (Rechen-)Aufwand.

spielsweise die Platzierung noch nicht abgeschlossen, sind die Positionen der Bauelemente (Zellen usw.) mit Unsicherheiten behaftet, was im Vergleich zur abgeschlossenen Platzierung mit einer schlechteren Verlässlichkeit der Vorhersage der Verdrahtbarkeit einhergeht.

Die Methoden der Verdrahtungsvorhersage lassen sich in fünf Gruppen einteilen, die in den folgenden fünf Abschnitten 3.1 bis 3.5 erläutert werden. **Bild 2** zeigt ihren Auflösungsgrad (Granularität) und stellt vergleichend ihren Rechenaufwand und ihre Ergebnisqualität (Genauigkeit) dar.

3.1 Komplexitätsanalyse

Die Verdrahtbarkeit eines Designs hängt wesentlich mit der Komplexität bzw. dem Vernetzungsgrad der zugrunde liegenden Schaltung zusammen. Interpretiert man eine Netzliste als Graphen und stellt dabei die Bauelemente (Zellen usw.) als Knoten sowie die Netze als Kanten dar, dann spiegeln z. B. die Adhäsion, Kohäsion und die Entfernungen zwischen Knotenpaaren des Graphen den Vernetzungsgrad der Netzliste wieder [1-6]. Eine Möglichkeit, den Adhäsionswert zu bestimmen, ist beispielsweise die Ermittlung der Summe der Min-Cuts aller Knotenpaare (engl. sum of all pairs min-cut, SAPMC) [4, 7-10].

Da diese Vorhersage keinerlei geometrische Informationen berücksichtigt, findet sie sehr früh im Entwurfsprozess (Schaltungsentwurf, Partitionierung) Verwendung. So lassen sich anhand des SAPMC-Wertes z. B. logisch gleichwertige Schaltungen wie in **Bild 3** unterscheiden und die Variante mit der geringeren Vernetzung, und damit der besseren Verdrahtbarkeit, auswählen.

3.2 Mittlere Verdrahtungslänge

Die vorausschauend abgeschätzte mittlere Verdrahtungslänge spiegelt zu einem bestimmten Grad die Verdrahtbarkeit eines Designs wieder, denn die Verdrahtung einer Platzierungsanordnung ist oft umso einfacher, je weniger Gesamtverdrahtungslänge notwendig ist.

Eine Erweiterung von Rent's Regel [11, 12] beschreibt einen einfachen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gatter einer Schaltung und der mittleren Verdrahtungslänge. Dieser Zusammenhang ermöglicht eine sehr schnelle und geometrieunabhängige Vorher-

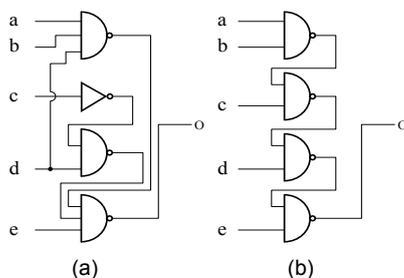


Bild 3 Die beiden Schaltungen (a) und (b) sind logisch äquivalent, aber unterschiedlich stark vernetzt. Schaltung (b) hat einen geringeren Vernetzungsgrad und ist deswegen besser verdrahtbar.

sage. Dazu muss lediglich das Verhältnis der äußeren Kantenlängen einer Schaltung vorgegeben werden. Ist die Grundfläche einer Schaltung z. B. quadratisch und der Rent's Exponent $p > 1/2$, dann ergibt sich die geschätzte mittlere Verdrahtungslänge L aus dem Rent's Exponenten und der Anzahl C der Gatter:

$$L \sim C^{(p - 1/2)}$$

Eine zweite gebräuchliche Methode zum Abschätzen der mittleren Verdrahtungslänge besteht darin, für jedes Netz separat die Verdrahtungslänge vorherzusagen. Diese einzelnen Längen werden dann zur Gesamtverdrahtungslänge des Designs summiert. Dabei sollten die Pinpositionen der Netze jedoch bereits bekannt sein, um den Schätzfehler in Grenzen zu halten. Meist wird der halbe Netzzumfang (HPWL) als Schätzwert für die Verdrahtungslänge verwendet. Ähnlich lassen sich auch anhand von Spannbäumen, Steinerbäumen und vollständigen Graphen Schätzwerte für die Verdrahtungslänge einzelner Netze bestimmen [13].

3.3 Verdrahtungsdichte

Die Aussagekraft der Verdrahtungsvorhersage lässt sich im Vergleich zu Abschnitt 3.2 verbessern, wenn man zusätzlich zu den Verdrahtungslängen auch eine Abschätzung der Verdrahtungswege in die Vorhersage einbezieht. Dazu wird eine Verteilung $D_{\text{Netz}}(x, y)$ angenommen, welche die Wahrscheinlichkeiten beschreibt, mit der die möglichen Verdrahtungswege vom Autorouter letztendlich für ein bestimmtes Netz in Betracht gezogen werden.

