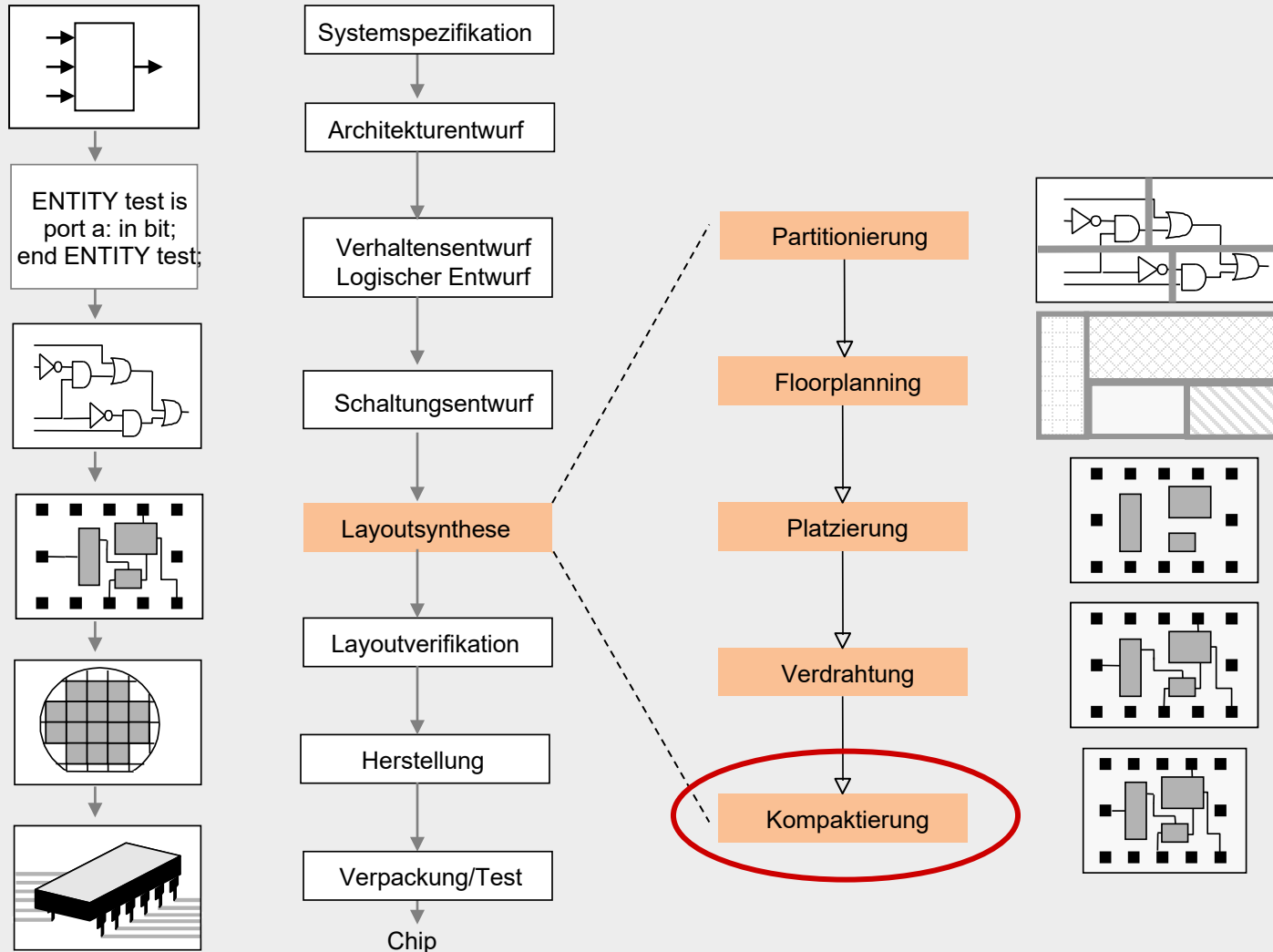


- 8.1 Einführung
- 8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen
- 8.3 Symbolische Kompaktierung
- 8.4 Kompaktierungsalgorithmen
 - 8.4.1 Schnittkompaktierung
 - 8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

8.1 Einführung



Gegeben ist

- ein **entwurfsregel-korrektes Schaltungslayout** (Maskenlayout) mit der Platzierung aller Komponenten und der Verdrahtung aller Netze oder
- ein **symbolisches Layout** mit einer abstrakten Darstellung aller Komponenten und deren Verdrahtung.

Gesucht ist ein kompaktiertes Layout mit

- minimaler Fläche,
- invarianter Struktur von Platzierung und Verdrahtung sowie
- strikter Einhaltung von Entwurfsregeln.

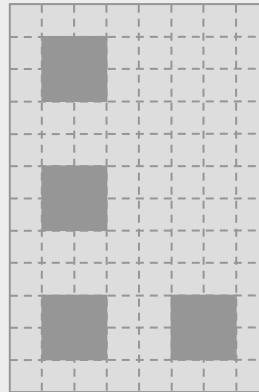
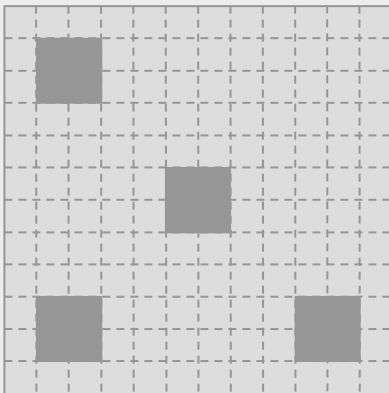
- Kompaktierungsalgorithmen werden seit den 1970er Jahren aktiv angewendet und sind heute sehr weit ausgereift
- Während anfänglich ausschließlich die Verringerung der Layoutfläche im Vordergrund stand, kamen in den letzten Jahren aufgrund der wachsenden Schaltungsanforderungen weitere Zielstellungen hinzu
 - Optimierung kritische Parameter einer Schaltung, z.B. Verbindungslängen, kritische Netze, Signallaufzeiten, ...
 - „Performance-driven Compaction“.

1- und 2-dimensionale Kompaktierung

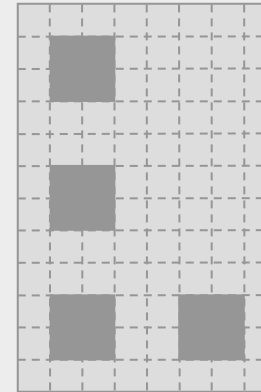
- Bei der **1-dimensionalen Kompaktierung** werden die Layoutelemente nur in einer Richtung bewegt bzw. „zusammengeschoben“ (z.B. zuerst in x -Richtung, dann in y -Richtung)
- Bei der **2-dimensionalen Kompaktierung** werden x - und y -Verschiebung gleichzeitig betrachtet.

1D-Kompaktierung

Ausgangslayout
 $12 \lambda \times 12 \lambda$




1. x-Kompaktierung
 $12 \lambda \rightarrow 8 \lambda$



2. y-Kompaktierung
 $12 \lambda \rightarrow 12 \lambda$

Ergebnis
 $8 \lambda \times 12 \lambda$

Entwurfsregeln:

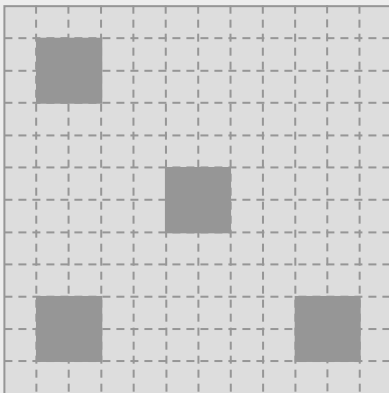
 $2 \lambda \times 2 \lambda$

Mindestabstand 2λ


Randabstand 1λ

1D-Kompaktierung

Ausgangslayout
 $12\lambda \times 12\lambda$

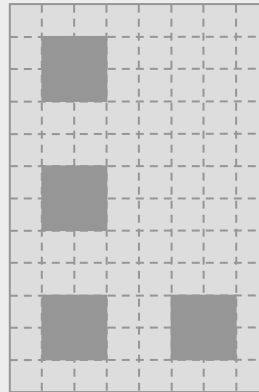


Entwurfsregeln:

