

# Bewertung der Genauigkeit von Verdrahtungsdichtevorhersagen des Layoutentwurfs

Tilo Meister, Jens Lienig

tilo.meister@ifte.de, jens.lienig@ifte.de

Technische Universität Dresden

## Kurzfassung

Diese Arbeit stellt Vergleichskriterien für Verdrahtungsdichteverteilungen vor. Kennt man eine „ideale“ oder als „ideal angenommene“ Verdrahtungsdichte für ein Layout, so lassen sich damit Verdrahtungsvorhersagen bezüglich ihrer Genauigkeit bewerten. Dies ist für die Layoutsynthese von großer Bedeutung, da gute Verdrahtungsvorhersagen die Grundlage für den Erfolg zahlreicher Optimierungsschritte sind. Der Vorteil der vorgestellten Kriterien ist, dass sie nicht in einen konkreten Entwurfsfluss eingebunden sind und dadurch eine schnelle und allgemeingültige Bewertung der Vorhersagegenauigkeit erlauben.

## 1 Einleitung

Die Layoutsynthese elektronischer Schaltungen ermittelt ausgehend von einer Netzliste und Technologiebeschreibungen eine Geometrie zur Realisierung der Schaltung. Diese Geometrie findet man durch das iterative Bearbeiten zahlreicher Teilschritte. Der letzte Schritt ist typischerweise das Ermitteln einer Verdrahtungsgeometrie. Die Grundlagen für ein gutes Verdrahtungsergebnis werden jedoch bereits in allen Syntheseschritten davor (wie Partitionierung und Platzierung) gelegt. Das Optimierungsziel *Verdrahtbarkeit* ist daher Bestandteil des gesamten Syntheseprozesses.

Der Verdrahtbarkeitswert muss also während zahlreicher Optimierungsschritte jeweils sehr häufig geschätzt werden. Ein exaktes Ermitteln der Verdrahtbarkeit wäre viel zu zeitaufwendig. Je nach Syntheseschritt legt man unterschiedliche Schätzungen zugrunde.

Gilt es, für einen konkreten Syntheseschritt eine neue Schätzmethode zu entwickeln bzw. unter den bekannten die günstigste auszuwählen, dann ist es nötig die Vorhersagegenauigkeit der Schätzmethoden objektiv zu bewerten. Typischerweise geschieht dies, indem nacheinander verschiedene Schätzmethoden in einen kompletten Entwurfsfluss eingebunden werden. Schließlich bewertet man die dabei entstandenen unterschiedlichen Schaltungsgeometrien und identifiziert entsprechend die zugehörige, vermeintlich beste Schätzmethode. Dieses Vorgehen ist sehr aufwendig. Ferner erlaubt es nicht die tatsächliche Bewertung einer Schätzmethode, sondern nur deren Qualität in Kombination mit zahlreichen anderen Algorithmen, die Bestandteil des betrachteten Entwurfsflusses sind. Nachteilig dabei ist, dass sich beispielsweise mögliche Schwächen eines Schätzers mit Eigenheiten des verwendeten Verdrahtungsalgorithmus überlagern können, sodass die endgültigen Schaltungsgeometrien keine Ursachenforschung für auftretende Mängel und damit kein tiefgreifendes Verstehen der Zusammenhänge mehr erlauben.

Es ist die Meinung der Autoren, dass Schätzmethoden als solche, bezüglich ihrer Vorhersagegenauigkeit, zu bewerten sind. Nur eine möglichst genaue Vorhersagemethode sollte die Grundlage für einen Prozess der Verdrahtbarkeitsoptimierung sein. Im Folgenden werden Analysen vorgestellt, um eine objektive Bewertung der Vorhersagegenauigkeit durchzuführen. Voraussetzung dafür sind zwei Verdrahtungsdichten, eine geschätzte und eine tatsächliche bzw. eine als *ideal angenommene* Verdrahtungsdichte eines Layouts.