In den meisten Fällen ist diese Verdrahtungsdichteverteilung außerhalb des kleinsten umschließenden Rechtecks aller Pinpositionen des Netzes null und innerhalb dieses Rechtecks größer null. Die Verteilung wird oft so normiert, dass ihr Integral exakt die geschätzte Verdrahtungslänge des Netzes ergibt. Diese Dichten werden für jedes Netz einzeln bestimmt, danach über das gesamte Design summiert und ergeben so eine Verdrahtungsdichte $D_{\text{Design}}(x, y)$ für die komplette Layoutfläche.

Die einfachste mögliche Verdrahtungsdichteverteilung für ein Netz ist eine Gleichverteilung, die aussagt, dass sich die Verdrahtungsfläche

$$A_{\text{Draht}} = \text{HPWL} \cdot \text{Leiterzugbreite}$$

im Mittel in dem kleinsten umschließenden Rechteck A_{Umschl} gleich verteilt (**Bild 4**):

$$D_{\text{Netz}}(x, y) = A_{\text{Draht}} / A_{\text{Umschl}}$$

Eine detailliertere Verdrahtungsdichteverteilung wird in [14] eingeführt, die man oft als Lou's statistisches Modell bezeichnet. Diese Verteilung beruht darauf, dass jeder kürzeste Verdrahtungsweg innerhalb des kleinsten umschließenden Rechtecks gleich wahrscheinlich ist. Der Wert der Dichteverteilung an einem bestimmten Punkt ergibt sich dann aus dem Quotienten der Anzahl der Wege, die durch diesen Punkt führen, geteilt durch die Anzahl aller möglichen Wege (**Bild 5 a**, siehe auch Bild 12). Diese Verdrahtungsdichteverteilung erlaubt es, Hindernisse zu berücksichtigen (**Bild 5 b**).

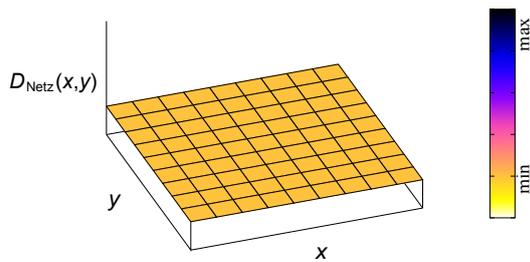


Bild 4 Gleichverteilung der Verdrahtungsfläche innerhalb des kleinsten umschließenden Rechtecks der Pinpositionen des Netzes. Die hier angenommenen zwei Pins des Netzes befinden sich in diesem Bild und in den Bildern 5 bis 8 in der linken oberen Ecke bzw. in der rechten unteren Ecke der Darstellung. Außerhalb der jeweils dargestellten Bereiche ist der Wert der Dichteverteilungen gleich null.

Ein typisches Optimierungsziel von Verdrahtern ist es, Verdrahtungswege mit möglichst wenigen Richtungsänderungen auszuwählen. Für solche Verdrahtungen lassen sich nach dem gleichen Prinzip wie in [14] weitere praktisch relevante Verteilungen bestimmen. Als Beispiele sind in **Bild 6** die Verteilung für eine Verdrahtung ausschließlich mit L-Shape und in **Bild 7** die Verteilung für eine Verdrahtung in Z-Shape dargestellt. Da sich diese Verteilungen signifikant von Lou's Verdrahtungsmodell unterscheiden, ist Lou's Modell für die Vorhersage von Verdrahtungen mit möglichst wenigen Richtungsänderungen nur bedingt geeignet.

Eine detaillierte Verdrahtungsdichteverteilung wird in [15, 16] vorgestellt. Sie ist ein Mittelweg zwischen Lou's Verteilung [14] (siehe Bild 5), die alle Verdrahtungswege als gleich wahrscheinlich annimmt, und den Verteilungen in **Bildern 6** und **7**, die praktisch relevante Verdrahtungsgeometrien berücksichtigen. Die Grundidee ist auch hier eine statistische Betrachtung der möglichen Verdrahtungswege. Bei dieser Verteilung findet die Betrachtung jedoch entlang von Verdrahtungsfronten statt, die gleich weit von den Pins eines Netzes entfernt sind (gemessen in Manhattan-Geometrie). Es ist offensichtlich, dass mit absoluter Sicherheit (100 %) der Verdrahtungsweg des Netzes durch jede dieser Fronten hindurchgehen muss. Weiterhin wird angenommen, dass der Verdrahtungsweg diese Fronten an jeder Stelle mit der gleichen Wahrscheinlichkeit quert. Die Verdrahtungsdichteverteilung ist also konstant entlang dieser Fronten, und das Integral über die Dichteverteilung entlang einer solchen Front ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 100 %.

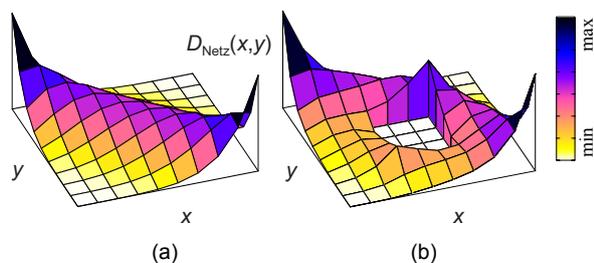


Bild 5 Lou's statistisches Modell der Verdrahtungsdichte für ein Netz mit zwei Anschlüssen ohne Hindernisse (a) und mit Hindernis (b). Dunkle Felder stehen für einen höheren Dichtewert (siehe auch Bild 4).