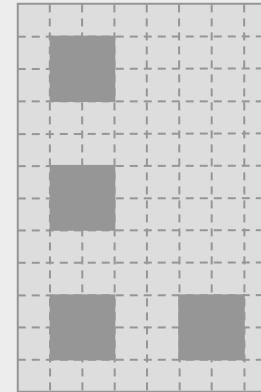
 $2\lambda \times 2\lambda$

Mindestabstand 2λ

Randabstand 1λ

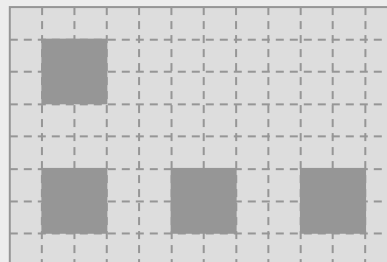


1. x-Kompaktierung
 $12\lambda \rightarrow 8\lambda$

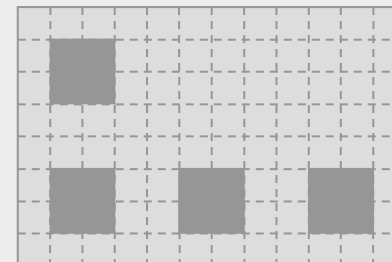


2. y-Kompaktierung
 $12\lambda \rightarrow 12\lambda$

Ergebnis
 $8\lambda \times 12\lambda$



1. y-Kompaktierung
 $12\lambda \rightarrow 8\lambda$

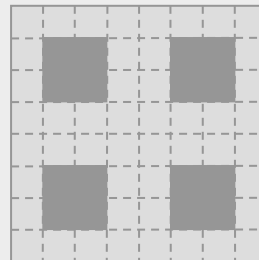
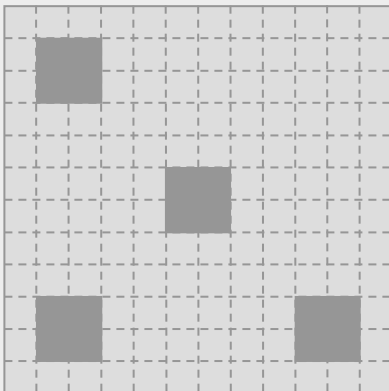


2. x-Kompaktierung
 $12\lambda \rightarrow 12\lambda$

Ergebnis
 $12\lambda \times 8\lambda$

2D-Kompaktierung


Ausgangslayout

 $12 \lambda \times 12 \lambda$ 

Ergebnis

 $8 \lambda \times 8 \lambda$

Entwurfsregeln:

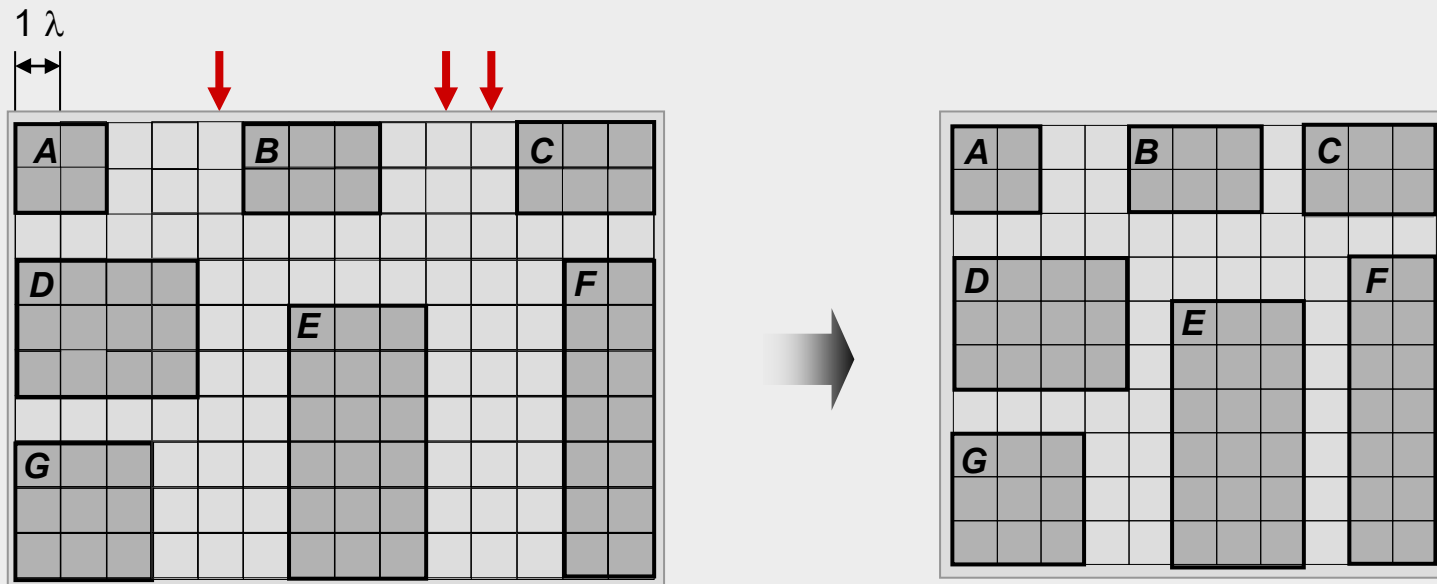
 $2 \lambda \times 2 \lambda$ Mindestabstand 2λ Randabstand 1λ

2D-Kompaktierung

x-Kompaktierung: $12 \lambda \rightarrow 8 \lambda$ **y-Kompaktierung:** $12 \lambda \rightarrow 8 \lambda$

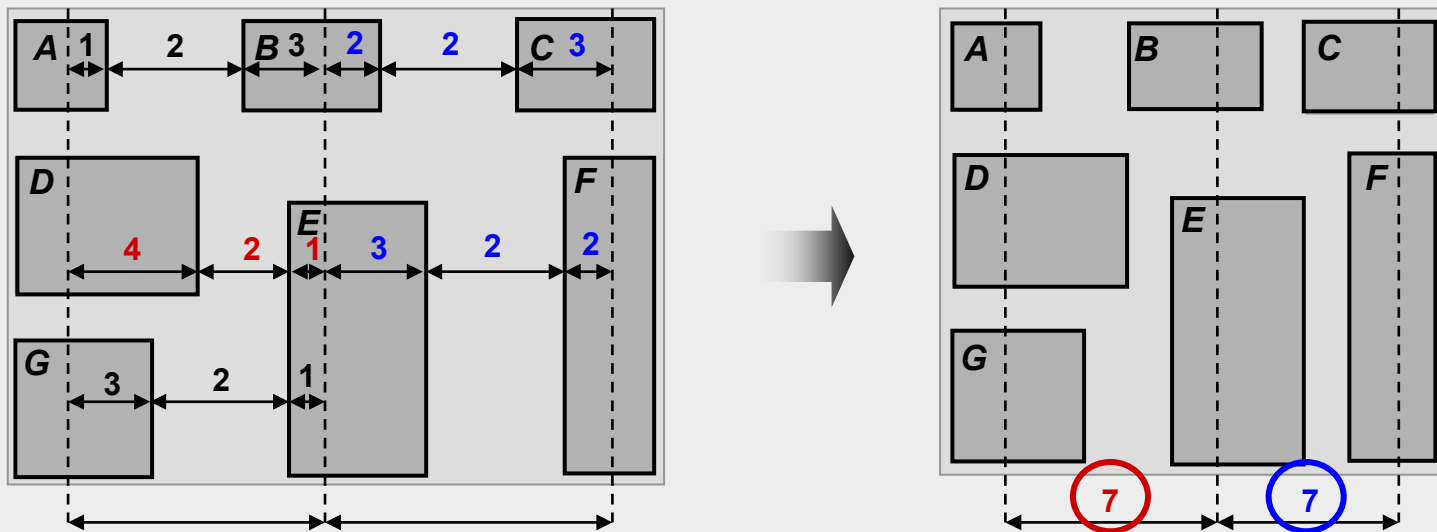
8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

- Bei der **rasterbasierten Kompaktierung** werden die Layoutobjekte mittels der Zuordnung zu Rasterpunkten modelliert.
 - **Festes Raster (Fixed grid)**: Rasterabstand entspricht der kleinsten technologisch realisierbaren Layouteinheit

