

Reale FPGA-Router: PathFinder/VPR

Andreas Koch
FG Eingebettete Systeme
und ihre Anwendungen
TU Darmstadt

- Problem
- Ideen
- Modellierung
- Algorithmus
- Details
- Verbesserungsmöglichkeiten

- Verdrahtung auf FPGAs
- Begrenzte Anzahl von Ressourcen
 - Verbindungssegmente
- Feste Kanalbreite
 - Unterschied zu vielen ASICs
- Verdrahtbarkeit ausschlaggebend
 - Geschwindigkeit zweitrangig

- Berücksichtige Verdrahtbarkeit
 - Bei Lösung des gesamten Verdrahtungsproblems
- Bestimme
 - Nachfrage nach Ressourcen
 - ◆ Metallsegmente, Pins, etc.
- Nachfrage bestimmt Preise
 - Verschiedene „Verbraucher“ akzeptieren unterschiedliche Preise
 - ◆ „Verbraucher“ = Netze
 - „Billige“ Lösungen haben Nachteile
 - ◆ Sind z.B. langsamer
- Versuche Gesamtbedarf zu decken

- **Verdrahte jedes Netz für sich alleine**
 - Mit den aktuellen Ressourcenkosten
 - Optimal
 - ◆ ... für gegebenen Algorithmus
 - Ignoriere Ressourcenbegrenzungen
- **Zähle Mehrfachbelegungen**
- **Grundlage für Nachfrageberechnung**

- **Solange Mehrfachbelegungen ...**
 - Erhöhe Kosten für stark nachgefragte Ressourcen
 - Verwerfe gesamte Verdrahtung
 - Verdrahte nochmal mit den neuen Kosten
- **Sollte nach 30-45 Iterationen konvergieren**

■ Pathfinder

„A Negotiation-Based Performance-Driven Router for FPGAs“

- Larry McMurchie, Carl Ebeling
- Paper auf FPGA 1995

■ Später verbessert von Swartz, Betz und Rose

„A Fast Routability-Driven Router for FPGAs“

- Paper auf FPGA 1998

■ Details in Buch 1999

„Architecture and CAD for Deep-Submicron FPGAs“

■ Signal Router

- Verdrahtet einzelne Netze
- Maze Router (Lee)
 - ◆ Aber Verbesserungen möglich

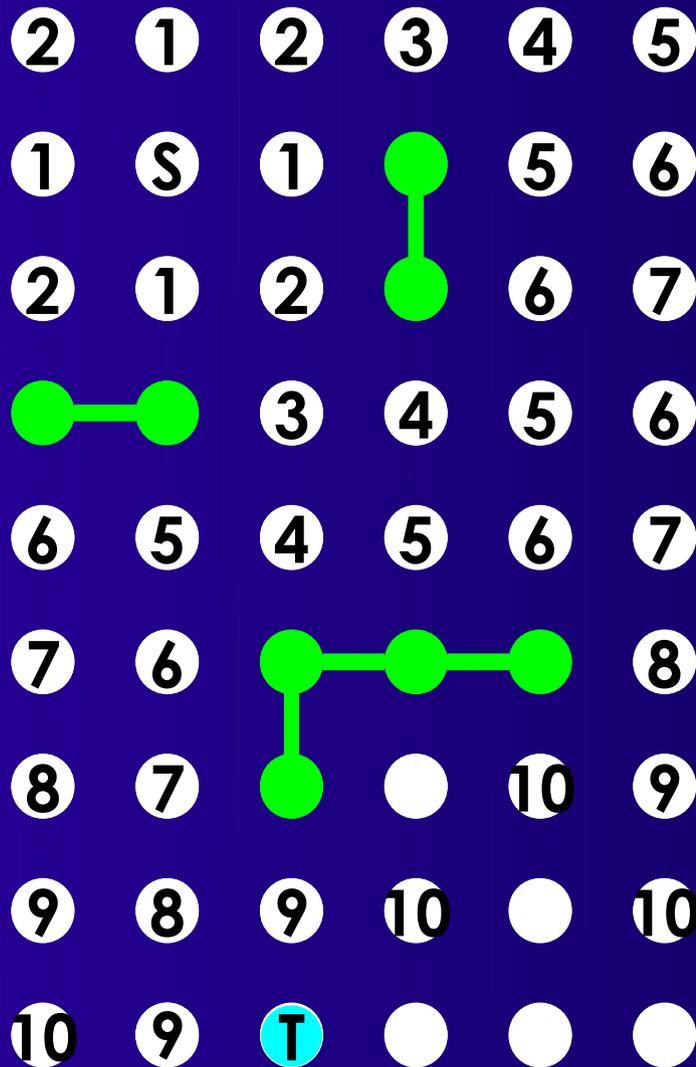
■ Global Router

- Verdrahtet gesamte Schaltung

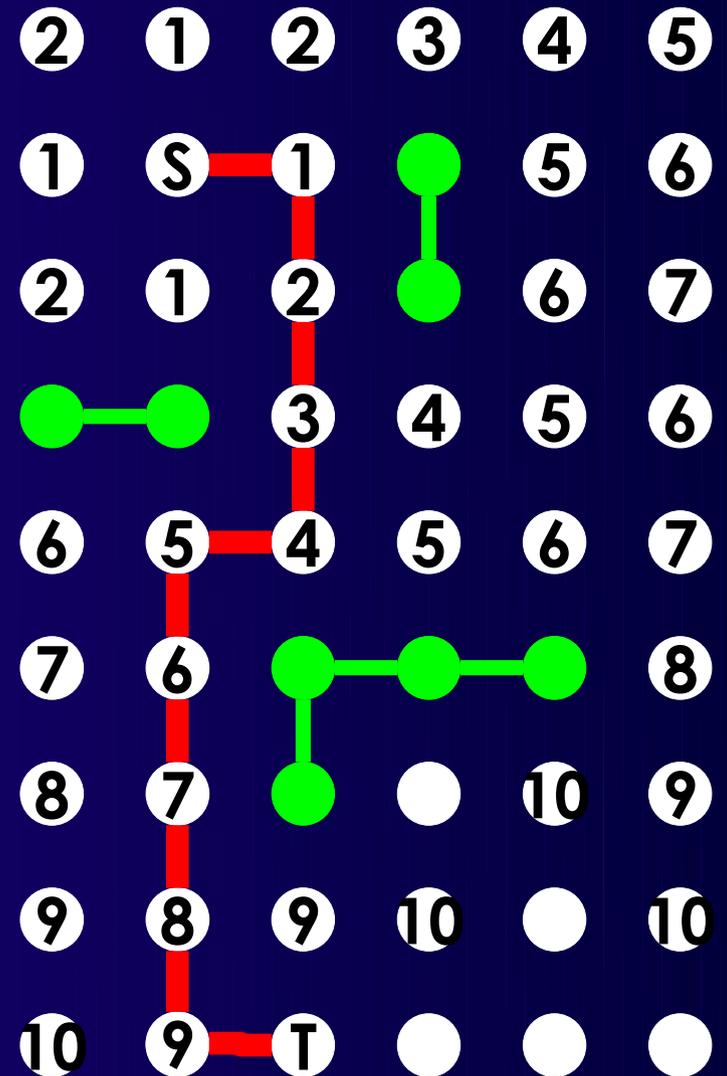
```
globalrouter() {  
    count = 0;  
    while (sharedresources() && count < limit) {  
        foreach (n in Nets)  
            signalrouter(n);  
        count++;  
    }  
    if (count == limit)  
        return „unroutable“  
}
```