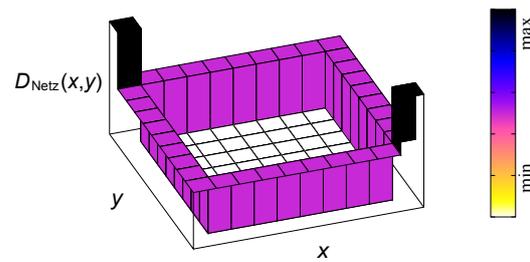


Bild 6 Verdrahtungsdichteverteilung einer Zweipunktverbindung für die Verdrahtung mit L-Shape (siehe auch Bild 4).

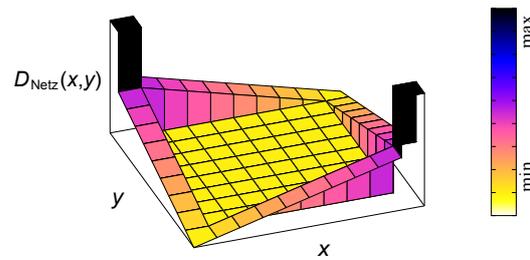


Bild 7 Verdrahtungsdichteverteilung für die Verdrahtung mit Z-Shape (siehe auch Bild 4).

Wie bei Lou's statistischem Modell lassen sich auch bei dieser Dichteverteilung Hindernisse berücksichtigen. Dazu wird in den Bereichen einer Front, in denen Hindernisse für die Verdrahtung liegen, die Wahrscheinlichkeit gesenkt bzw. auf null gesetzt und die Wahrscheinlichkeit in den restlichen Bereichen der Front entsprechend erhöht.

Ergänzend wird in [15] eine Möglichkeit beschrieben, die Dichteverteilung über das kleinste umschließende Rechteck aller Pinpositionen des Netzes hinaus zu erweitern. Dazu werden im Nahbereich außerhalb des kleinsten umschließenden Rechtecks Werte größer null definiert. Mit dieser Ergänzung bildet die Dichteverteilung eine Verdrahtung ab, die kleine Umwege erlaubt (**Bild 8**).

3.4 Verdrahtungsdichte und -ressourcen

Eine genauere Aussage als anhand der Verdrahtungsdichteverteilung (siehe Abschnitt 3.3) lässt sich treffen, indem die bereits in Abschnitt 3.3 beschriebene Verdrahtungsnachfrage zu den Verdrahtungsressourcen ins Verhältnis gesetzt wird. Hierfür gibt es zwei Methoden.

Zuerst ist in jedem Fall die Verteilung der Verdrahtungsressourcen zu bestimmen. Diese ermittelt

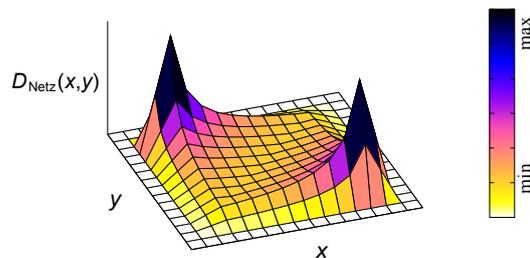


Bild 8 Verdrahtungsdichteverteilung, bei der kleine Umwege erlaubt sind (siehe auch Bild 4) [15, 16].

man basierend auf der gewählten Herstellungstechnologie und den damit verbundenen Entwurfsregeln (Design Rules). Dann wird entweder

- die Verteilung der Verdrahtungsressourcen von der Verteilung der Verdrahtungsnachfrage abgezogen und damit der sogenannte *Overflow* ermittelt, oder
- die Verteilung der Verdrahtungsnachfrage durch die Verteilung der Verdrahtungsressourcen geteilt und damit eine sogenannte *Congestion Map* bestimmt.

Aus beiden Methoden lassen sich Aussagen über die Verdrahtbarkeit bezogen auf konkrete Layoutgebiete ableiten. Dabei sind insbesondere die Gebiete von Interesse, in denen die Maximalwerte liegen. Außerdem fließen die Gleichmäßigkeit der Verteilung sowie das Vorhandensein von „unterbelegten“ Gebieten in die Bewertung der Verdrahtbarkeit ein.

Unter Nutzung der Verdrahtungsressourcen bieten sich weitere Verteilungsermittlungen an, die sich mit der Congestion Map oder dem Overflow verknüpfen lassen. Beispielsweise kann man die Verteilung der Signalkreuzungen verwenden, um die Verdrahtungsdichte in verschiedenen Gebieten des Designs unterschiedlich zu wichten. Ist in einem Gebiet des Designs die Dichte der Signalkreuzungen besonders groß, so könnte dort die Congestion höher bewertet werden als in Bereichen mit wenigen oder keinen Signalkreuzungen.