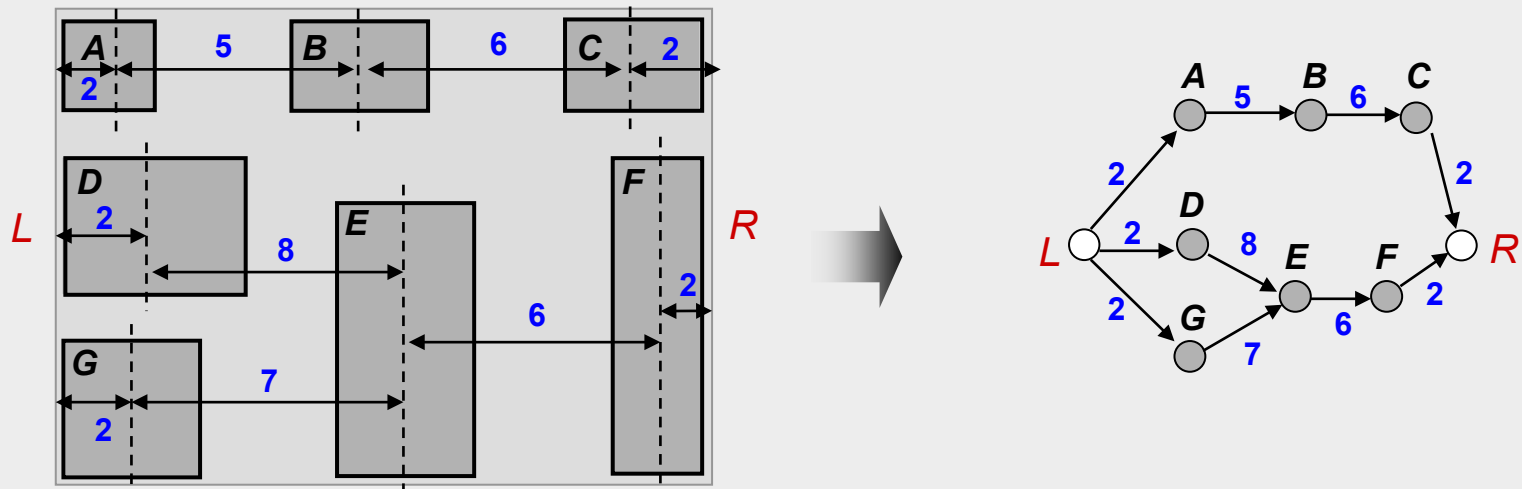


8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

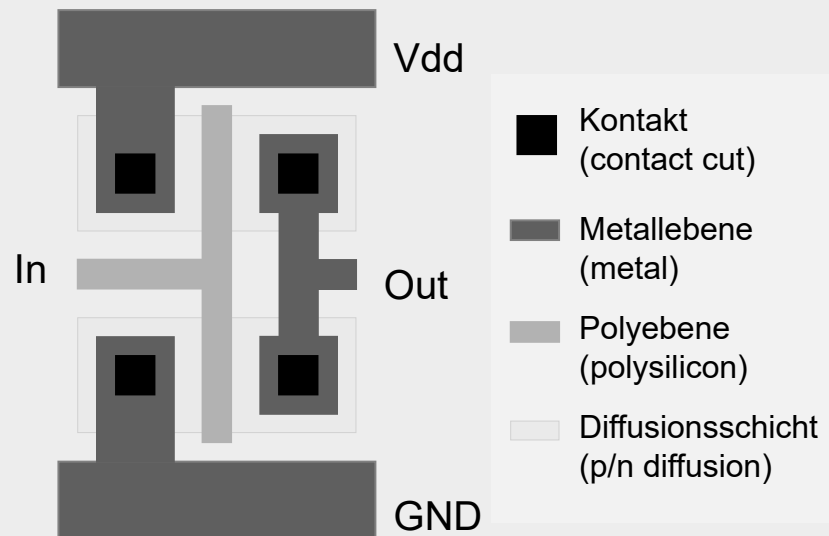
- Bei der **rasterbasierten Kompaktierung** werden die Layoutobjekte mittels der Zuordnung zu Rasterpunkten modelliert.
 - **Festes Raster (Fixed grid)**: Rasterabstand entspricht der kleinsten technologisch realisierbaren Layouteinheit
 - **Virtuelles Raster (Virtual grid)**: Abstände der einzelnen Rasterlinien sind nicht fest vorgegeben, sondern entsprechen jeweils den Mindestabständen der sich auf den Rasterlinien befindlichen Layoutelemente



- Bei der **graphenbasierten Kompaktierung** wird das Layout in Form eines sog. Abstandsgraphen (Constraint graph) repräsentiert, wobei die Knoten die verschiedenen Layoutobjekte und die Kanten die minimalen Abstandsregeln zwischen diesen Objekten widerspiegeln



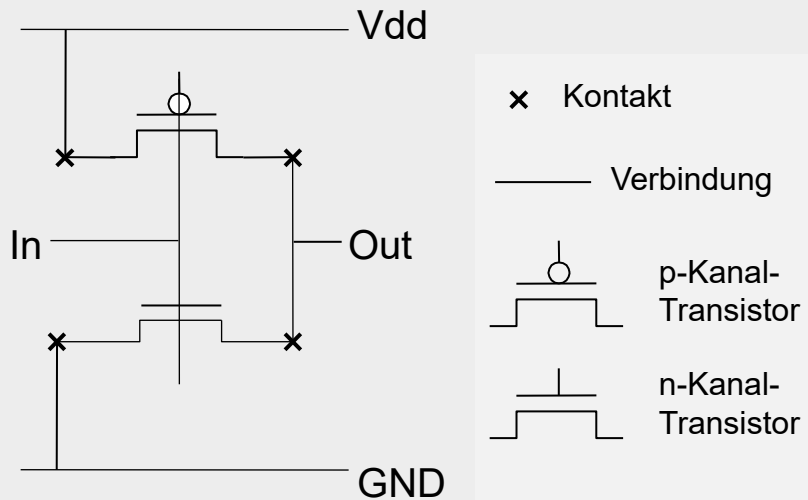
- **Maskenlayout:** Exakte Koordinaten aller Layoutelemente bekannt



Maskenlayout eines Inverters

8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

- **Maskenlayout:** Exakte Koordinaten aller Layoutelemente bekannt
- **Symbolisches Layout:** Nur Nachbarschaftsbeziehungen der Layoutelemente bekannt, konkreter Abstand ohne Bedeutung

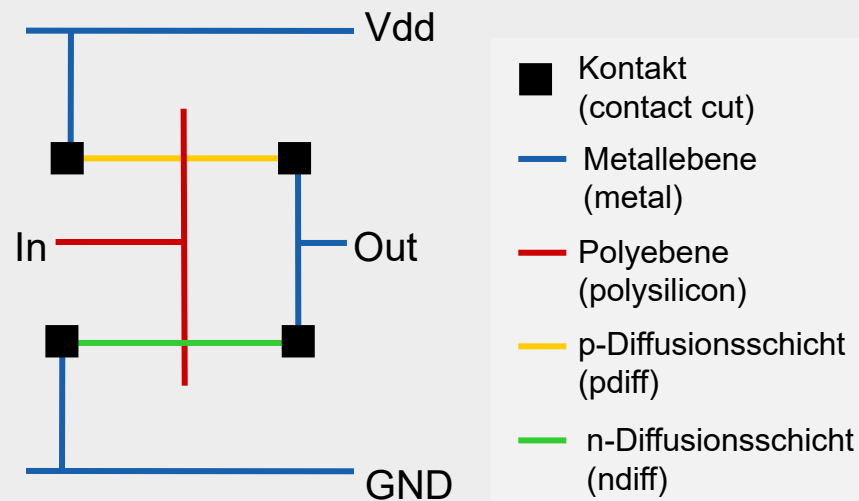


Symbolisches Layout eines Inverters

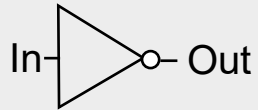
8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

- **Maskenlayout:** Exakte Koordinaten aller Layoutelemente bekannt
- **Symbolisches Layout:** Nur Nachbarschaftsbeziehungen der Layoutelemente bekannt, konkreter Abstand ohne Bedeutung
 - Beispiel: **Stick-Diagramm**
 - Symbolische Layoutdarstellung, die alle Komponenten und deren relative Platzierung darstellt
 - Nicht dargestellt: Exakte Platzierung, Transistorgröße, Leiterzuglängen und -breiten