Maze Router

Wellenausbreitung



Pfadrückverfolgung



Vorgehen und Kosten

■ Beim Maze-Router

- Breitensuche
 - ◆ Wellenfront
- Kosten: Manhattan-Distanz
 - ◆ $D = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$
- Kosten nur bei Rückverfolgung berücksichtigt
 - ◆ Nicht bei Wellenausbreitung
 - ❖ In alle Richtungen

■ Variation für Signal Router

- Hohe Nachfrage verursacht hohe Kosten
- Bevorzugt in billige Richtungen ausbreiten
 - ◆ Später Verfeinerung
 - ❖ Zeitkritische Netze dürfen höhere Kosten verursachen

Datenstrukturen

- Ausbreitung nicht geometrisch auf Fläche
- Sondern auf Graph von Routing-Ressourcen
 - Routing Resource Graph (RRG)
- RtgRsrc
 - Einzelne Routing-Ressource
 - Z.B. Segment und CLB-Pin
 - Wichtig
 - ◆ Konkreter Pin, nicht nur logisches Terminal
- RtgRsrc sind Knoten im RRG
- Kanten: Mögliche Verbindungen dazwischen
 - Später genauer ...

Signal Router 1

```
Tree<RtgRsrc>
signalrouter(Net n) {
    Tree<RtgRsrc> RT; // Gerade konstruiertes Routing für Netz n
    RtgRsrc i, j, v = nil, w;
    PriorityQueue<int,RtgRsrc> PQ;
    HashMap<RtgRsrc,int> PathCost; // Wellenausbreitung

    i = n.source();
    RT.add(i, ()); // Quelle ist Bestandteil der Verdrahtung
    PathCost[*] = +Inf; // Zunächst alles unerreichbar
    PathCost[i] = 0; // Kosten von Quelle zu Quelle sind 0

    foreach (SinkTerminal j in n.sinks()) {
        /* route Verbindung zur Senke j */
    };

    return (RT);
}
```

Signal Router 2

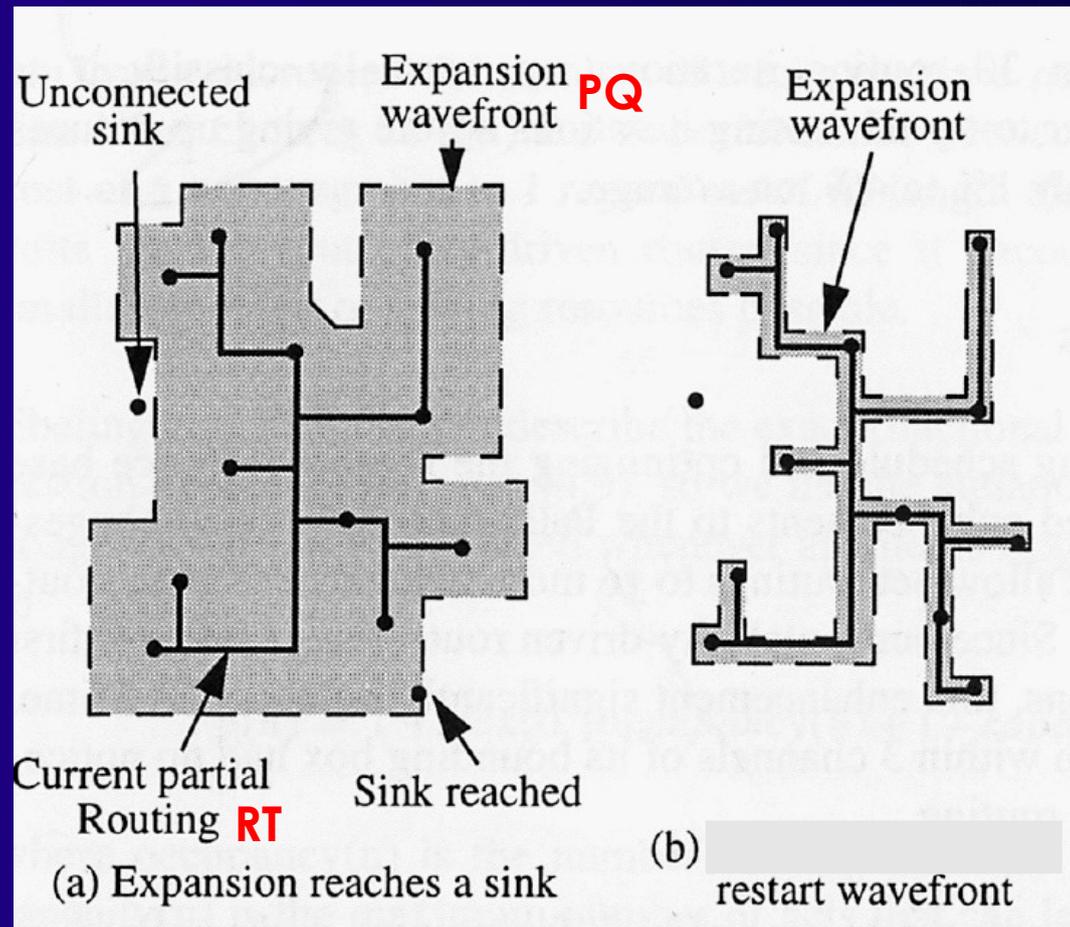
```
foreach (SinkTerminal j in n.sinks) {  
    PQ.clear(); Ganze bisherige Route ist Ausgangs„punkt“  
    foreach (v in RT.nodes())  
        PQ.add(0, v)  
    do { Kostenbasierte Wellenausbreitung  
        v = PQ.removeLowestCostNode();  
        if (v != j)  
            foreach (w in v.neighbors()) { /* Kosten ≠ Distanz ! */  
                if (PathCost[w] > PathCost[v] + w.cost()) {  
                    PathCost[w] = PathCost[v] + w.cost();  
                    PQ.add(PathCost[w], w);  
                }  
            }  
        } while (v != j)  
  
        while (!(v in RT.nodes())) { Pfadrückverfolgung  
            w = v.findCheapestNeighbor(PathCost);  
            RT.add(v, (w, v));  
            v.updateCost(); /* Rsrc. jetzt benutzt, für Nachfolger teurer */  
            v = w;  
        }  
    }  
}
```

Signal Router Details 1

- Verdrahtungsressourcen sind persistent
 - Z.B. Globale Variablen
- `v.cost()` über alle Netze berechnet
 - Mehrere Aufrufe von Signal Router
 - Auch mehrere Iteration vom Global Router (später!)
- `v.updateCost()` aktualisiert die Daten
- `v.neighbors()` definiert Verdrahtungsarch.
 - Routing Resource Graph
 - Sinnvolle Begrenzung:
 - ◆ Nicht mehr als 3 Kanäle ausserhalb des umschliessenden Rechtecks suchen
 - ◆ Verkleinert Suchraum
 - ❖ Bei nur minimaler Qualitätsminderung

Signal Router Details 2

■ Pfadrückverfolgung und Anschluss



Verdrahtbarkeit

- Fließt via Kostenfunktion $v.cost()$ ein

$$c_v = b_v \cdot p_v$$

- Idee

- Basiskosten b_v eines Knotens v
 - ◆ Zunächst annehmen $b_v = 1$ (wird später verfeinert)