3.5 Globalverdrahtung

Bei der Globalverdrahtung werden ungefähre Verbindungswege auf einer Layoutoberfläche festgelegt. Dies geschieht meist durch Zuweisung der Netzsegmente in sogenannte Verdrahtungsregionen unter Berücksichtigung der jeweiligen Verdrahtungskapazitäten dieser Regionen. Somit beeinflussen bereits betrachtete Netze die nachfolgend zu verlegenden Netze mittels der zur Verfügung stehenden lokalen Verdrahtungskapazitäten. Damit wird im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Methoden die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Netzwerke berücksichtigt, was die Genauigkeit der Abschätzung deutlich erhöht.

Globalverdrahter decken ein breites Spektrum der Verdrahtungsvorhersage ab. Es gibt sowohl schnelle Algorithmen mit geringer Genauigkeit als auch sehr aufwendige Methoden, die eine deutlich höhere Vorhersagegenauigkeit ermöglichen. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihren Abstraktions- bzw. Vereinfachungsgrad und damit durch die Größe der Verdrahtungsregionen. Je kleiner die Verdrahtungsregionen sind, umso aufwendiger (langsamer), aber auch umso genauer ist die Verdrahtungsvorhersage, da der Auflösungsgrad zunimmt. Anzumerken ist, dass es hier einen fließenden Übergang zur eigentlichen Verdrahtung gibt. Bei einer Verkleinerung der Verdrahtungsregionen bis auf die Größe des Mittenabstandes zweier Leiterzüge existiert kein Unterschied mehr zur eigentlichen Verdrahtung; die Verdrahtungsvorhersage geht direkt in die Verdrahtung bzw. das Verdrahtungsergebnis über.

3.6 Vergleichende Betrachtung der Methoden

Wie bereits in Bild 2 zum Ausdruck kommt, zeichnen sich die beschriebenen Methoden zur Verdrahtungsvorhersage durch einen unterschiedlichen Auflösungsgrad und Rechenaufwand aus. Der lokale Auflösungsgrad ist am niedrigsten bei der Komplexitätsanalyse und am höchsten bei der Globalverdrahtung, ebenso verhält es sich mit dem notwendigen Aufwand (Rechenzeit). Dem steht gegenüber, dass dieser Aufwand in einem sinnvollen Verhältnis zur Aussagekraft stehen sollte. Es ist beispielsweise wenig sinnvoll, zur Bewertung einer Zellenvertauschung eine Globalverdrahtung durchzuführen, nur um den Einfluss der Vertauschung auf die Gesamtverbindungs-länge zu ermitteln.

Die Auswahl der zu einem Entwurfsschritt sinnvollen Abschätzungsmethode hängt ebenfalls von den notwendigen Eingabeinformationen ab, die unbedingt vorliegen müssen. So kann man während der eigentlichen Schaltungsentwicklung lediglich die Verdrahtung bezüglich ihrer Komplexität (siehe Abschnitt 3.1) abschätzen, da sämtliche Layoutinformationen, wie z. B. die Größe der Layoutfläche und die Bauelementeplatzierung, fehlen. Auch sind Globalverdrahter (siehe Abschnitt 3.5) für die Verdrahtungsvorhersage bei Entwurfsschritten vor der Platzierung nicht anwendbar, da die dazu benötigten Positionen der Bauelemente (z. B. Zellen) noch nicht feststehen.

Die in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 vorgestellten statistischen Methoden für die Verdrahtungsvorhersage eignen sich gut, um die mittlere Verdrahtungslänge abzuschätzen. Für die Vorhersage von Schaltungseigenschaften, die von einzelnen Netzen abhängen, sind sie jedoch schlecht geeignet. Eine solche Eigenschaft ist z. B. die Leistungsfähigkeit (Performance) einer Schaltung. Sie hängt von der konkreten Verdrahtung einzelner Netze ab und kann durch eine statistische Vorhersage nur mit großem Fehler bestimmt werden.

Sogenannte kollektive Effekte, wie gegenseitige Abhängigkeiten von Netzen, lassen sich mit statistischen Methoden nicht vorhersagen. Sollen beispielsweise n Netze durch eine Verdrahtungsregion mit der Kapazität $n-1$ verdrahtet werden, dann ist mindestens ein Netz auf einem Umweg zu verdrahten. Mit statistischen Methoden ist jedoch nicht sichergestellt, dass bemerkt wird, dass ein Netz einen Umweg nehmen muss. Auch ist oft die Feststellung sinnvoll, welches der n Netze auf Umwegen zu verlegen ist. Diese Netzidentifikation ist jedoch mit statistischen Vorhersagen unmöglich.

Weiterhin lassen sich mit der statistischen Vorhersage keine Details der Verdrahtung berücksichtigen. So können z. B. bestimmte Fanouts/Escape-Routings und die Platzierung von Vias nicht in die statistische Betrachtung der Verdrahtung einfließen [17].