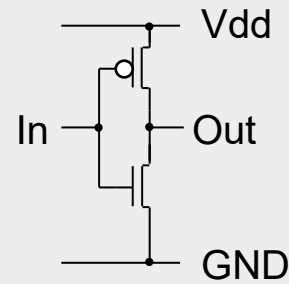
Stick-Diagramm
eines Inverters



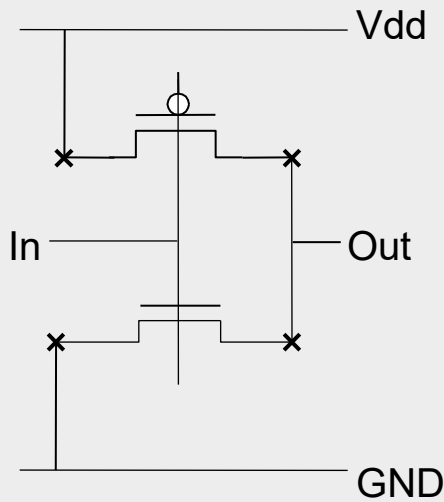
Beispiel: CMOS-Inverter



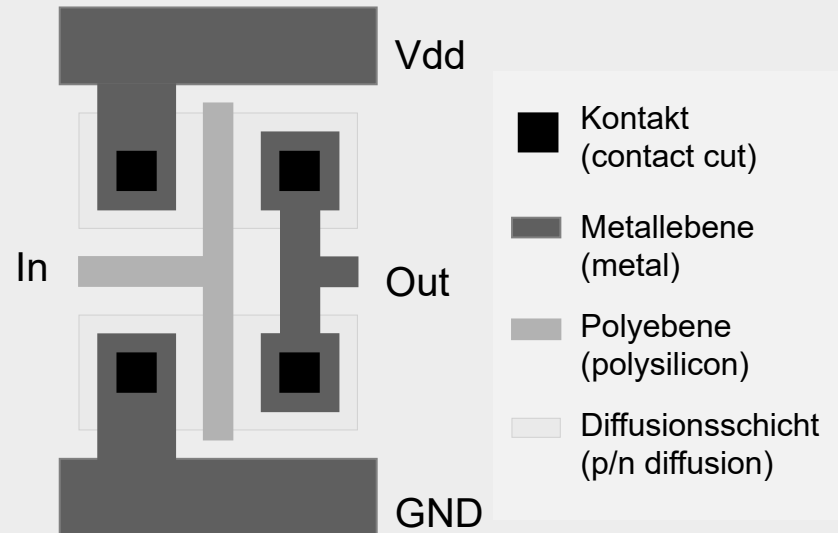
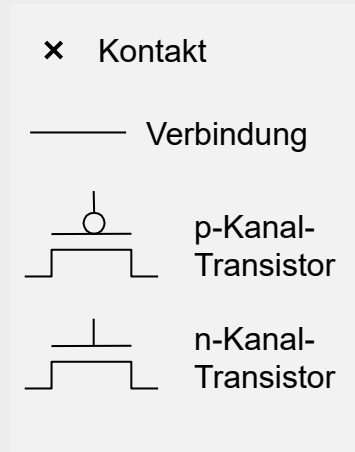
Schaltplansymbol



Transistorschaltung



Symbolisches Layout



Maskenlayout

8.1 Einführung

8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

→ 8.3 Symbolische Kompaktierung

8.4 Kompaktierungsalgorithmen

8.4.1 Schnittkompaktierung

8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

- Kompaktoren werden auch bei der symbolischen Layoutentwicklung eingesetzt (symbolische Kompaktierung, Symbolic compaction)
- **Symbolische Layoutentwicklung**
 - Basiert auf symbolischer Layoutdarstellung, z.B. Stick-Diagramm
 - Ermöglicht Vereinfachung der Layoutentwurfs durch Umgehung der Vielzahl von Entwurfsregeln und der aufwendigen Überführung von einer Technologie zur nächsten
- **Symbolische Kompaktierung**
 - Überführung eines symbolischen Layouts in eine reale Technologie-Implementierung
 - Kompaktierung dient damit zur Technologie-Anpassung

8.1 Einführung

8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen

8.3 Symbolische Kompaktierung

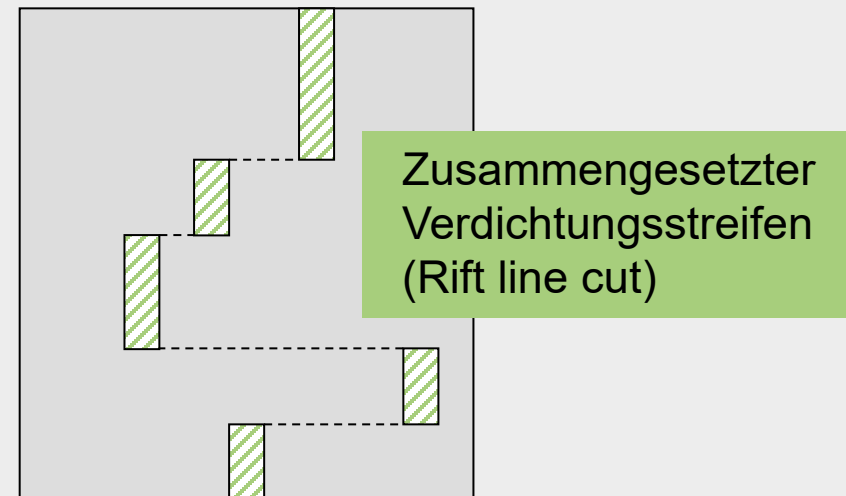
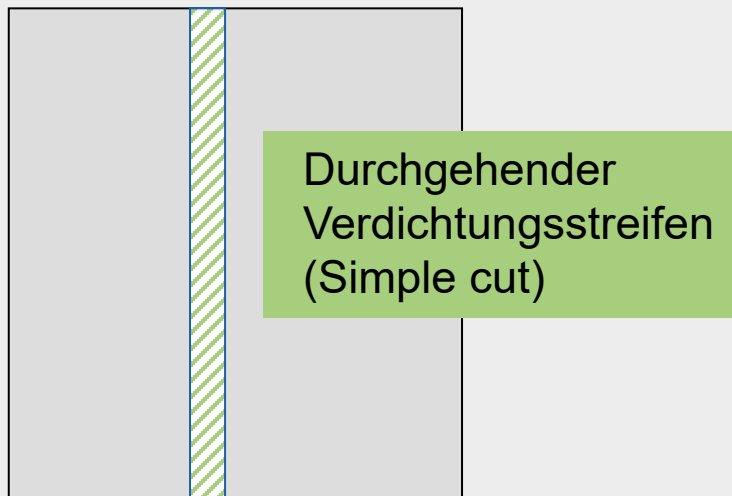
→ 8.4 Kompaktierungsalgorithmen

8.4.1 Schnittkompaktierung

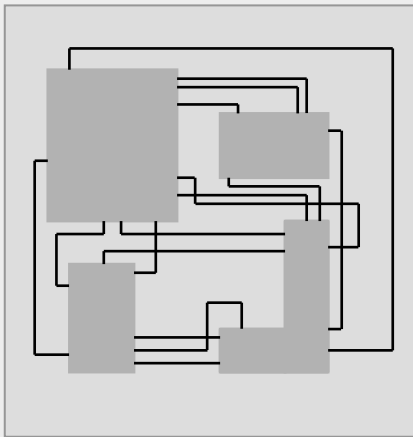
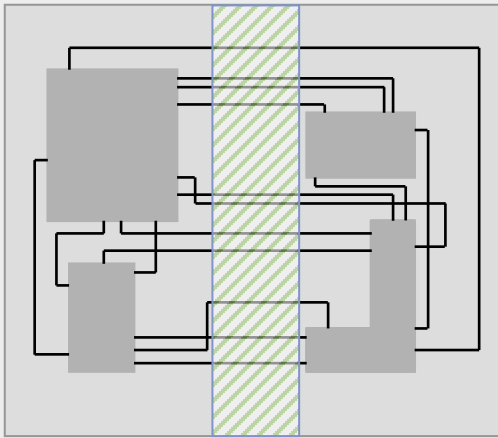
8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

8.4.1 Schnittkompaktierung

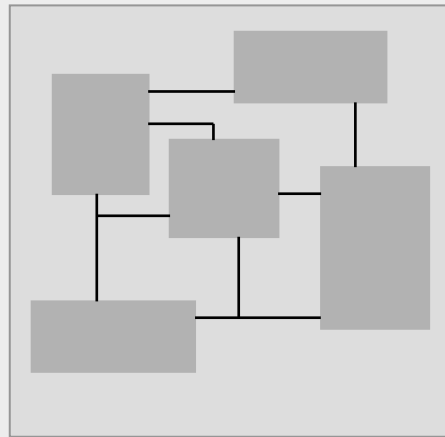
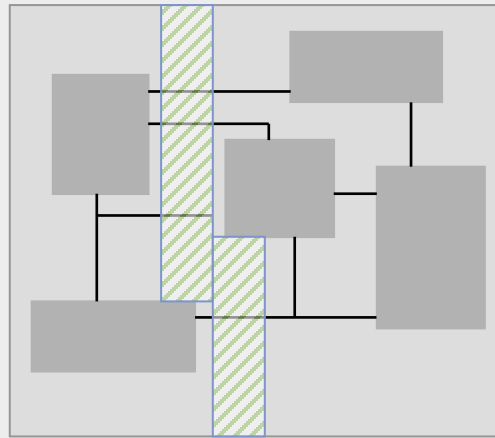
- 1970 erstmals von *Akers, Geyer* und *Roberts* vorgestellt
- Layout enthält **Verdichtungsstreifen**, die frei von platzierten Elementen sind und in denen alle Leiterzüge senkrecht zur Streifenrichtung verlaufen
- Streifenbereich wird aus der Schaltung entfernt und die betreffenden Koordinaten der Schaltungselemente auf die neue Layoutgröße umgerechnet