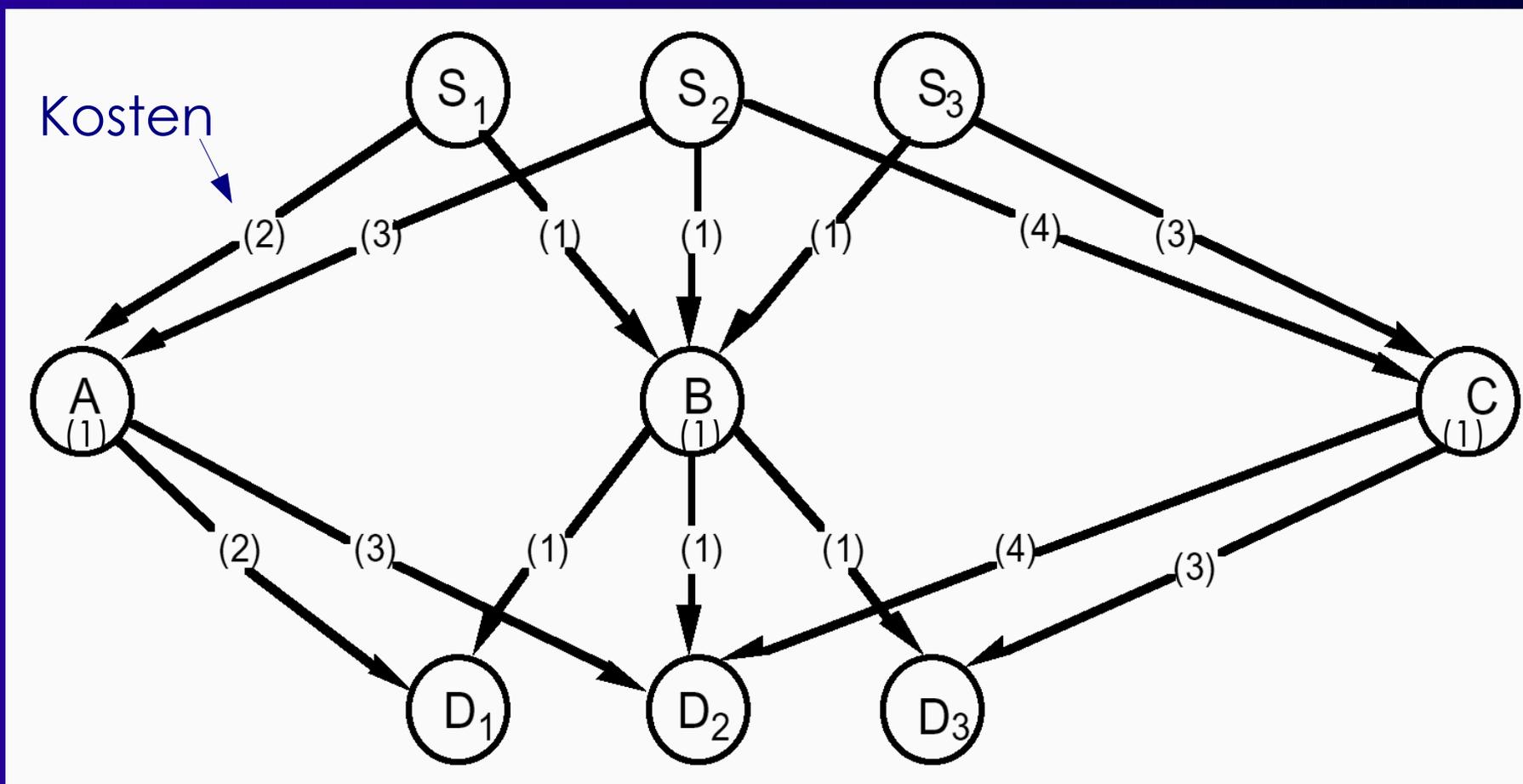
- Verteuerungsfaktor p_v (penalty factor)

- ◆ Aktuelle Kosten für v : Erfasst hohe Nachfrage
- ◆ Beginnt klein, wächst im Laufe der Zeit an

$$p(v) = 1 + \max(0, [\text{occupancy}(v) + 1 - \text{capacity}(v)] \cdot p_{fac})$$

- ◆ $\text{Occupancy}(v)$: Belegungsanzahl der Ressource v
- ◆ $\text{Capacity}(v)$: Belegungskapazität der -"-
- ◆ $p_{fac0} = 0.5$, $p'_{fac} = 2 p_{fac}$ nach Iteration vom Global Router
- ◆ Bei jeder Netzänderung $\text{occupancy}(v)$ aktualisieren
 - ❖ **Passiert in $v.updateCost$**

Beispiel p_v



Maze Routing Reihenfolge: 1,2,3 = 17 2,1,3=15 3,2,1=Fehlschlag

Alternative: Pathfinder-Algorithmus

1. Iteration Global Router: B dreifach belegt, Kosten v.cost() merken

M. Iteration Global Router: 1 nun über A billiger, Kosten merken

N. Iteration Global Router: 3 nun über C billiger, keine Überbelegung mehr

Alg. *globalrouter*: 1. Versuch

```
globalrouter(Set<Nets> N) {
  HashMap<Net,Tree<RtgRsrc>> NRT;
  count = 0;
  pfac = 0.5;
  while (sharedresources() && count < limit) {
    foreach (n in N) {

      // dieses Netz wegnehmen
      NRT[n].unroute();           // muss pv aktualisieren!

      // und neu verdrahten
      NRT[n] = signalrouter(n);

    }
    // Überbelegungen in nächstem Durchlauf verteuern
    pfac = 2 * pfac;
    updateAllRtgRsrcCosts(pfac); // wird noch verfeinert!
    count++;
  }
  if (count == limit)
    return „unroutable“
}
}
```

Beispiel 16: Entwicklung p_v

Reihenfolge immer gleich, hier: N1, N2, N3

Global
Router
Iteration

p_{fac}

A

p_v

B

C

0 (Init)