## 2 Verdrahtbarkeitsvorhersage

In der Layoutsynthese setzt man verschiedene Kriterien zur Verdrahtbarkeitsvorhersage ein. Das prominenteste Bewertungskriterium ist die geschätzte Verdrahtungslänge. Die vorliegende Arbeit bezieht sich hingegen auf die Verdrahtbarkeitsvorhersage anhand von geschätzten Verdrahtungsdichteverteilungen, also eine Schätzung der erwarteten Menge an Verdrahtung in jeder Verdrahtungsregion (Bin) eines Layouts. Eine solche Verdrahtungsdichteverteilung kann man aus dem endgültigen Feinverdrahtungsergebnis berechnen oder beispielsweise aus

- einer automatisch ermittelten Feinverdrahtungsgeometrie,
- einer Globalverdrahtungsgeometrie,
- den probabilistischen Verdrahtungsdichteverteilungen einzelner Netze oder
- Pindichten

schätzen. Für die verschiedenen Layoutsyntheseschritte ist jeweils eine unterschiedliche dieser Klassen von Schätzmethoden am günstigsten, da sie sich in ihrem Abstraktionsniveau und ihrer Rechengeschwindigkeit unterscheiden. Für jede dieser Klassen gibt es wiederum verschiedene zugehörige Methoden, die es, wie bereits gesagt, bezüglich ihrer Vorhersagegenauigkeit objektiv zu unterscheiden gilt.

## 3 Definitionen

Tatsächliche Verdrahtungsgeometrien realisiert man auf mehreren Verdrahtungsebenen (Metallebenen, -lagen). Die Verdrahtungsdichte ließe sich also in jeder dieser Ebenen getrennt betrachten. Alle hier folgenden Betrachtungen differenzieren die verschiedenen Verdrahtungsebenen jedoch nicht. Dies ist eine frei gewählte Einschränkung zum Vereinfachen der folgenden Darstellungen. Die Methoden sind analog für Betrachtungen der Verdrahtungsdichte in mehreren Ebenen geeignet. Gleichmaßen differenziert man häufig auch in der praktischen Anwendung die verschiedenen Verdrahtungsebenen nicht, um den Rechenaufwand, auf Kosten der Vorhersagegenauigkeit, zu reduzieren.

Es genügen hier also zwei Koordinaten  $(X, Y)$ , um eine Position in der Layoutfläche  $A$  zu spezifizieren. Diese Fläche unterteilt man, zur weiteren Vereinfachung, vollständig in  $m \times n$  rechteckige Regionen (*Bins*), denen jeweils eine Koordinate  $(x, y)$  zugeordnet ist. Dabei ist  $x = 1 \dots m$  die *Spalte* und  $y = 1 \dots n$  die *Zeile* eines Bins. Alle  $n$  Bins einer Spalte  $i$  haben die gleiche Breite  $b_{(i,1)} = b_{(i,2)} = \dots = b_{(i,n)}$ . Analog ist die Höhe  $h_{(x,j)}$  aller  $m$  Bins der Zeile  $j$  gleich.

In diesem Artikel wird die tatsächliche Verdrahtungsdichteverteilung  $\mathcal{R}(i, j)$  eines Bins  $(i, j)$  in tatsächlich untergebrachter Verdrahtungsfläche (Verdrahtungslänge  $\times$  Verdrahtungsbreite) pro Binfläche ( $b_{(i,j)} \times h_{(i,j)}$ ) angegeben. Dem äquivalent ist die Angabe in Anzahl tatsächlich verwendeter Verdrahtungsspuren pro Anzahl vorhandener Verdrahtungsspuren. Die Verdrahtungsdichte ist also einheitenlos  $[\mathcal{R}(i, j)] = 1$ . Der Mittelwert  $\bar{\mathcal{R}}$  der tatsächlichen Verdrahtungsdichteverteilung ist ihr arithmetisches Mittel  $\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \mathcal{R}(i, j)$ . Die geschätzte Verdrahtungsdichteverteilung