Ist es notwendig, die beschriebenen kollektiven Effekte und Details der Verdrahtung einzubeziehen, dann ist für die Verdrahtungsvorhersage ein Globalverdrahter zu verwenden. Der wesentliche Unterschied

zu den in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 vorgestellten Methoden besteht dabei darin, dass die Globalverdrahtungsinformationen, wie z. B. die Zuordnung der Netze zu den einzelnen Verdrahtungsgebieten, an den nachfolgenden Feinverdrahter übergeben werden. Neben dem hohen Auflösungsgrad erlaubt diese Verknüpfung (Datenübergabe) von grober Verdrahtungszuweisung zum Verdrahtungsprogramm, Netzeigenschaften detailliert vorherzusagen. Lediglich Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Netzen, die z. B. für die Ermittlung von Signaleigenschaften wichtig sind, können hier nur ungenau prognostiziert werden, da diese auf der Kenntnis des exakten Verdrahtungsweges eines jeden Netzes beruhen.

4 Verdrahtungsvorhersage bei 3D-Systemen

Klassische Schaltkreise bestehen aus *einer* Ebene mit aktiven Bauelementen, auf der sich mehrere Metall-ebenen für die Verdrahtung befinden. Diese 2D-Systeme stoßen bezüglich der Integrationsdichte und der elektrischen Eigenschaften, wie z. B. Signalverzögerungen, zunehmend an ihre Grenzen. Gegenwärtig aufkommende 3D-Systeme bestehen aus mehreren, übereinander angeordneten Ebenen aktiver Bauelemente, zu denen jeweils mehrere Verdrahtungsebenen gehören. Derartige 3D-ICs ermöglichen u. a. höhere Integrationsdichten und verkürzte Signallaufzeiten [18, 19].

Eine aktive Ebene mit ihren zugehörigen Verdrahtungsebenen bezeichnet man als sogenannten *Tier*. Die Integration in der dritten Dimension wird unter anderem erst durch Through Silicon Vias (TSV) ermöglicht, welche die einzelnen Tiers elektrisch verbinden, da sie eine ausreichend große vertikale Verdrahtungsdichte ermöglichen. Aufgrund ihrer größeren Länge in Bezug zu herkömmlichen Signal-Vias besitzen TSV einen erheblichen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften der Verdrahtung.

Neben den 3D-relevanten technologischen Herausforderungen stellen 3D-Systeme auch neue Anforderungen an den Layoutentwurf. Während viele Entwurfsaufgaben bei herkömmlichen Systemen durch Projektion mit einem 2D-Modell ausgeführt werden können, sind für den effizienten Entwurf von 3D-Systemen diese auch in ihrer Dreidimensionalität zu modellieren, was neuartige Randbedingungen mit sich bringt und stellenweise eine Anpassung der Optimierungsziele erfordert.

4.1 Modellierung von Verdrahtungsressourcen bei 3D-Strukturen

Die Verdrahtungsressourcen elektronischer Schaltungen lassen sich generell durch einen regelmäßigen Graphen mit gewichteten Kanten wie in **Bild 9 a** modellieren. Dieser Graph besteht aus Knoten, welche die Verdrahtungsregionen des Designs abbilden, und aus gewichteten Kanten, die die Ver-

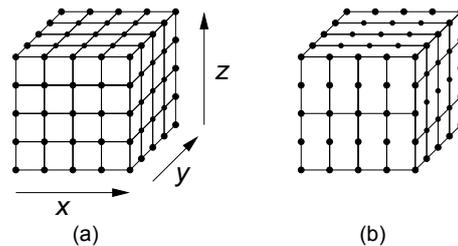


Bild 9 Allgemeiner Graph zur Abbildung der Verdrahtungsressourcen (a) und der Graph mit einer reduzierten Anzahl Kanten durch die Annahme von Vorzugsrichtungen bei der Verdrahtung (b).

drahtungsressourcen in diesen Regionen repräsentieren. Jedem dieser Knoten ist eine Koordinate (x, y, z) im Design zugewiesen. Die Koordinaten x und y sind stetige Koordinaten innerhalb einer Verdrahtungsebene, wohingegen z diskret ist und die Verdrahtungsebene spezifiziert. In der Praxis jedoch beschränkt man x und y oft auf diskrete Werte. Außerdem werden Vorzugsrichtungen für die Verdrahtung in den einzelnen Ebenen angenommen. Durch diese Einschränkungen lässt sich die Verdrahtungsaufgabe deutlich vereinfachen, denn die Anzahl der Knoten wird begrenzt und die Anzahl der Kanten in Graphen verringert (**Bild 9 b**).