1

1

1

0,5

$$N1: 1+(1+1-1)*0,5=1,5$$

$$N1,N2: 1+(2+1-1)*0,5=2$$

$$N1,N2,N3: 1+3*0,5=2,5$$

Beispiel 16: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

2

p_{fac}

A

p_v

B

C

1

1

N1,N2,N3: $1+3*1=4$

1

~~N1,N2,N3: $1+2*1=3$~~

N1: $1+1*1=2$

~~N2,N3: $1+1*1=2$~~

N2,N3: $1+2*1=3$

N2,~~N3~~: $1+1*1=2$

N2,N3: $1+2*1=3$

Beispiel 16: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

3

p_{fac}

A

p_v

B

C

2

N1: $1+1*2=3$

N2,N3: $1+2*2=5$

~~N1: 1~~

N1: $1+1*2=3$

~~N2,N3: $1+1*2=3$~~

N2,N3: $1+2*2=5$

N2,~~N3~~: $1+1*2=3$

N2,N3: $1+2*2=5$

Beispiel 16: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

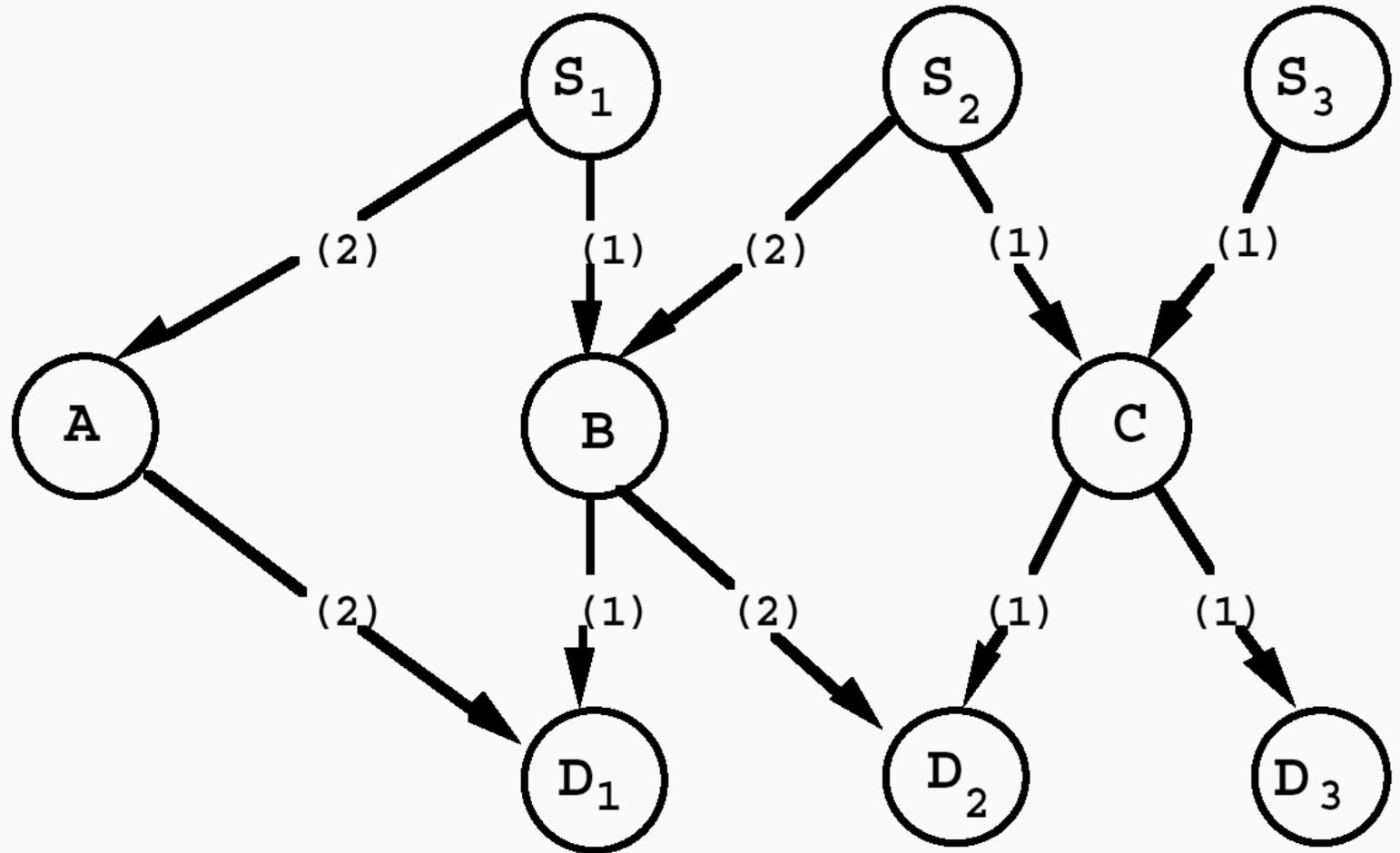
4

p_{fac}	A	B	C
4	N1: $1+1*4=5$	N2,N3: $1+2*4=9$	
	N1: 1		
	N1: $1+1*4=5$	N2,N3: $1+1*4=5$	
		N2,N3: $1+2*4=9$	
		N2,N3: $1+1*4=5$	
			N3: $1+1*4=5$

Jetzt überlappungsfrei verdrahtet

Hier vereinfacht: Springe schon bei *gleichen* Kosten

Weitergehendes Beispiel



Mit einfachem Maze Router in Reihenfolge 1,2,3: C doppelt belegt

Lösung: 1 aus dem Weg schaffen, 2 neu verdrahten

Aber: 1 ist gar nicht behindert, geht also nicht freiwillig

Beispiel 22: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

p_{fac}

p_v

A

B

C

0 (Init)

1

1

1

1

0,5

$N1: 1 + 1 * 0,5 = 1,5$

$N2: 1 + 1 * 0,5 = 1,5$

$N2, N3: 1 + 2 * 0,5 = 2$

Beispiel 22: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

2

p_{fac}	A	B	C
1	1	N1:1 N1:1+1*1=2 N1:1+1*1=2	N2,N3:1+1*1=2 N2,N3:1+2*1=3 N2,N3:1+1*1=2 N2,N3:1+2*1=3

Beispiel 22: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

3

p_{fac}	A	B	C
2	1	$N1:1+1*2=3$ $N1:1$ $N1:1+1*2=3$	$N2,N3:1+2*2=5$ $N2,N3:1+1*2=3$ $N2,N3:1+2*2=5$ $N2,N3:1+1*2=3$ $N2,N3:1+2*2=5$

Beispiel 22: Entwicklung p_v

Global Router Iteration

4

p_{fac}	A	p_v	B	C
4	1		N1:1+1*4=5	N2,N3:1+2*4=9
			N1:1	
			N1:1+1*4=5	
				N2,N3:1+1*4=5
				N2,N3:1+2*4=9
				N2,N3:1+1*4=5
				N2,N3:1+2*4=9

Beispiel 22: Entwicklung p_v

Global
Router
Iteration

5

p_{fac}	A	B	C
8	1	N1:1+1*8=9 N1:1 N1:1+1*8=9	N2,N3:1+2*8=17 N2,N3:1+1*8=9 N2,N3:1+2*8=17 N2, N3 :1+1*8=9 N2,N3:1+2*8=17
...