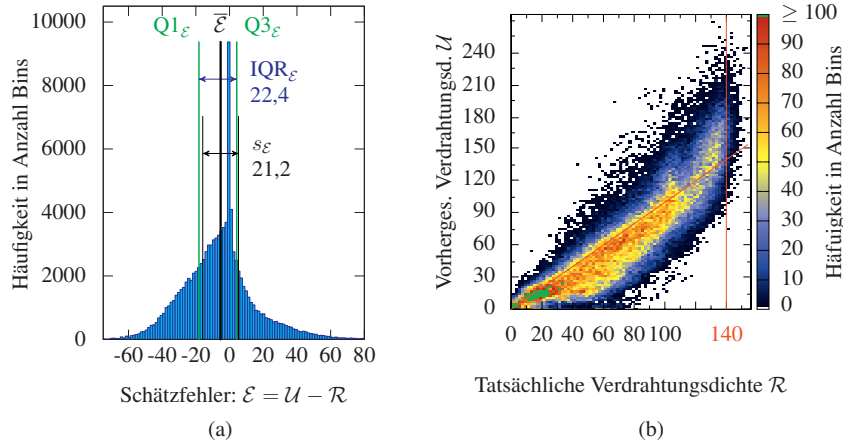
$\mathcal{U}(i, j)$  und ihr Mittelwert  $\bar{\mathcal{U}}$  werden entsprechend berechnet und angegeben. Der Differenz der geschätzten und der tatsächlichen Verdrahtungsdichte wird als Schätzfehler  $\mathcal{E}(i, j) = \mathcal{U}(i, j) - \mathcal{R}(i, j)$  bezeichnet.

## 4 Bewerten der Genauigkeit einer Vorhersage

Ist die Genauigkeit einer Verdrahtungsdichtevorhersage zu bestimmen, müssen zwei Verteilungen bekannt sein. Eine „geschätzte“ Verdrahtungsdichteverteilung  $\mathcal{U}(i, j)$  und eine „tatsächliche“  $\mathcal{R}(i, j)$ . Die tatsächliche wird als ideal angenommen, und die geschätzte soll mit dieser so genau wie möglich korrelieren. Beispielsweise soll eine probabilistisch bestimmte Verdrahtungsdichte, die Verdrahtungsdichte eines aufwendig manuell optimierten Feinverdrahtungsergebnisses so genau wie möglich abbilden. Im Allgemeinen werden jedoch schlicht zwei beliebige Verdrahtungsdichteverteilungen (auch zwei geschätzte!) auf ihre Korrelation hin bewertet. Die dazu eingesetzten Kriterien sollen objektiv, robust, repräsentativ und relevant sein. Grundlage der folgenden Methoden, die solche Kriterien bestimmen, ist die Interpretation sowohl der beiden Verdrahtungsdichteverteilungen  $\mathcal{R}(i, j)$  und  $\mathcal{U}(i, j)$  als auch deren Differenz  $\mathcal{E}(i, j)$  als Zufallsvariablen.

### 4.1 Bewertung anhand des Schätzfehlers $\mathcal{E}$

Eigenschaften der Verteilung der Werte des Schätzfehlers eignen sich gut, um die Vorhersagegenauigkeit objektiv einzuschätzen. Die Verteilung eines konkreten Beispiels stellt Bild 1 a dar. Das zugrunde liegende Layout ist der Schaltkreis *Adaptec1* der ISPD-Globalverdrahtungsbenchmarksuite [1]. Die geschätzte Verdrahtungsdichte wurde probabilistisch ermittelt [2]. Die tatsächliche Verdrahtungsdichte wurde anhand des Ergebnisses des Globalverdrahters *NTHU-Rv2* [3] bestimmt.



**Bild 1:** Verteilung des Schätzfehlers  $\mathcal{E}$  (a) und Verteilung der geschätzten Verdrahtungsdichte  $\mathcal{U}$  über der realen Verdrahtungsdichte  $\mathcal{R}$  in allen Bins (b) für den Benchmark *Adaptect1*. Die Kenngrößen  $IQR_{\mathcal{E}}$ ,  $\bar{\mathcal{E}}$  und  $s_{\mathcal{E}}$  zum Bewerten der Vorhersagegenauigkeit sind in die Verteilung eingetragen. Die Verteilung ist für das Globalverdrahtungsergebnis von *NTHU-Rv2* dargestellt. Die Verdrahtungsdichte  $\mathcal{U}$  wurde wie in Arbeit [2] beschrieben geschätzt.

