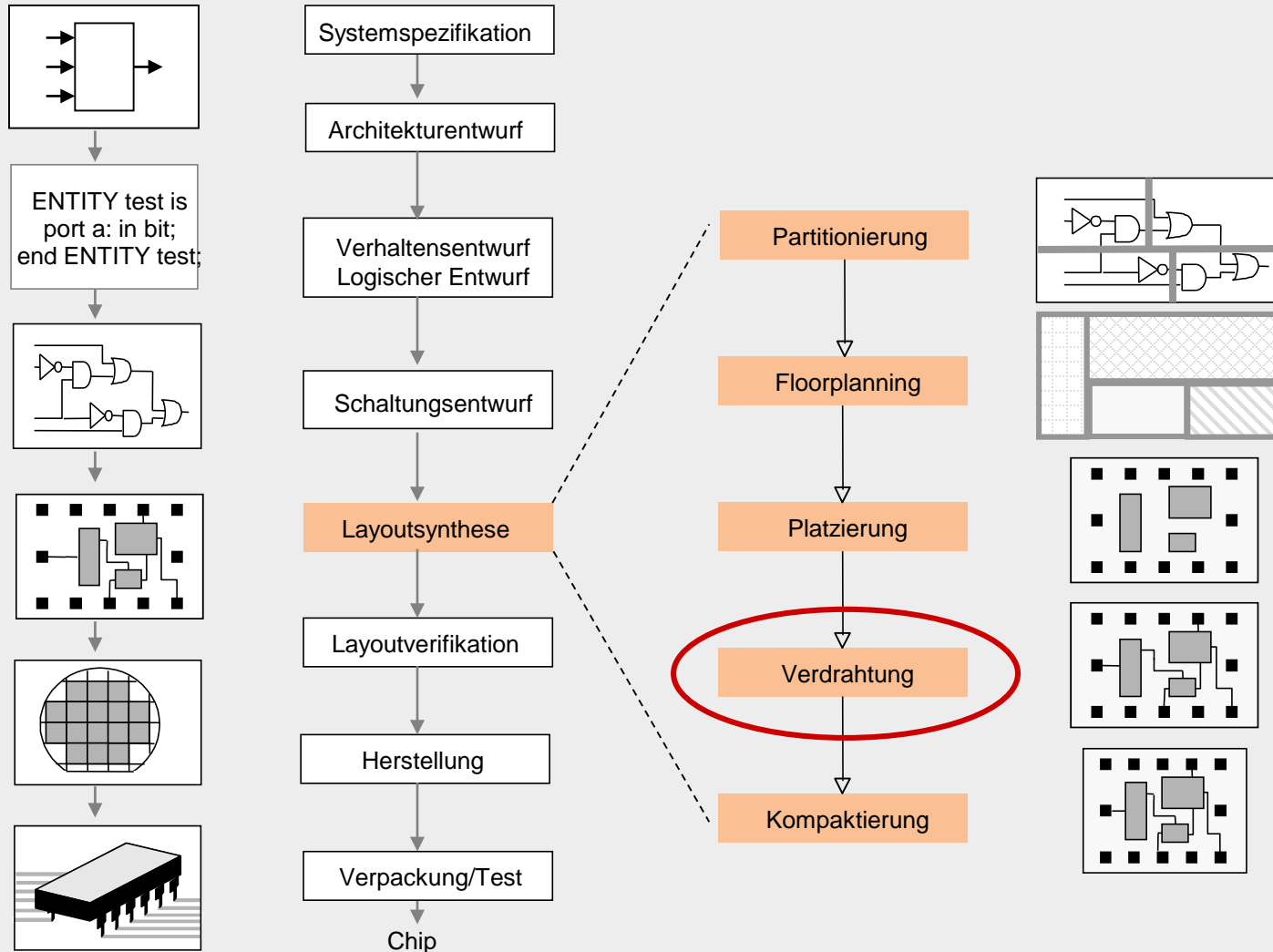


- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung

# 7.1 Einführung



## Verdrahtungsverfahren

### Zweistufige Verdrahtung

#### Global- verdrahtung

Zuordnung der Verdrahtung zu Verdrahtungsregionen  
(Kap. 5)

#### Fein- verdrahtung

Verdrahtung innerhalb der Verdrahtungsregionen  
(Kap. 6)

#### Flächen- verdrahtung

Verdrahtung auf gesamter Layoutfläche ohne vorherige Zuweisung  
(Kap. 7)

#### Spezial- verdrahtung

Verdrahtung der Versorgungs- und Taktnetze  
(Kap. 7)

Die Aufgabe bei der Flächenverdrahtung besteht in der **erfolgreichen Einbettung aller Netze auf technologisch und elektrisch sinnvollen Verdrahtungswegen**, wobei die Layoutfläche in ihrer Gesamtheit betrachtet wird und die Einbettung ohne eine vorherige globale Zuweisung (Globalverdrahtung) erfolgt.