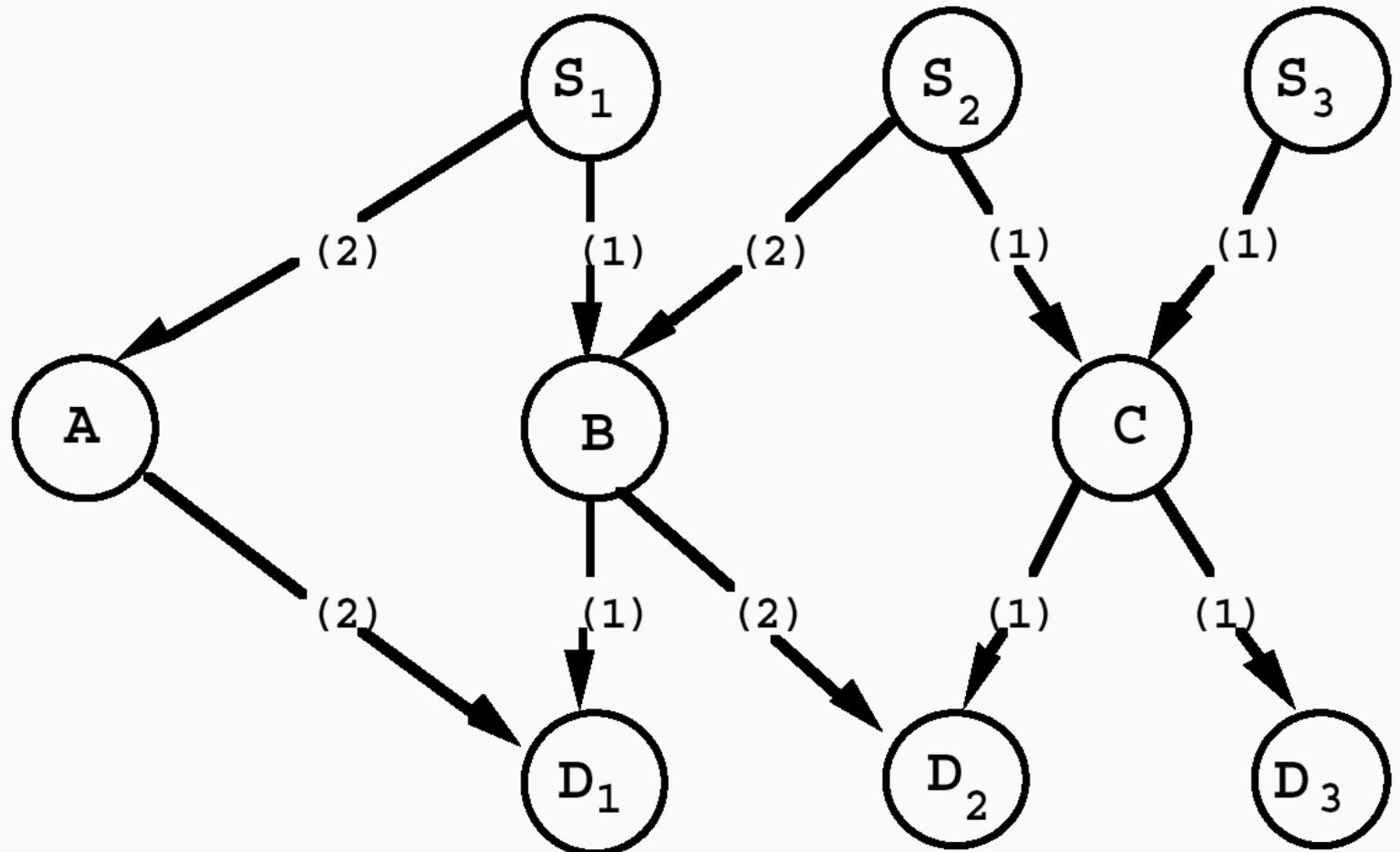
Findet *keine* überlappungsfreie Lösung!

Problem und Lösung

- p_v reicht alleine nicht aus
- Besseres „Gedächtnis“ einführen
 - Historische Überbelegungen erhöhen den akt. Preis
 - h_v akkumuliert alle Mehrfachbelegungen
 - ◆ p_v sieht nur aktuelle Belegung
 - Kostenfunktion erweitern $c_v = b_v \cdot p_v \cdot h_v$
- Aktualisiere einmal pro Global Router Iteration i

$$h(v)^i = \begin{cases} 1, & i=1 \\ h(v)^{i-1} + \max(0, \text{occupancy}(v) - \text{capacity}(v)), & i > 1 \end{cases}$$

Wirkung von h_v



1,2,3: C doppelt belegt

Weitere Iterationen: C wird immer teurer durch Akumulieren der h_c

2 weicht dann auf B aus, Doppelbelegung via p_B, h_B , 1 weicht auf A aus

Beispiel 29: Entwicklung p_v h_v

Global
Router
Iteration
0 (Init)

1

p_{fac}	A	$p_v h_v$ B	C
	1 1	1 1	1 1
0,5		N1: $(1+1*0,5)*1=1,5$	N2: $(1+1*0,5)*1=1,5$ N2,N3: $(1+2*0,5)*1=2$
	$1+0=1$	$1+0=1$	$1+(2-1)=2$

Beispiel 29: Entwicklung p_v h_v

Global
Router
Iteration

2

p_{fac}	$p_v h_v$		
	A	B	C
	1	1	2
1	1	N1:(1+1*1)*1=2 N1:1*1 N1:(1+1*1)*1=2	N2,N3:(1+2*1)*2=6 N2,N3:(1+1*1)*2=4 N2,N3:(1+2*1)*2=6 N2,N3:(1+1*1)*2=4 N2,N3:(1+2*1)*2=6
	1+0=1	1+0=1	2+(2-1)=3

Beispiel 29: Entwicklung p_v h_v

Global
Router
Iteration

3

p_{fac}	A	B	C
	1	1	3
2	1	N1: $(1+1*2)*1=3$ N1: $1*1$ N1: $(1+1*2)*1=3$ N1, N2: $(1+2*2)*1=5$	N2, N3: $(1+2*2)*3=15$ N2, N3: $(1+1*2)*3=9$ N3: $1*3$ N3: $(1+1*2)*3=9$
	$1+0=1$	$1+(2-1)=2$	$3+(1-1)=3$

Beispiel 29: Entwicklung p_v h_v

Global
Router
Iteration

4

p_{fac}	$p_v h_v$		
A	B	C	
1	2	3	
4	1	N1, N2: $(1+2*4)*2=18$ N3: $(1+1*4)*3=15$	
		N1, N2: $(1+1*4)*2=10$	
	N1: $(1+1*4)*1=5$		
	N2: $1*2=2$		
	N2: $(1+1*4)*2=10$		
		N3: $1*3=3$	
		N3: $(1+1*4)*3=15$	

Diesmal genau wie im "echten" Algorithmus gerechnet, Netze springen nur zu *niedrigeren* Kosten, nicht mehr zu gleichen Kosten.

Basiskosten b_v

- Idee: RtgRsrc-Verzögerung einfließen lassen
 - Bei uns nur via T_{switch}
 - Führt aber zu Verschlechterung!
- Besser: Feste Kosten (U Toronto)
 - Benötigt 10% weniger Tracks als mit variablen b_v
- Idee zur Beschleunigung:
 - Bevorzuge Input Pins
 - ◆ Niedrigere Kosten
 - ◆ „Lockt“ Maze Router via PriorityQueue PQ schneller zu Sinks
 - ❖ Werden eher abgearbeitet
- Vorschlag
 - Input Pins $b_v=0.95$
 - Alle anderen Elemente $b_v=1$

Vervollständige globalrouter()