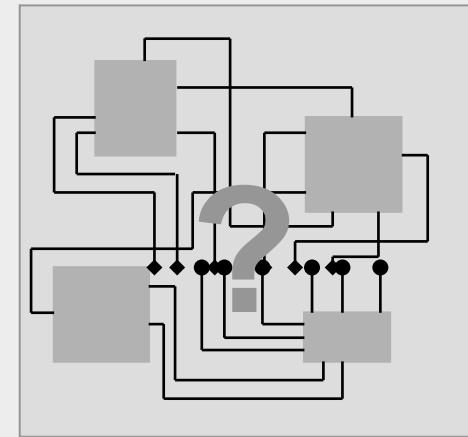
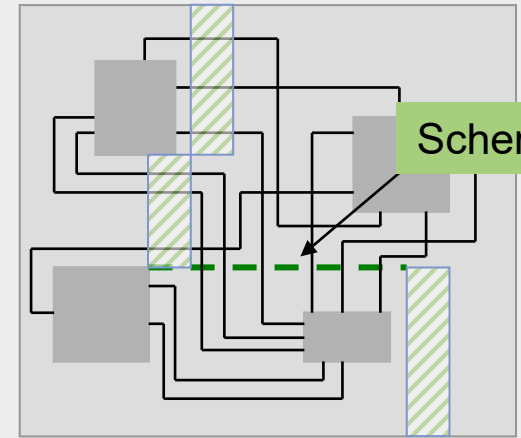
8.4.1 Schnittkompaktierung



Durchgehender Verdichtungsstreifen



Zusammengesetzte Verdichtungsstreifen

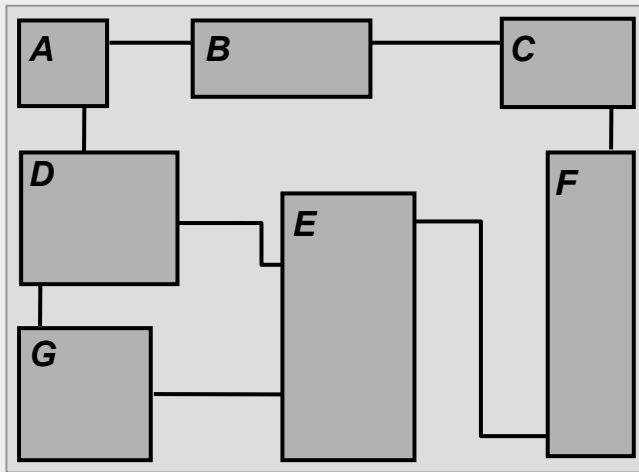


Algorithmus

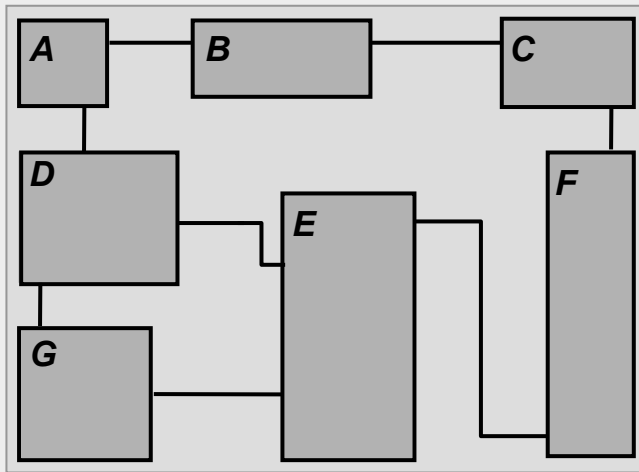
1. Für eine vorgegebene Kompaktierungsrichtung
 - a) Abbildung der Layoutelemente auf einem binären Raster
 - b) Ermitteln von durchgehenden bzw. zusammengesetzten Verdichtungsstreifen
 - c) Entfernen der Verdichtungsstreifen.
Bei zusammengesetzten Verdichtungsstreifen: Untersuchung der Scherlinie auf Layoutkonflikte.
 - d) Falls bei zwei aufeinander folgenden Durchläufen keine Entfernung von Verdichtungsstreifen möglich ist, weiter mit Schritt 3
2. Wechsel der Kompaktierungsrichtung, weiter mit Schritt 1
3. Rückabbildung der Rastertopologie in reale Layoutkoordinaten, ENDE.

Implementierung

- Zur Identifizierung der zur Kompaktierung geeigneten Verdichtungsstreifen werden die Rasterpunkte binär, d.h. mit 0 oder 1, gekennzeichnet.
- Rasterpunkte, denen in der jeweiligen Kompaktierungsrichtung nicht zusammenschiebbare Layoutelemente (Bereiche mit Zellenbelegung oder senkrecht zur aktuellen Kompaktierungsrichtung verlaufenden Leiterzügen) zugeordnet sind, markiert man mit 0.
- Anschließend werden alle verbleibenden, für die aktuelle Kompaktierungsrichtung **kompaktierfähigen Layoutbereiche mit 1** gekennzeichnet.



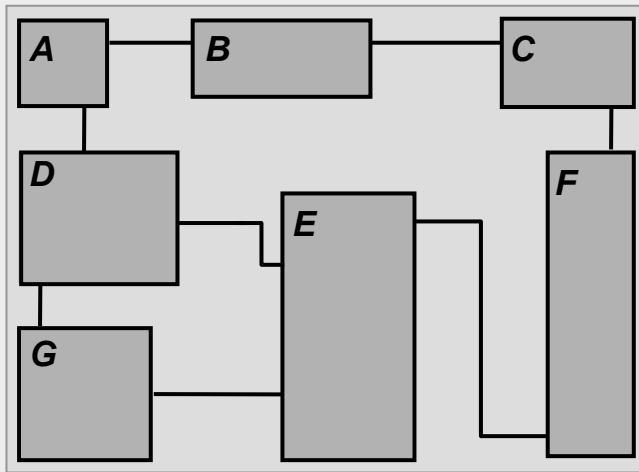
Ausgangslayout; horizontale Kompaktierung



Ausgangslayout

0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Schritt 1a: Abbildung auf binärem Raster;
 Horizontal nicht „zusammenschiebbar“: 0
 Horizontal kompaktierfähiger Bereich: 1



Ausgangslayout

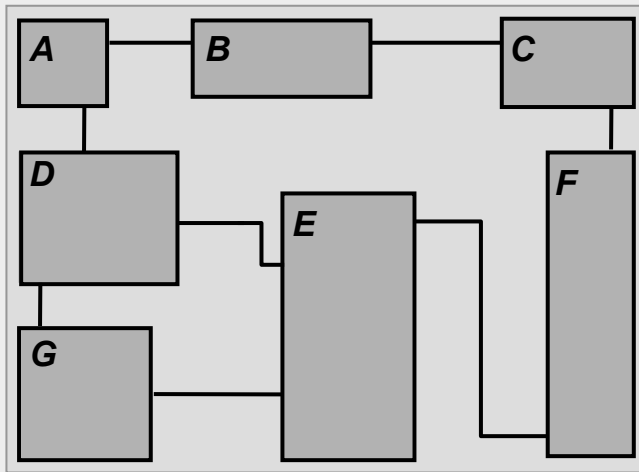
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	

Schritt 1a: Abbildung auf binärem Raster

Zusammengesetzte Verdichtungsstreifen Durchgehende Verdichtungsstreifen

0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Schritt 1b: Ermitteln von Verdichtungsstreifen



Ausgangslayout

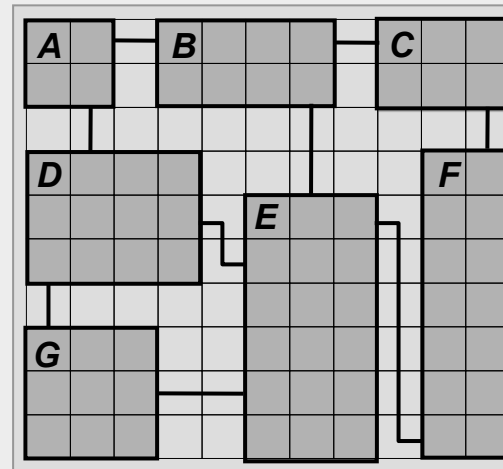
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	

Schritt 1a: Abbildung auf binärem Raster

Zusammengesetzte Verdichtungsstreifen (green)
 Durchgehende Verdichtungsstreifen (red)