Dieses generelle Modell der Verdrahtungsressourcen ist gleichermaßen für 2D- und 3D-Systeme gültig. Aus dieser Feststellung könnte man schlussfolgern, dass die Verdrahtungsvorhersage bei modernen 3D-ICs den gleichen Schwierigkeitsgrad wie bei 2D-Systemen besitzt. Der Entwurf moderner 3D-Strukturen erweist sich jedoch als aufwendiger, denn es müssen mehrere Tiers berücksichtigt werden, was mit neuen Randbedingungen und Optimierungszielen einhergeht:

- Die Verdrahtung in 3D-Systemen unterscheidet sich topologisch von vorangegangenen Technologien, denn es sind Bauelemente in unterschiedlichen Tiers zu verdrahten. Damit liegen die Pins eines derartigen Netzes in verschiedenen Verdrahtungsebenen mit teilweise erheblichem vertikalen Abstand.
- Der Einfluss der TSV auf die elektrischen Eigenschaften der Verdrahtung ist deutlich größer als die Auswirkungen von herkömmlichen Vias, da TSV in vielen 3D-Technologien deutlich länger sind.
- Die mögliche TSV-Dichte ist bei allen aktuellen und absehbaren 3D-Technologien mindestens um den Faktor 100 kleiner als die Dichte herkömmlicher intra-Tier Signal-Vias [20]. Entsprechend sorgfältig muss die Verwendung der (wenigen) implementierbaren TSV geplant werden, was ihre spezielle Berücksichtigung bei der Verdrahtungsvorhersage erfordert. Zusätzlich ist zu beachten, dass TSV eine schlechtere Zuverlässigkeit als herkömmliche Vias haben.
- Im Allgemeinen erzeugt ein 3D-System mit k aktiven Ebenen k -mal so viel Wärme wie ein 2D-System mit vergleichbarer Grundfläche und nur einer aktiven Ebene. Die Verteilung der Wärme

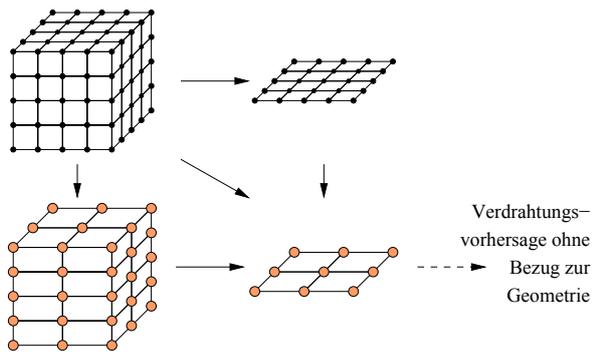


Bild 10 Zwei Möglichkeiten, den Graphen der Verdrahtungsressourcen zu vereinfachen. Von links nach rechts: Zusammenfassen von Verdrahtungsebenen. Von oben nach unten: Zusammenfassen von Verdrahtungsregionen. Eine weitere Vereinfachung würde jeglichen Bezug zur Geometrie entfernen.

im 3D-System und die Wärmeableitung aus diesem sind entsprechend aufwendiger. Um hochintegrierte 3D-Systeme ausreichend zu kühlen, sind thermische Vias und andere Elemente zur Wärmeleitung im Layout zu integrieren. Diese Verfahren zur Wärmeableitung beeinflussen die Verdrahtungsgeometrie und sind somit bei der Verdrahtungsvorhersage zu berücksichtigen. Darüber hinaus gewinnt der Einfluss der Wärme auf die elektrischen Eigenschaften der Leiterbahnmaterialien an Bedeutung.

- 3D-Systeme erfordern einen höheren Verdrahtungsaufwand aufgrund von Sperrflächen. Beispielsweise bedingt jedes TSV und jedes thermische Via eine Sperrfläche in jeder Ebene. Neu in 3D-Systemen ist, dass diese Vias auch aktive Ebenen queren müssen und so Sperrflächen in den Ebenen aktiver Bauelemente entstehen.

Die Notwendigkeit eines Kompromisses zwischen Rechenzeit und Genauigkeit ist bei der Verdrahtungsvorhersage in 3D-Systemen aufgrund der Zunahme der Problemgröße sehr wichtig. Abhängig von der erforderlichen Genauigkeit wird der Graph der Verdrahtungsressourcen verschieden stark vereinfacht. Bei 2D-Systemen fasst man dazu Verdrahtungsebenen zusammen bzw. wählt ein gröberes Verdrahtungsraster (**Bild 10**). Die erste Vereinfachung führt dazu, dass die Verdrahtungsvorhersage keine Informationen über Vias enthält. Die zweite Vereinfachung widerspiegelt das bereits vorgestellte Grundprinzip der Globalverdrahtung und verringert so die x - und y -Auflösung der Verdrahtungsvorhersage um einen frei wählbaren Faktor.

Werden beide Vereinfachungen maximal ausgeführt, besitzt die resultierende Verdrahtungsvorhersage keinen Bezug mehr zu geometrischen Eigenschaften des Systems (siehe Abschnitt 3.1).