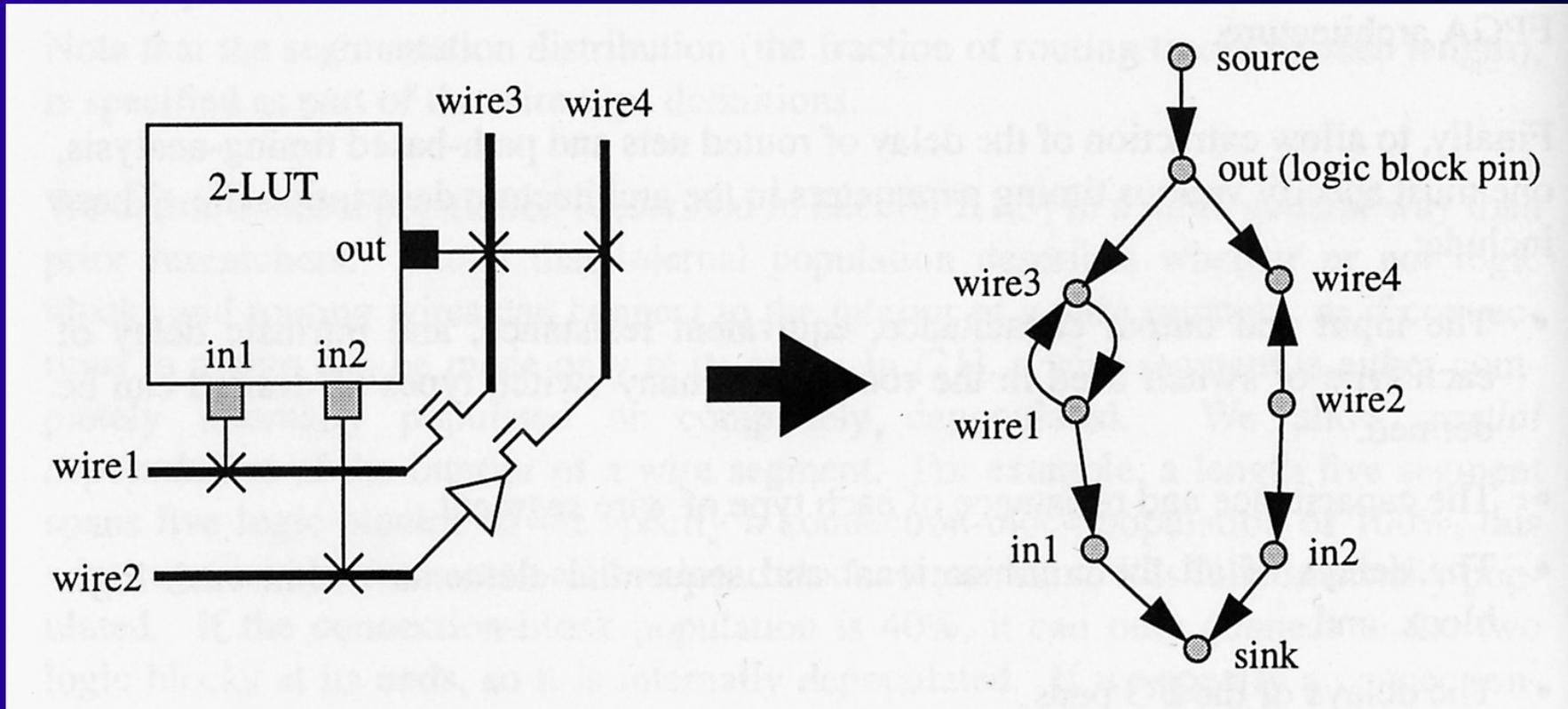
```
Graph<RtgRsrc> Interconnect; // Kanten (RtgRsrc,RtgRsrc)

globalrouter(Set<Nets> N) {
    HashMap<Net,Tree<RtgRsrc>> NRT;
    count = 0;
    pfac = 0.5
    while (sharedresources() && count < limit) {
        foreach (n in N) {
            NRT[n].unroute(); // muss  $p_v$  aktualisieren!
            NRT[n] = signalrouter(n);
        }
        pfac = 2 * pfac;
        count++;
        foreach (r in Interconnect.nodes()) {
            r.updateHistory(); //  $h_v$  aktualisieren
            r.updateWith(pfac); // Gesamtkosten aktualisieren
        }
    }
    if (count == limit)
        return „unroutable“
}
}
```

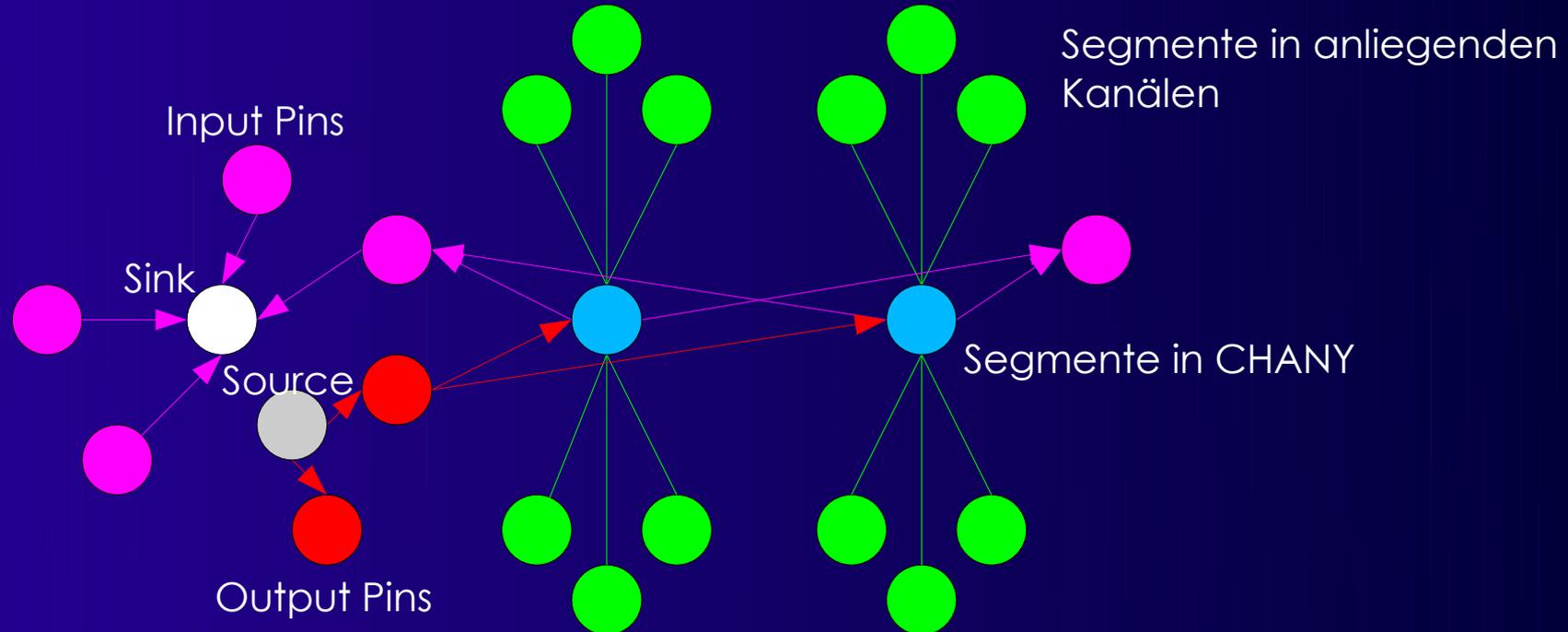
Routing Resource Graph RRG

- Fundamentale Datenstruktur
- Modelliert Verbindungsnetzwerk
- Knoten
 - Leitungen (Verdrahtungssegmente)
 - Pins
- Kanten
 - Schalter (Pass-Transistoren, bidirektional)
 - Buffer (unidirektional)
- Äquivalente Pins
 - Outputs: Source-Knoten
 - Inputs: Sink-Knoten
- Fassungsvermögen (capacity)
 - Bei Source/Sink-Knoten: Anzahl der Out/In-Pins

RRG Beispiel 1



RRG Beispiel 2



■ Verzögerung $d_{u,v}$

- T_{switch} zwischen Metallsegment-Knoten u, v

Ausbau auf Verzögerung

- Optimize auch noch Verzögerung
 - Zwischen Terminals i und j eines Netzes

- Erweiterung der Kostenfunktion $v.cost(u)$

$$C_{u,v} = \text{Crit}(i, j) \cdot d_{u,v} + [1 - \text{Crit}(i, j)] \cdot b_v \cdot h_v \cdot p_v$$

- $d_{u,v}$: Verzögerung von u nach v

- $\text{Crit}(i,j)$: Abart der Criticality(i,j)

$$\text{Crit}(i, j) = \max\left(0.99 - \frac{\text{slack}(i, j)}{D_{max}}, 0\right)$$