0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0

Schritt 1b: Ermitteln von Verdichtungsstreifen

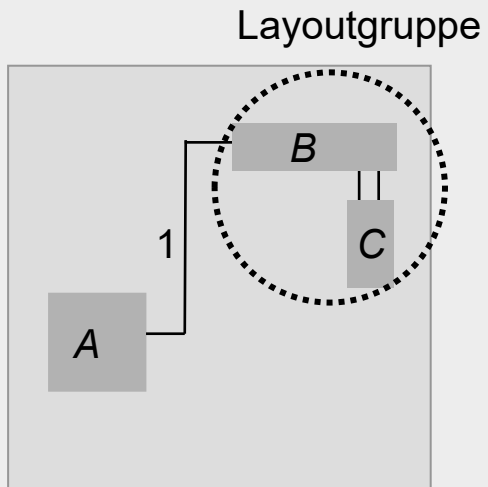


Schritt 1c: Entfernen der Verdichtungsstreifen
 Schritt 3: Rückabbildung der Rastertopologie

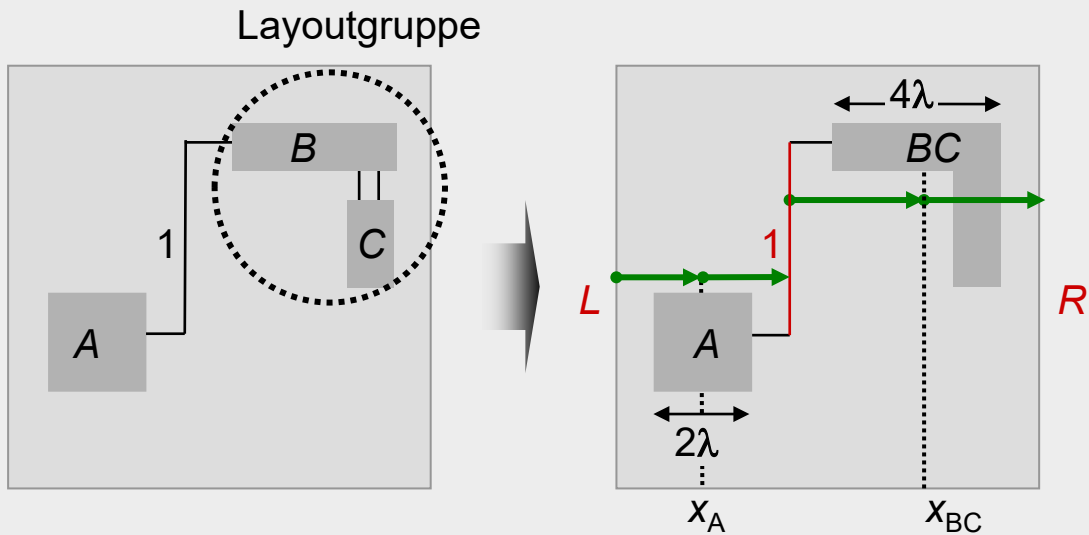
8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

- Die Abstandsgraph-Kompaktierung beruht auf der Suche nach dem längsten Pfad in einem Graphenmodell, welches die Nachbarschaft von Layoutelementen und deren Mindestabstände abbildet
- Eine **Layoutgruppe** umfasst jeweils die Layoutelemente, die gemeinsam bewegt werden müssen
- Ein **Abstandsgraph** ist ein gerichteter, kantenbewerteter Graph mit folgenden Eigenschaften:
 - Jedes Layoutelement entspricht einem Knoten.
 - Zwischen zwei Knoten befindet sich eine gerichtete Kante, sofern zwischen den Layoutelementen einzuhaltende Abstandsregeln gelten.
 - Die Kantengewichtung entspricht den Abstandsregeln der Kantenknoten.
 - Layoutränder sind ebenfalls als Knoten abzubilden.

Erzeugung eines horizontalen Abstandsgraphen

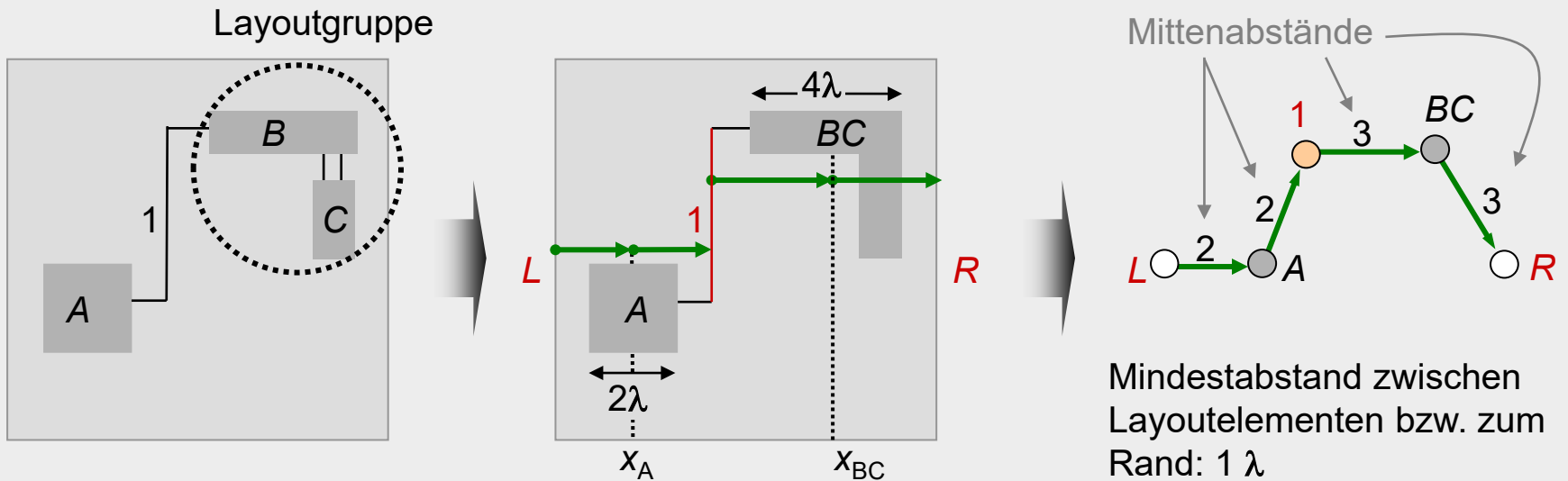


Erzeugung eines horizontalen Abstandsgraphen



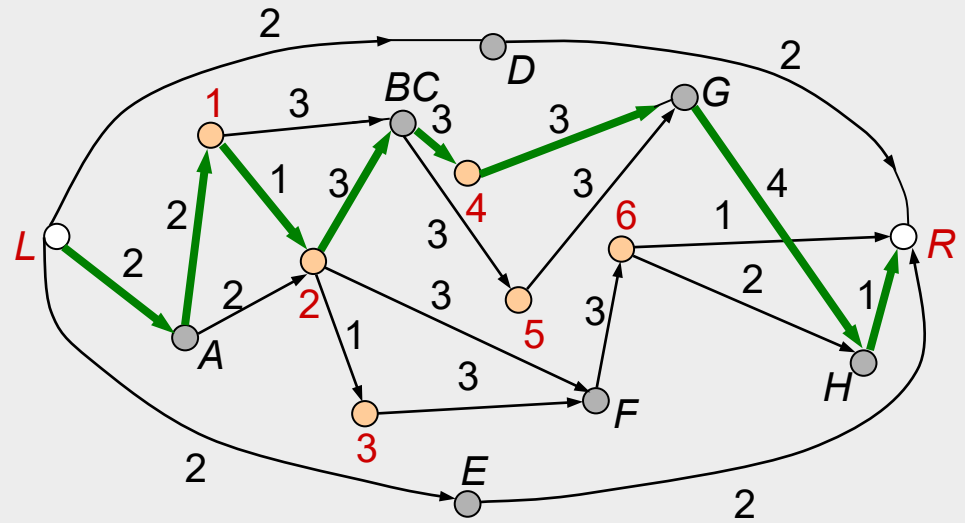
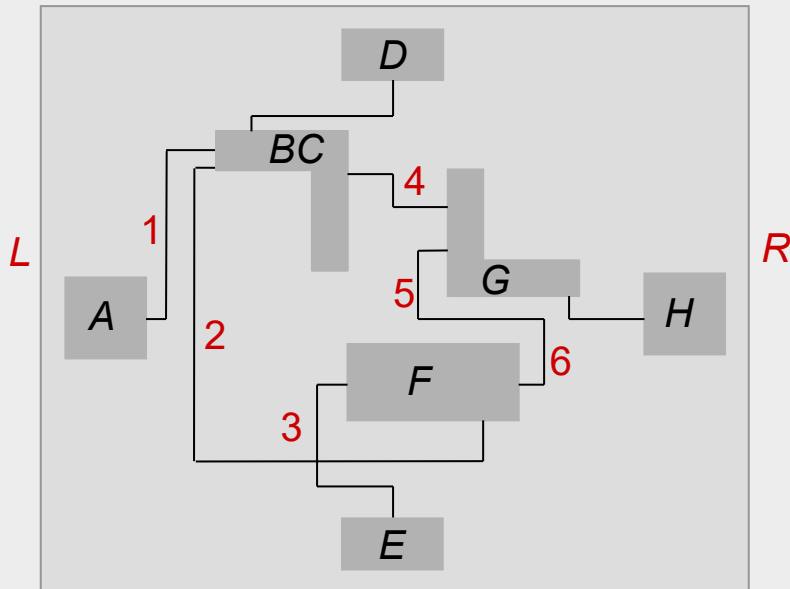
8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Abstandsgraph