Der mittlere Schätzfehler 
$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\mathcal{U}(i,j) - \mathcal{R}(i,j)] \quad (1)$$

ist notwendig, um die weiteren Bewertungskriterien zu bestimmen. Er sagt nur sehr wenig über die Vorhersagegenauigkeit aus, denn er lässt sich durch Kalibrierung der Vorhersagemethode stets auf seinen Idealwert Null verbessern. Der konkrete Fehler  $\mathcal{E}(i,j)$  in einem Bin  $(i,j)$  lässt sich anhand des mittleren Schätzfehlers gar nicht beurteilen, denn die Werte überschätzter und unterschätzter Bins kompensieren sich.

Der mittlere absolute Schätzfehler 
$$|\bar{\mathcal{E}}| = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\mathcal{U}(i,j) - \mathcal{R}(i,j)| \quad (2)$$

beinhaltet, gegenüber dem mittleren Schätzfehler  $\mathcal{E}$ , eine Aussagekraft über die Abweichung der Schätzung vom tatsächlichen Wert. Er sollte so klein wie möglich sein.

Die geschätzte Standardabweichung 
$$s_{\mathcal{E}} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n - 1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\mathcal{E}(i,j) - \bar{\mathcal{E}}]^2} \quad (3)$$

liefert ähnliche Aussagen. Extrem große Schätzfehler in einzelnen Bins (*Ausreißer*) fließen jedoch in die Standardabweichung stärker ein, als beim mittleren absoluten Schätzfehler  $|\bar{\mathcal{E}}|$ . Sie sollte so klein wie möglich sein.

Sind Ausreißer während des Bewertens der Abweichung vollkommen zu ignorieren, dann ist der Interquartilabstand

$$IQR_{\mathcal{E}} = Q1_{\mathcal{E}} - Q3_{\mathcal{E}} \quad (4)$$

einzusetzen. Dabei ist  $Q1_{\mathcal{E}}$  der Schätzfehler, sodass 25% der Bins einen kleineren Schätzfehler aufweisen, und  $Q3_{\mathcal{E}}$  der Schätzfehler, sodass 25% der Bins einen größeren Schätzfehler aufweisen. Der Interquartilabstand ist also ein sehr robustes Kriterium, denn es werden nur die mittleren

50% der Werte betrachtet. Er sollte so klein wie möglich sein. In Verbindung mit der geschätzten Standardabweichung ermöglicht er das Bewerten der Anzahl der Ausreißer, indem man den Formparameter

$$\text{Form}_{\mathcal{E}} = \frac{IQR_{\mathcal{E}}}{s_{\mathcal{E}}} \quad (5)$$

bestimmt. Er ist umso größer, je weniger Ausreißer es gibt.

## 4.2 Bewertung anhand der Korrelation zwischen $\mathcal{U}$ und $\mathcal{R}$

Das aussagekräftigste Bewertungskriterium für die Vorhersagegenauigkeit ist die Korrelation zwischen der geschätzten und der tatsächlichen Verdrahtungsdichte. Sie kann unter Annahme einer linearen Korrelation als Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson [4]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[\mathcal{U}(i,j) - \bar{\mathcal{U}}] \cdot [\mathcal{R}(i,j) - \bar{\mathcal{R}}]\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\mathcal{U}(i,j) - \bar{\mathcal{U}}\}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\mathcal{R}(i,j) - \bar{\mathcal{R}}\}^2}} \quad (6)$$

oder unter Annahme einer beliebigen Korrelation als Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman [4]

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{[\text{rg}(\mathcal{U}(i,j)) - \overline{\text{rg}\mathcal{U}}] \cdot [\text{rg}(\mathcal{R}(i,j)) - \overline{\text{rg}\mathcal{R}}]\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\text{rg}(\mathcal{U}(i,j)) - \overline{\text{rg}\mathcal{U}}\}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\text{rg}(\mathcal{R}(i,j)) - \overline{\text{rg}\mathcal{R}}\}^2}} \quad (7)$$

bestimmt werden. Dabei ist  $\text{rg}(\mathcal{U}(i,j))$  der Rang von  $\mathcal{U}(i,j)$  und  $\overline{\text{rg}\mathcal{U}}$  der Mittelwert der Ränge von  $\mathcal{U}$ . Der Rang ergibt sich, indem man die sortierten Werte  $\mathcal{U}(i,j)$  durchnummeriert (Platznummern vergibt), und anschließend für identische Werte  $\mathcal{U}(i,j)$  den Mittelwert der zugeordneten Platznummern bildet.