- Idee: Auch kritische Netze achten etwas auf Verdrahtbarkeit

Änderung signalrouter()

```
foreach (SinkTerminal j in n.sinks ordered decreasing Crit(i,j)) {
    PQ.clear();
    foreach (v in RT.nodes())
        PQ.add(0, v)
    do {
        v = PQ.removeLowestCostNode();
        if (v != j)
            foreach (w in v.neighbors()) {
                if (PathCost[w] > PathCost[v] + w.cost(v)) {
                    PathCost[w] = PathCost[v] + w.cost(v);
                    PQ.add(PathCost[w], w);
                }
            }
    } while (v != j)

    while (! (v in RT.nodes())) {
        w = v.findCheapestNeighbor(PathCost);
        RT.add(v, (w, v));
        v.updateCost();
        v = w;
    }
}
```

Änderung globalrouter()

```
Graph<RtgRsrc> Interconnect;

globalrouter(Set<Nets> N) {
    HashMap<Net,Tree<RtgRsrc>> NRT;
    count = 0;
    foreach (n in N)
        foreach (j in n.sinks())
            Crit[n.source(), j] = 1
    while (sharedresources() && count < limit) {
        foreach (n in N) {
            NRT[n].unroute(); // muss pv aktualisieren!
            NRT[n] = signalrouter(n);
        }
        count++;
        foreach (r in Interconnect)
            r.updateHistoryAndPfac(); // hv und pfac aktualisieren
        N.timingAnalysis(); // Crit[i,j] aller Netze aktualisieren
    }
    if (count == limit)
        return „unroutable“
}
```

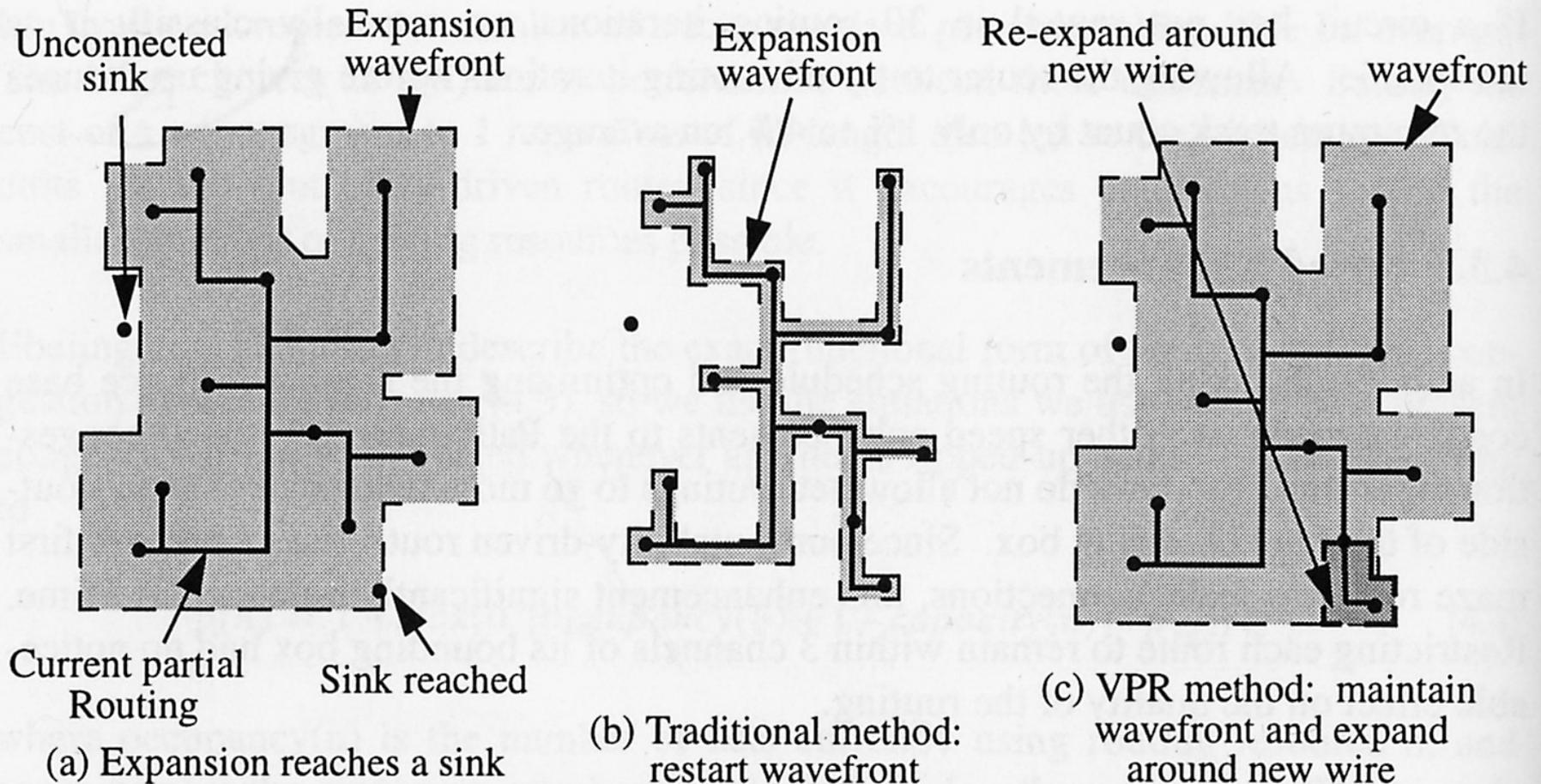
Im ersten Durchgang
Nachfrage bei minimaler
Verzögerung bestimmen

- PathFinder [McMurchie&Ebeling 1995]
 - Zunächst nur verdrahtungsorientiert
 - Keine vorgegebene Sink-Reihenfolge
 - Wellenausbreitung
 - ◆ Bis alle Sinks erreicht

- Verbesserung ohne Verzögerungsorientierung
 - Alte Wellenfront in PQ nicht verwerfen
 - ◆ Einfach neue Sink an RT anschliessen
 - ◆ Neue Segmente in PQ übernehmen (VPR 1997)
 - ◆ Nur bei reiner Verdrahtungsorientierung
 - ◆ Klappt *nicht* bei Optimierung auf Verzögerung!
 - ❖ Unterschiedliche Kosten c_v bei anderen Terminals i, j

- Bei Verzögerungsorientierung
 - Jetzt steht Sink-Reihenfolge fest
 - ◆ Im Paper: Absteigende A_{ij} (vergleichbar Criticality)

Schnellere Wellenausbreitung



- Nur bei reiner Verdrahtungsorientierung
 - Nicht bei Einbeziehen von Timing!