Erzeugung eines horizontalen Abstandsgraphen



Minimale Layoutbreite: $2+2+3+3 = 10\lambda$

8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Abstandsgraph – Beispiel



→ Längster Pfad von L nach R

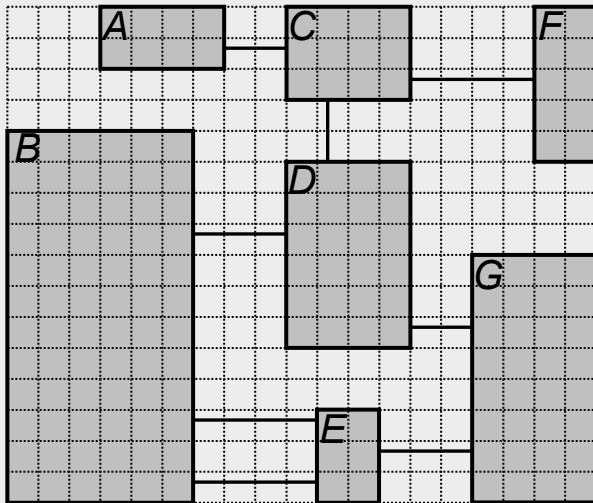
8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

- Bestimmung des längsten Pfades → minimale Layoutbreite bzw. -höhe
- Layoutelemente entlang dieses Graphen werden mit minimalem Abstand platziert → kompaktiertes Layout
- Layoutsegmente, die nicht auf dem längsten Pfad liegen: Mittelposition
- Für jeden Knoten v wird dazu eine untere, z.B. linke Grenze $l(v)$, und eine obere, z.B. rechte Grenze $r(v)$, seiner möglichen horizontalen Positionen ermittelt
 - $l(v) = (\text{längster Weg von linker Kante zum Knoten } v)$
 - $r(v) = (\text{längste Pfadlänge}) - (\text{längster Weg von Knoten } v \text{ zur rechten Kante})$

Algorithmus

1. Zusammenfassung zu Layoutgruppen; Ordnen sämtlicher Kompaktierungsobjekte nach steigenden x-Koordinaten.
2. Erzeugung eines gerichteten horizontalen Abstandsgraphen G_H , wobei
 - a) horizontale Nachbarschaften als Kanten $\{i, j\} \in G_H$ und
 - b) horizontale Kompaktierungsobjekte als Knoten $(v = 1, 2, \dots, n) \in G_H$,
 - c) Mindestabstände als Kantengewichte d_{ij} abgebildet werden.
3. Berechnung der Grenzen $l(v)$ und $r(v)$ der zulässigen horizontalen Positionen jedes Knotens v
4. Das durch den Knoten v abgebildete Kompaktierungsobjekt wird auf die Position $x(v)$ gesetzt, mit
 - a) $x(v) = l(v) = r(v)$ falls v im längsten Pfad liegt,
 - b) $x(v) = [l(v) + r(v)] / 2$ falls v nicht im längsten Pfad liegt.
5. Weiter mit Schritt 1 zur Durchführung einer entgegengesetzten (vertikalen) Kompaktierung bzw. ENDE, falls in zwei Durchgängen keine Verschiebung.

8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Beispiel



Gegeben:

Mindestabstand eine Gittereinheit (1λ)

Minimale horizontale Mittenabstände:

$$d_{AC} = 5$$

$$d_{AD} = 5$$

$$d_{BC} = 6$$

$$d_{BD} = 6$$

$$d_{BE} = 5$$

$$d_{CF} = 4$$

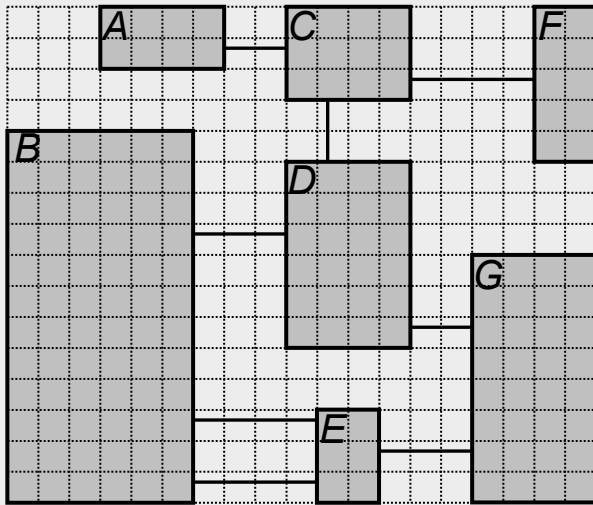
$$d_{CG} = 5$$

$$d_{DF} = 4$$

$$d_{DG} = 5$$

$$d_{EG} = 4$$

8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Beispiel



Gegeben:

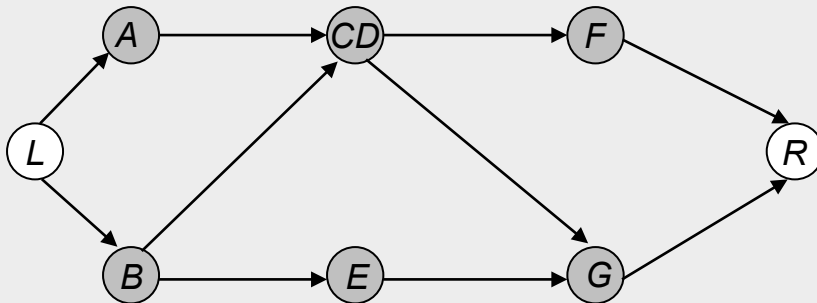
Mindestabstand eine Gittereinheit (1λ)

Minimale horizontale Mittenabstände:

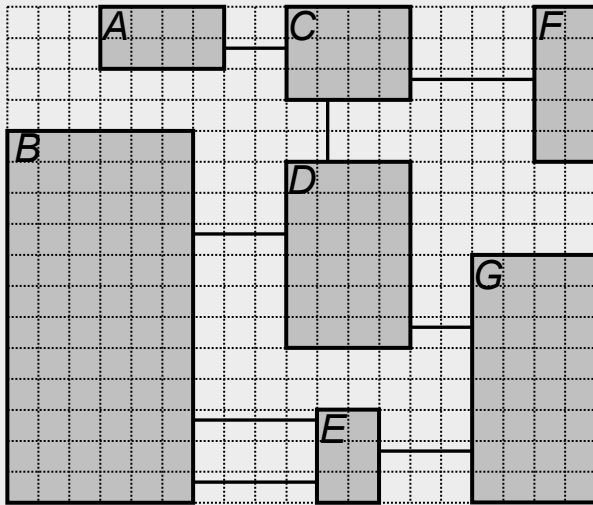
$$\begin{array}{lll}
 d_{AC} = 5 & d_{AD} = 5 & d_{BC} = 6 \\
 d_{BD} = 6 & d_{BE} = 5 & d_{CF} = 4 \\
 d_{CG} = 5 & d_{DF} = 4 & d_{DG} = 5 \\
 d_{EG} = 4 & &
 \end{array}$$

Schritte 1 und 2: Erzeugen des horizontalen Abstandsgraphen mit längstem Pfad

a) Gruppierung von Elementen mit vertikalen Verbindungen: (C,D)



8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Beispiel



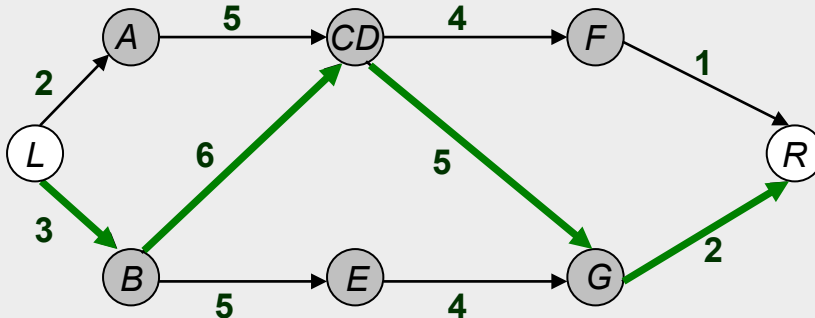
Gegeben:

Mindestabstand eine Gittereinheit (1λ)

Minimale horizontale Mittenabstände:

$$\begin{array}{lll}
 d_{AC} = 5 & d_{AD} = 5 & d_{BC} = 6 \\
 d_{BD} = 6 & d_{BE} = 5 & d_{CF} = 4 \\
 d_{CG} = 5 & d_{DF} = 4 & d_{DG} = 5 \\
 d_{EG} = 4 & &
 \end{array}$$

Schritte 1 und 2: Erzeugen des horizontalen Abstandsgraphen mit längstem Pfad



a) Gruppierung von Elementen mit vertikalen Verbindungen: (C,D)

b) Minimaler Mittenabstand d_{ij} bei Gruppen g_i und g_j :

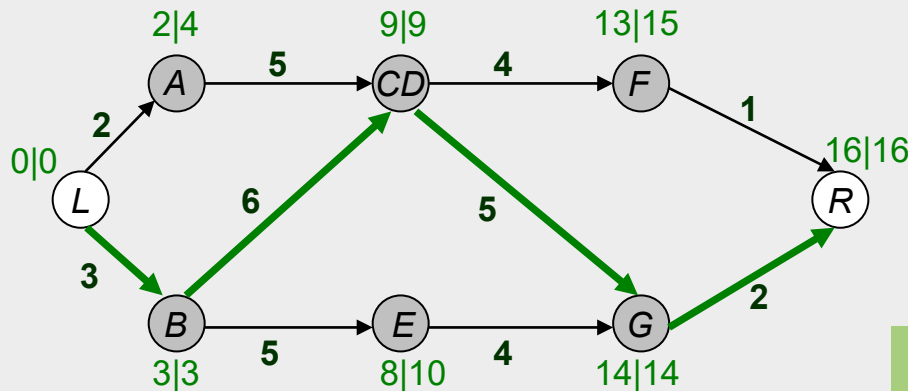
$$d_{ij} = \max_{a \in g_i, b \in g_j} (d_{ab})$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beispiel: } d_{A,CD} &= \max(d_{AC}, d_{AD}) \\
 &= \max(5, 5) = 5
 \end{aligned}$$

c) Kennzeichnung des minimalen Mittenabstandes von Gruppen und Elementen durch **Kantengewichte**

8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Beispiel

Schritt 3: Berechnung der Grenzen $l(v)$ und $r(v)$ jedes Knotens v



$$r(v) = (\text{längste Pfadlänge}) - \text{LengthToR}(v)$$

Knoten R:	$l(R) = 16$	$\text{LengthToR}(R) = 0$	$r(R) = 16 - 0 = 16$
Knoten F:	$l(F) = 13$	$\text{LengthToR}(F) = 1$	$r(F) = 16 - 1 = 15$
Knoten G:	$l(G) = 14$	$\text{LengthToR}(G) = 2$	$r(G) = 16 - 2 = 14$
Knoten CD:	$l(CD) = 9$	$\text{LengthToR}(CD) = 7$	$r(CD) = 16 - 7 = 9$
Knoten E:	$l(E) = 8$	$\text{LengthToR}(E) = 6$	$r(E) = 16 - 6 = 10$
Knoten A:	$l(A) = 2$	$\text{LengthToR}(A) = 12$	$r(A) = 16 - 12 = 4$
Knoten B:	$l(B) = 3$	$\text{LengthToR}(B) = 13$	$r(B) = 16 - 13 = 3$
Knoten L:	$l(L) = 0$	$\text{LengthToR}(L) = 16$	$r(L) = 16 - 16 = 0$

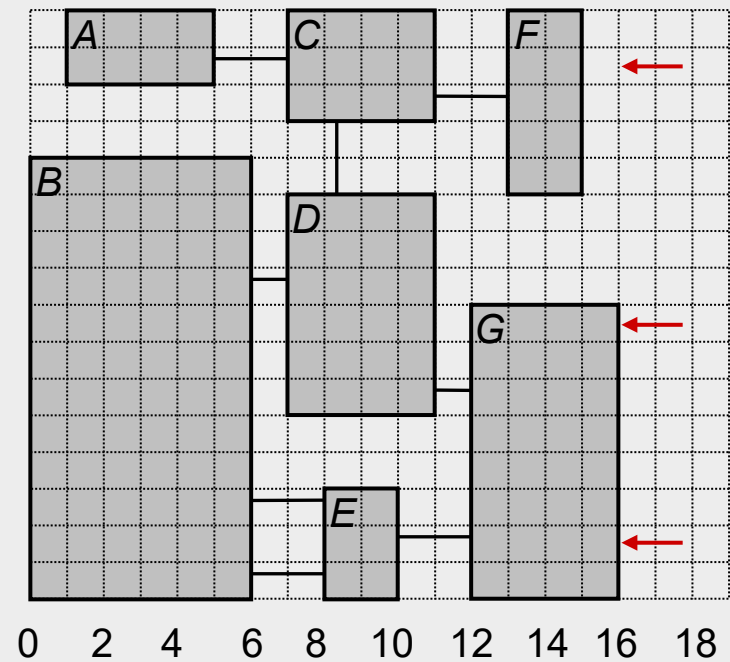
$l(v)$ = längste Pfadlänge von L zu v

$\text{LengthToR}(v)$ = längste Pfadlänge von v zu R

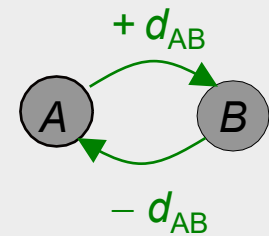
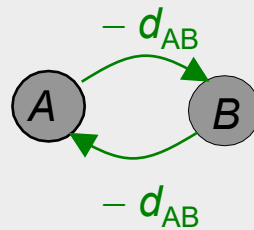
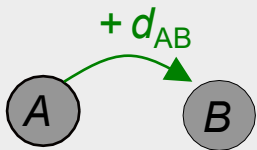
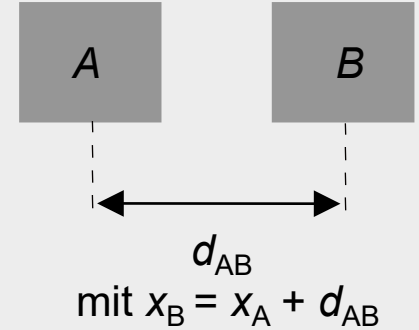
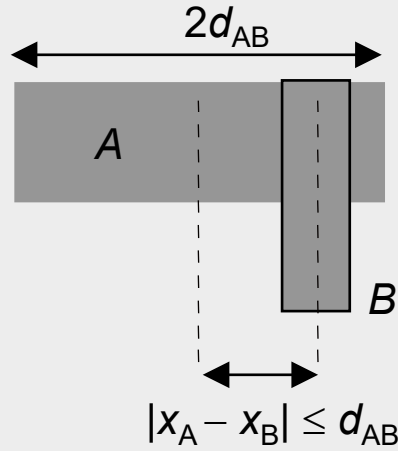
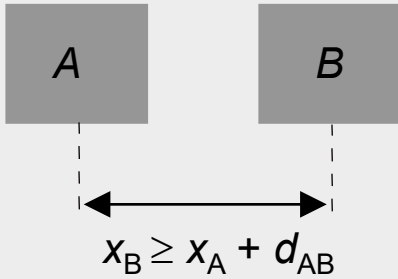
8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Beispiel

Schritt 4: Berechnung von $x(v)$ und Anpassung des Layouts

Knoten R :	$l(R) = 16$	$r(R) = 16$	$x(R) = 16$
Knoten F :	$l(F) = 13$	$r(F) = 15$	$x(F) = 14$
Knoten G :	$l(G) = 14$	$r(G) = 14$	$x(G) = 14$
Knoten CD :	$l(CD) = 9$	$r(CD) = 9$	$x(CD) = 9$
Knoten E :	$l(E) = 8$	$r(E) = 10$	$x(E) = 9$
Knoten A :	$l(A) = 2$	$r(A) = 4$	$x(A) = 3$
Knoten B :	$l(B) = 3$	$r(B) = 3$	$x(B) = 3$
Knoten L :	$l(L) = 0$	$r(L) = 0$	$x(L) = 0$



8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung: Modifikationen



Minimaler Mittenabstand

Maximaler Mittenabstand

Fester Mittenabstand

- 8.1 Einführung
- 8.2 Begriffe, Modelle, Datenstrukturen
- 8.3 Symbolische Kompaktierung
- 8.4 Kompaktierungsalgorithmen
 - 8.4.1 Schnittkompaktierung
 - 8.4.2 Abstandsgraph-Kompaktierung

Zusammenfassung Entwurfsautomatisierung