Beide Korrelationskoeffizienten nehmen Werte im Bereich  $[-1 \dots 1]$  an. Der Wert Null heißt, dass die beiden Zufallsvariablen unkorreliert sind, die Vorhersage also vollkommen unbrauchbar ist. Die Werte 1 bzw.  $-1$  kennzeichnen eine perfekte Korrelation der geschätzten und der tatsächlichen Dichte. Wobei  $|r| = 1$  eine perfekte *lineare* Korrelation und  $|r_s| = 1$  eine perfekte Korrelation nach einer *beliebigen monotonen Funktion* kennzeichnet. Der Betrag des Korrelationskoeffizienten sollte also so groß wie möglich sein.

Das Bestimmen des Korrelationskoeffizienten beruht auf empirischen Daten einer endlichen Stichprobe, also auf einer endlichen Anzahl von Kombinationen aus geschätzter und tatsächlicher Verdrahtungsdichte. Der so bestimmte Koeffizient ist also nur eine Schätzung des wirklichen Korrelationskoeffizienten. Die Varianz  $\sigma_r^2$  dieser Schätzung lässt sich anhand von

$$\sigma_r^2 = \frac{(1 - r^2)^2}{m \cdot n} \quad (8)$$

abschätzen.

Da der Korrelationskoeffizient eine Schätzung ist, gilt es außerdem zu überprüfen, ob die ermittelten Werte  $r_1$  und  $r_2$  zweier verschiedener Verdrahtungsdichteschätzungen  $(\mathcal{U}_1, \mathcal{R}_1)$  und  $(\mathcal{U}_2, \mathcal{R}_2)$  des Umfangs  $m_1 \cdot n_1$  bzw.  $m_2 \cdot n_2$  sich signifikant unterscheiden oder ob die wirklichen Korrelationen beider gleich sein könnten. Dies lässt sich mit der z-Transformation nach Fisher [5, 6]

$$z = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left[ \ln \left( \frac{1+r_1}{1-r_1} \right) - \ln \left( \frac{1+r_2}{1-r_2} \right) \right]}{\sqrt{\frac{1}{m_1 \cdot n_1 - 3} + \frac{1}{m_2 \cdot n_2 - 3}}} \quad (9)$$

überprüfen. Gibt man sich für diesen Test ein bestimmtes Signifikanzniveau  $\alpha$  vor, dann erhält man die Grenzwerte für  $z$  aus den Quantilen der Standardnormalverteilung. Wählt man beispielsweise

**Tabelle 1:** Vorhersagegenauigkeit probabilistischer Verdrahtungsdichteschätzer. Bewertungskriterien, die mit steigender Genauigkeit wachsen, sind mit ‘↑’, Kriterien, die mit steigender Genauigkeit kleiner werden, mit ‘↓’ gekennzeichnet.

Schätzer	Literaturstelle	$ \mathcal{E} $ ↓	$s_{\mathcal{E}}$ ↓	$\text{IQR}_{\mathcal{E}}$ ↓	$\text{Form}_{\mathcal{E}}$ ↑	$r$ ↑	$r_s$ ↑
Gleichverteilung	[7]	12,49	19,43	13,52	0,609	0,928	0,909
Lou	[8]	14,02	21,45	15,66	0,633	0,922	0,904
Z-Verdrahtung	[9]	13,77	22,96	14,15	0,556	0,898	0,909
Westra	[9]	14,46	24,01	14,78	0,555	0,887	0,903
L-Verdrahtung	[9]	14,84	24,56	15,18	0,558	0,883	0,911
Sham	[10]	12,78	19,08	14,26	0,673	0,930	0,916
Wavefront	[2]	12,44	18,22	14,45	0,716	0,936	0,913

ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 99,73\%$ , dass beide Stichproben aus tatsächlich unterschiedlich stark korrelierenden Gesamtheiten entnommen sind, dann muss der Betrag der Testprüfgröße  $|z|$  größer als 3 sein.