Der Entwurf von 3D-Systemen erfordert eine neue Zwischenstufe der Vereinfachung. Während sich die Abbildung aller vorhandenen Verdrahtungsebenen in nur einer Ebene (2D) beim Entwurf von 2D-Systemen bewährt hat, ist dieses Modell für 3D-Systeme nicht

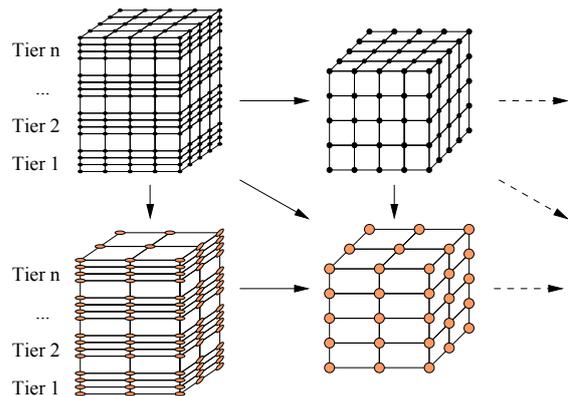


Bild 11 Vereinfachung des Graphen der Verdrahtungsressourcen für 3D-Systeme. Von links nach rechts werden Verdrahtungsebenen innerhalb eines Tiers zusammengefasst, womit ein neuer Zwischenschritt der Vereinfachung entsteht. Die weiterführende Vereinfachung nach rechts ist die gleiche wie in Bild 10. Von oben nach unten werden die Verdrahtungsregionen analog zu Bild 10 zusammengefasst.

anwendbar. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die dabei erfolgende Nichtberücksichtigung der für die Systemeigenschaften relevanten TSV.

Um TSV bei der Verdrahtungsvorhersage zu berücksichtigen, *müssen* Tiers getrennt betrachtet werden. Dazu ist eine neue Zwischenstufe der Vereinfachung des Verdrahtungsgraphen nötig (**Bild 11**). In einem ersten Schritt der Vereinfachungen werden jeweils nur Ebenen des gleichen Tiers zusammengefasst. Erst wenn eine noch gröbere Vereinfachung notwendig ist, fasst man die Verdrahtungsebenen verschiedener Tiers zusammen. Jedoch lassen sich dann TSV nicht mehr separat modellieren, und die somit erzielbare Verdrahtungsvorhersage ist nur eingeschränkt für 3D-Systeme anwendbar.

4.2 3D-Verdrahtungsvorhersage: Beispiel

Das in Abschnitt 3.3 vorgestellte statistische Modell von Lou [14] erlaubt, die Verdrahtung zweidimensional unter Berücksichtigung von Sperrflächen vorherzusagen (**Bild 12**, siehe auch Bild 5).

Wie bereits dargestellt, ist die Verdrahtungsvorhersage mit der Vereinfachung auf nur eine Ebene (2D-Modell der Verdrahtungsressourcen) unzureichend für den Entwurf von 3D-Systemen, da u. a. TSV und andere vertikale Verdrahtungsstrukturen in der Vorhersage zu berücksichtigen sind. Um letzteres zu erreichen, sind die bisherigen Modelle für den 3D-Entwurf durch Berücksichtigung der vertikalen Verdrahtungsressourcen zu erweitern, was nachfolgend am Beispiel von Lou's Modell gezeigt wird.

Eine Einbeziehung der vertikalen Verdrahtungsressourcen erfordert es, neben der Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsdichte für die Verdrahtung in jeder Ebene, auch die Wahrscheinlichkeit für die Verdrahtung in vertikaler Richtung zu beachten. Das so erweiterte Modell ist in **Bild 13** veranschaulicht. Je nach angewandter Vereinfachung des Routinggraphen

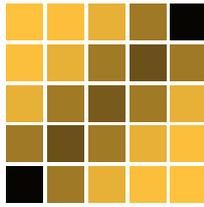


Bild 12 Vorhergesagte 2D-Verdrahtungsdichte für ein Zweipinnetz in einer Ebene nach Lou's statistischem Modell, dargestellt in der Draufsicht (vgl. Darstellung in Bild 5 a) mit einem Pin links unten und dem zweiten Pin rechts oben.

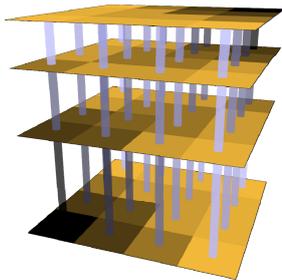


Bild 13 Dreidimensionale Verdrahtungsdichte und Via-Dichte für ein Zweipinnetz in vier Ebenen, vorhergesagt mit dem erweiterten statistischen Modell nach Lou. Je nach Vereinfachungsgrad bezieht sich eine Ebene auf eine Verdrahtungsebene oder auf einen Tier. Die Pins des Netzes liegen links unten bzw. rechts oben. Dunklere Farben zeigen eine höhere erwartete Verdrahtungsdichte an. Die erwartete Via-Dichte ist durch farbige Säulen dargestellt.

(siehe Abschnitt 4.1) bezieht sich eine Ebene der 3D-Verdrahtungsdichtevertelung entweder auf eine einzelne Verdrahtungsebene oder auf die zusammengefassten Verdrahtungsebenen eines Tiers. Ebenfalls zu beachtende Randbedingungen, wie die Einbeziehung von Sperrflächen und unterschiedliche TSV-Dichten im Design, werden in diesem Modell berücksichtigt, indem Verdrahtungswege durch diese Bereiche eine entsprechend geringere Wahrscheinlichkeit haben oder ganz ausgeschlossen sind. Die damit bestimmten Verdrahtungsvorhersagen beinhalten somit sowohl separat ausgewiesene Verdrahtungsdichten für jede Ebene (Tier) als auch die erwarteten Dichten von vertikalen Verbindungen.