Verbesserungen

- Swartz, Betz, Rose 1998 (U Toronto)
- Optimierung auf Geschwindigkeit
 - Qualitätsverlust?
- Zwei Kernideen
 - Gezielte Ausbreitung statt breiter Wellenfront
 - Sinnvolle Startpunkte für Ausbreitung
- Diverse Detailverbesserungen

Ausbreitung 1

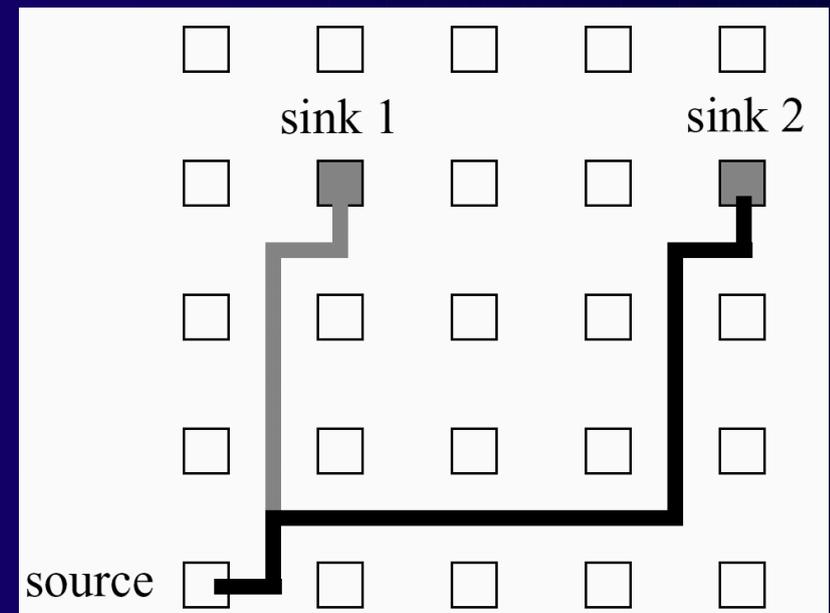
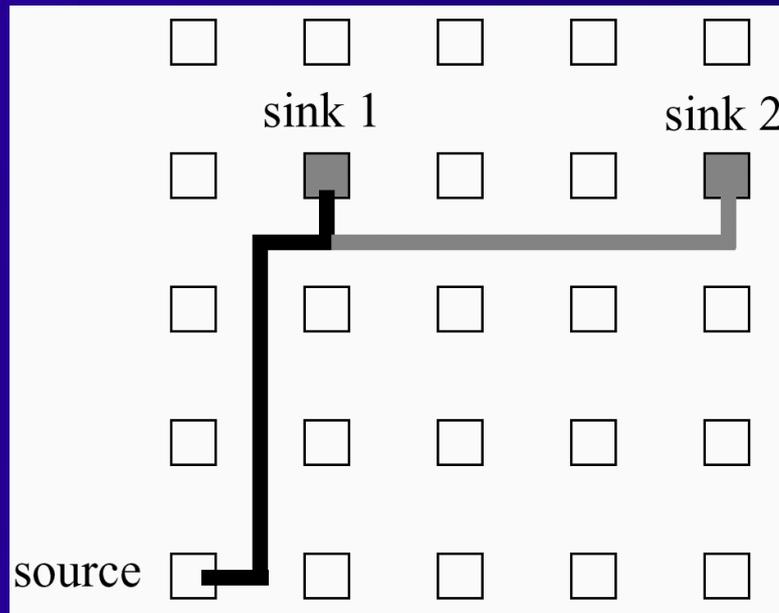
■ Gerichtete Tiefensuche DDFS statt BFS

- Suche bevorzugt in Richtung auf Ziel j zu

$$\text{Cost}(i, v) = \text{PathCost}(i, u) + C_0(v) + \alpha \cdot \Delta D$$

- ◆ $\text{PathCost}(i, u)$: Kosten bis zum Vorgänger u von v
- ◆ C_0 : Verdrahtungsabhängige Basiskosten von v
 - ❖ Vergleichbar c_v , wächst aber viel stärker
 - ❖ Weniger Iterationen
- ◆ ΔD : Manhattan-Distanz von v zum Ziel j
 - ❖ <0 : v liegt näher an j als u (= billiger)
 - ❖ >0 : v liegt weiter von j als u (= teurer)
- ◆ α : Richtungsfaktor
 - ❖ $=0$: BFS, keine richtungsabhängigen Komponenten
 - ❖ $>>0$: Nicht mehr verdrahtungsorientiert, Greedy
 - ❖ $=1.5$: Empfohlen, hohe Beschleunigung, gute Qualität

Ausbreitung 2



■ Reihenfolge der Sinks

- Nächstgelegene zuerst
 - ◆ Bessere Anschliessbarkeit der folgenden Sinks

■ Reihenfolge der Netze

- Die mit vielen Terminals zuerst
 - ◆ Vermeidung von Blockaden

Sinnvolle Startpunkte

■ Pathfinder/VPR

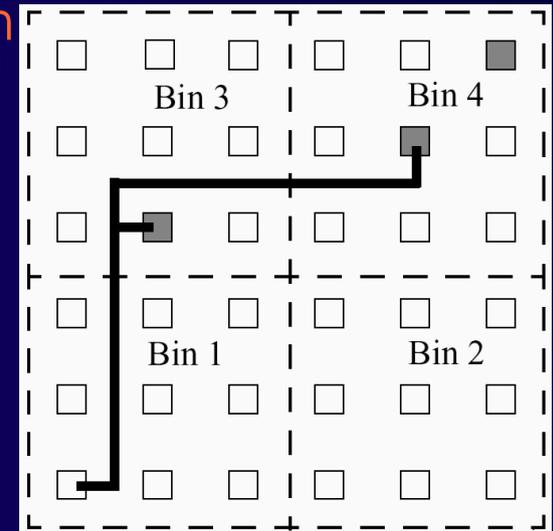
- Ausbreitung von gesamten RT aus
 - ◆ Übernahme in PQ mit Kosten 0
- Ineffizient, gerade bei vielen Terminals

■ Idee

- Nur Segmente aus RT „nahe“ beim Ziel in PQ
- Aufteilen der gesamten Fläche in Bins
 - ◆ Hier:
 - ❖ Nur Segmente in Bin 4 expandieren

■ Lohnend bei

- Netzen mit vielen Terminals



Binning Details

■ Bin-Größe

- Sollte passen
- Berechnung pro Netz n
 - ◆ Durchschnittliche Fläche pro Sink $A_s = \text{bbox}(n) / |\text{sinks}(n)|$
 - ◆ Bewährt: Bin-Größe $4x A_s$, Seitenlänge also $2x A_s$
- Expandiere
 - ◆ Nur Segmente im gleichen Bin wie nächstes Ziel
 - ❖ Einfache Entfernungsberechnung, kein Bin-Raster!

■ Leere Bins

- Bin mit Ziel enthält noch keine RT-Segmente
- Erweitere Suchradius auf 8 Nachbar-Bins
- Falls immer noch leer
 - ◆ Suche von ganzem RT aus

- Low-Stress Routing
 - >10% mehr Tracks als minimal erforderlich
- 15 Beispielschaltungen
- Durchschnittliche Rechenzeit
 - BFS in VPR: 731s
 - DDFS: 14s
 - DDFS+Bins: 7s
- Durchschnittlicher Qualitätsverlust
 - BFS in VPR: 15.5 Tracks
 - DDFS: 15.5 Tracks
 - DDFS+Bins: 15.8 Tracks

Programmierprojekt

- Algorithmus nicht genau nachprogrammieren
 - Viele Details nicht gezeigt!
- Konzepte verstehen
- Inspiration für eigene Ideen

- Sinnvoll
 - Routing Graph
 - Darin nach Verdrahtungen suchen

- Papers auf Web-Site
 - PathFinder, McMurchie & Ebeling 1995
 - Verbesserungen von Swartz et al., 1998
 - Auszüge aus VPR Beschreibung, 1999 [19MB!]

Zusammenfassung

- Verdrahtungsproblem auf FPGAs
- Verdrahtbarkeitsorientierte Verdrahtung
- PathFinder-Algorithmus
 - Gewichteter Maze-Router
 - p_v, h_v
- Erweiterung auf Verzögerung
 - Durch Criticality
- Verbesserungen
 - Bessere Suchalgorithmen