Das zweidimensionale Histogramm in Bild 1 b veranschaulicht die Auswertung anhand der Korrelation. Dargestellt ist die Anzahl (Häufigkeit) der Bins mit einer bestimmten Kombination aus tatsächlicher und geschätzter Verdrahtungsdichte. Die diagonale Linie kennzeichnet  $\mathcal{U} = \mathcal{R}$ , also einen Schätzfehler  $\mathcal{E}$  von Null. Wäre die Vorhersage  $\mathcal{U}$  perfekt, dann lägen alle Datenpunkte auf dieser Geraden. Die senkrechte Gerade  $\mathcal{R} = 140$  markiert die verfügbaren Verdrahtungsressourcen eines Bins des Benchmarks *Adaptecl*. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt für dieses Beispiel  $r = 0,9011$ , die Korrelation nach Spearman  $r_s = 0,9178$ .

### 4.3 Zusammenfassung

Eine Verdrahtungsdichtevorhersage ist dann gut, wenn ihr Korrelationskoeffizient  $r$  möglichst groß und gleichzeitig der mittlere absolute Schätzfehler  $|\mathcal{E}|$  so gering wie möglich ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass für einen einzelnen Bin  $(i,j)$  die Schätzung einen großen Fehler  $\mathcal{E}(i,j)$  aufweist, lässt sich anhand der Kriterien  $s_{\mathcal{E}}$  und  $\text{IQR}_{\mathcal{E}}$  bzw. deren Quotient  $\text{Form}_{\mathcal{E}}$  beurteilen. Unterscheiden sich der Rangkorrelationskoeffizient  $r_s$  und der Korrelationskoeffizient  $r$  für einen Schätzer deutlich, weist das auf einen nicht linearen Zusammenhang zwischen geschätzter und tatsächlicher Verdrahtungsdichte hin.

## 5 Ergebnisse

Die oben beschriebenen Kriterien zum Bewerten der Vorhersagegenauigkeit von Verdrahtungsdichteschätzern sollen nun an einem Beispiel illustriert werden. Dazu werden die 16 Schaltkreise der ISPD-Globalverdrahtungsbenchmarksuite [1] verwendet. Die tatsächliche, als ideal angenommene Verdrahtungsdichte wird jeweils aus den Ergebnissen 12 unterschiedlicher Globalverdrahter berechnet. Die geschätzte Verdrahtungsdichte wird jeweils durch sieben verschiedene probabilistische Schätzer ermittelt. Für die Auswertung werden für jeden der 16 Schaltkreise alle Paarungen aus tatsächlicher und geschätzter Verdrahtungsdichte anhand der oben beschriebenen Kriterien analysiert. Die gemittelten Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Sie bedeuten, dass der Schätzer *Wavefront* für die 16 untersuchten Schaltkreise und die 12 verwendeten Globalverdrahter im Mittel die beste Vorhersagegenauigkeit bietet, dicht gefolgt von den Schätzern *Sham* und *Gleichverteilung*.

Detailliertere Analysen der Daten erlauben, über diese allgemeine Aussage hinaus, auch das Bewerten des „Zusammenspiels“ einer Vorhersagemethode mit einem bestimmten Globalverdrahter. Auf diese Weise ließe sich für einen vorgegebenen Globalverdrahtungsalgorithmus die günstigste probabilistische Vorhersagemethode identifiziert. Die Untersuchungen haben beispielsweise

auch gezeigt, dass die probabilistische Verdrahtungsvorhersage in Regionen, die besonders stark ausgelastet sind, generell eine schlechtere Genauigkeit aufweist als in Regionen, die nicht ausgelastet sind.

Der Benchmark *Adaptecl*, der die Datengrundlage für Bild 1 liefert, ist in 104.976 Bins aufgeteilt. Es liegen also genauso viele  $(\mathcal{U}, \mathcal{R})$ -Wertepaare vor, um die Korrelation zwischen der tatsächlichen und der geschätzten Verdrahtungsdichte nach Gleichungen (6) und (7) zu approximieren. Aus Gleichung (9) und einem vorgegebenen Signifikanzniveau von  $\alpha = 99,73\%$  folgt, dass sich zwei Korrelationskoeffizienten signifikant unterscheiden, wenn sie sich um wenigstens  $1,7959 \cdot 10^{-3}$  unterscheiden. Angenommen der Korrelationskoeffizient betragt  $r = 0,90$ , dann entspricht das einem Mindestunterschied von 0,20 %. Die in Tabelle 1 angegebenen Korrelationskoeffizienten  $r$  unterscheiden sich also alle signifikant.