5 Zusammenfassung

Die aktuelle Entwicklung von 3D-Systemen und die daraus resultierende dreidimensionale Verdrahtung erfordern neue Ansätze bei der Verdrahtungsvorhersage dieser Strukturen. Diese rühren im Wesentlichen aus den vielfältigen und auch oft neuartigen Randbedingungen her. Insbesondere sind hier das komplexere thermische Design und Sperrflächen, die aufgrund von thermischen Vias und TSV entstehen, zu nennen. Weiterhin stehen die vertikalen Verdrahtungsressourcen nur sehr begrenzt zur Verfügung, die zudem einen großen Einfluss auf die Systemeigenschaften haben. Die Kenntnisse der im Rahmen dieser Arbeit zusammengestellten Methoden der Verdrahtungsvorhersage und der Besonderheiten beim Entwurf von 3D-

Systemen soll es zum einen ermöglichen, eine bestmögliche und effiziente Abschätzung der Verdrahtbarkeit für unterschiedliche Entwurfsschritte zu erzielen. Zum anderen werden detailliert Vorgehensweisen aufgezeigt, wie sich herkömmliche Methoden der Verdrahtungsvorhersage zur Anwendung bei dreidimensionalen Baugruppen erweitern lassen.

Literatur

- [1] Moody, J. ; White, D. R. : Social cohesion and embeddedness : A hierarchical conception of social groups. Eingereicht beim American J. of Sociology, Tech. Rep., 2000. <http://citeseer.ist.psu.edu/482368.html>.
- [2] Kravets, V. N. ; Kudva, P. : Understanding metrics in logic synthesis for routability enhancement. in Proc. of the SLIP, 2003. S. 3–5.
- [3] Kudva, P. ; Sullivan, A. ; Dougherty, W. : Metrics for structural logic synthesis. IEEE/ACM Int. Conf. on CAD, 2002. S. 551–556.
- [4] Kudva, P. ; Sullivan, A. ; Dougherty, W. : Measurements for structural logic synthesis optimizations. IEEE Trans. on CAD of ICs and Systems, Band 22 (2003), Nr. 6, S. 665–674.
- [5] Moody, J. ; White, D. R. : Structural cohesion and embeddedness : A hierarchical concept of social groups. American Sociological Review, Band 68 (2003), Nr. 1, S. 103–127. <http://dx.doi.org/10.2307/3088904>.
- [6] White, D. R. ; Harary, F. : The cohesiveness of blocks in social networks: Node connectivity and conditional density. Sociological Methodology, Band 31 (2001), S. 305–359.
- [7] Arikati, S. R. ; Chaudhuri, S. ; Zaroliagis, C. D. : All-pairs min-cut in sparse networks. J. of Algorithms, Band 29 (1998), Nr. 1, S. 82–110.
- [8] Gomory, R. E. ; Hu, T. C. : Multi-terminal network flows. SIAM J. on Applied Mathematics, Band 9 (1961), Nr. 4, S. 551–570.
- [9] Stoer, M. ; Wagner, F. : A simple min-cut algorithm. J. of the ACM, Band 44 (1997), Nr. 4, S. 585–591.
- [10] White, D. R. ; Newman, M. E. J. : Fast approximation algorithms for finding node-independent paths in networks. Santa Fe Institute, Working Papers, 2001. <http://ideas.repec.org/p/wop/safiw/01-07-035.html>.
- [11] Donath, W. : Placement and average interconnection lengths of computer logic. IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1979. S. 272–277.
- [12] Landman, B. ; Russo R. : On a pin versus block relationship for partitions of logic graphs. IEEE Trans. on Computers, 1971. S. 1469–1479.
- [13] Lienig, J. : Layoutsynthese elektronischer Schaltungen - Grundlegende Algorithmen für die Entwurfsautomatisierung. Springer Verlag Heidelberg, 2006.
- [14] Lou, J. ; Krishnamoorthy, S. ; Sheng, H. S. : Estimating routing congestion using probabilistic analysis. Proc. of the ISPD, 2001. S. 112–117.
- [15] Sham, C. ; Young, E. : Congestion prediction in floorplanning. Proc. of the ASP-DAC, 2005. S. 1107–1110.
- [16] Sham, C. ; Young, E. : Congestion prediction in early stages. Proc. of the SLIP, 2005. S. 91–98.
- [17] Scheffer, L. ; Nequist, E. : Why interconnect prediction doesn't work. Proc. of the SLIP, 2000. S. 139–144.
- [18] Beyne, E. : The rise of the 3rd dimension for system integration. Interconnect Technology Conference, 2006. S. 1–5.
- [19] Davis, W. R. ; Wilson, J. ; Mick, S. ; et. al. : Demystifying 3D Ics : The pros and cons of going vertical. Design & Test of Computers, IEEE, Band 22 (2005), Nr. 6, S. 498–510.
- [20] ESIA ; JEITA ; KSIA ; TSIA ; SIA : International technology roadmap for semiconductors 2007. <http://www.itrs.net/reports.html>.