## 6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Vergleichskriterien für eine geschätzte und eine tatsächliche Verdrahtungsdichteverteilung ermöglichen den objektiven Vergleich verschiedener Schätzmethoden. Durch sie lässt sich für einen konkreten Layoutsyntheseschritt der günstigste Schätzer identifizieren. Die Bewertung der Schätzer anhand der hier erläuterten Kriterien hat den Vorteil, dass sie nicht in einen konkreten Entwurfsfluss eingebunden sind. Dadurch ist die Bewertung deutlich schneller, kann also in der gleichen Zeit auf deutlich mehr Layouts angewendet werden. Ferner haben die speziellen Eigenschaften eines sonst notwendigen Entwurfsflusses keinen Einfluss auf das Bewertungsergebnis. Die hier vorgestellte Bewertung der Schätzmethoden ist daher allgemeingültig.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die vorgestellten Analysen auch generelle Zusammenhänge der Verdrahtungsvorhersage aufdecken. Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass bestimmte Vorhersagemethoden nicht gleich gut für ausgelastete und nicht ausgelastete Verdrahtungsregionen geeignet sind.

## Literatur

- [1] NAM, Gi-Joon ; SZE, Cliff ; YILDIZ, Mehmet: The ISPD global routing benchmark suite. In: *Proceedings of the 2008 international symposium on Physical design*. New York, NY, USA : ACM, 2008. – ISBN 978-1-60558-048-7, S. 156–159
- [2] MEISTER, Tilo ; LIENIG, Jens ; THOMKE, Gisbert: Interface Optimization for Improved Routability in Chip-Package-Board Co-Design. In: *System Level Interconnect Prediction (SLIP), 2011 13th International Workshop on*, 2011. – ISBN 978-1-4577-1240-1, S. 1–8
- [3] CHANG, Yen-Jung ; LEE, Yu-Ting ; GAO, Jih-Rong ; WU, Pei-Ci ; WANG, Ting-Chi: NTHU-Route 2.0: A Robust Global Router for Modern Designs. In: *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on* 29 (2010), S. 1931–1944. – ISSN 0278-0070
- [4] ZIEGLER, M. ; BÜHNER, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Pearson, 2009. – ISBN 9783827372741
- [5] FISHER, R. A.: Frequency Distribution of the Values of the Correlation Coefficient in Samples from an Indefinitely Large Population. In: *Biometrika* 10 (1915), Nr. 4, S. 507–521. – ISSN 00063444
- [6] DÜCK, W. ; BLIEFERNICH, M.: *Operationsforschung. Mathematische Grundlagen, Methoden und Modelle*. Berlin : Dt. Verl. der Wiss., 1972
- [7] MEISTER, Tilo ; LIENIG, Jens: Neue Herausforderungen an die Verdrahtungsvorhersage beim 3D-Layoutentwurf. In: *Zuverlässigkeit und Entwurf* Bd. 61, VDE Verlag, 2009 (GMM-Fachbericht). – ISBN 978-3-800-73178-7, S. 99–106
- [8] LOU, Jinan ; THAKUR, S. ; KRISHNAMOORTHY, S. ; SHENG, H.S.: Estimating routing congestion using probabilistic analysis. In: *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on* 21 (2002), Nr. 1, S. 32–41. – ISSN 0278-0070
- [9] WESTRA, Jurjen ; BARTELS, Chris ; GROENEVELD, Patrick: Probabilistic congestion prediction. In: *ISPD '04: Proceedings of the 2004 international symposium on Physical design*, ACM, 2004. – ISBN 1-58113-817-2, S. 204–209
- [10] SHAM, Chiu-wing ; YOUNG, Evangeline F. Y.: Congestion prediction in early stages. In: *SLIP '05: Proceedings of the 2005 international workshop on System level interconnect prediction*, ACM, 2005. – ISBN 1-59593-033-7, S. 91–98