Dabei sind **Randbedingungen** (z.B. Kreuzungsfreiheit) einzuhalten und **Optimierungsziele** (z.B. minimale Verbindungslänge) anzustreben.

Netzliste:

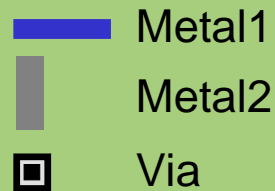
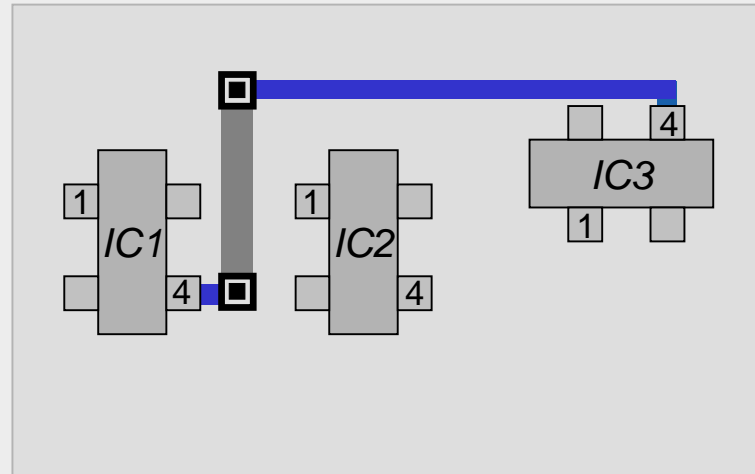
Netze mit den durch sie jeweils zu verbindenden Bauelemente-Anschlüssen, z.B.

$$N_1 = \{IC1\_4, IC3\_4\}$$

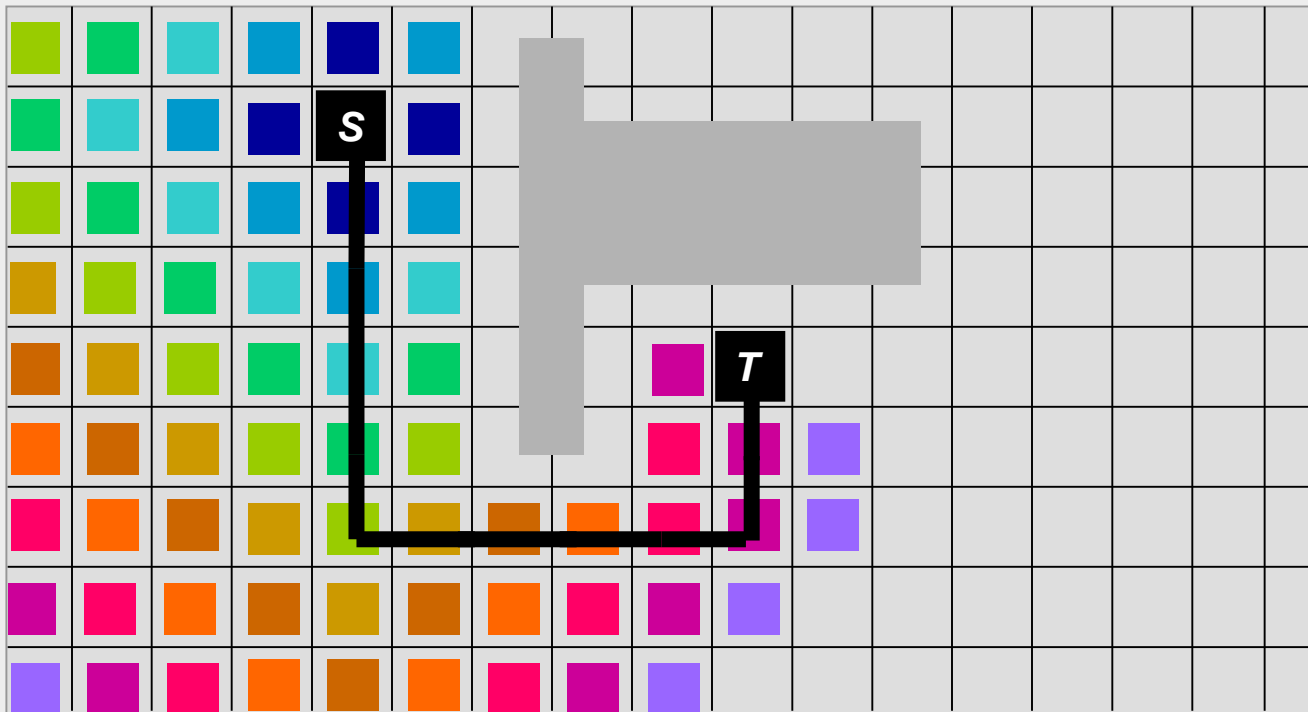
Technologie-Informationen:

Abstandsregeln  
Breitenregeln usw.

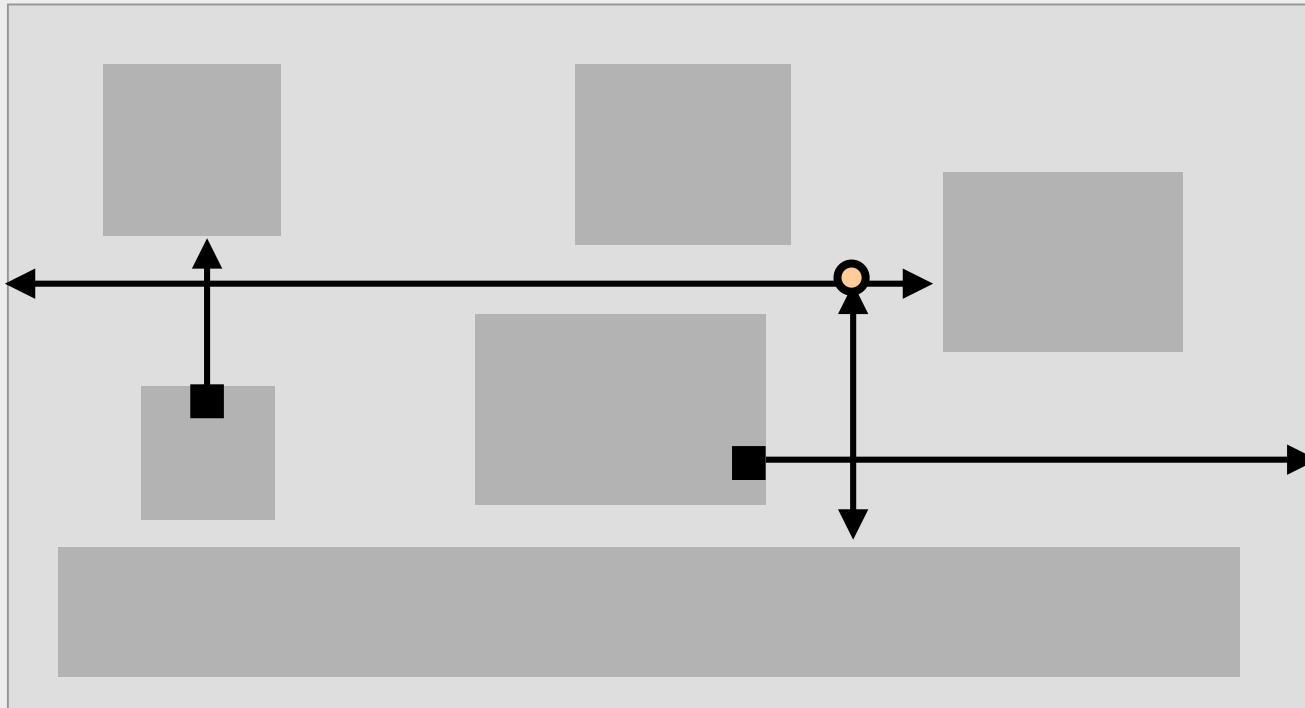
Verdrahtungsergebnis:



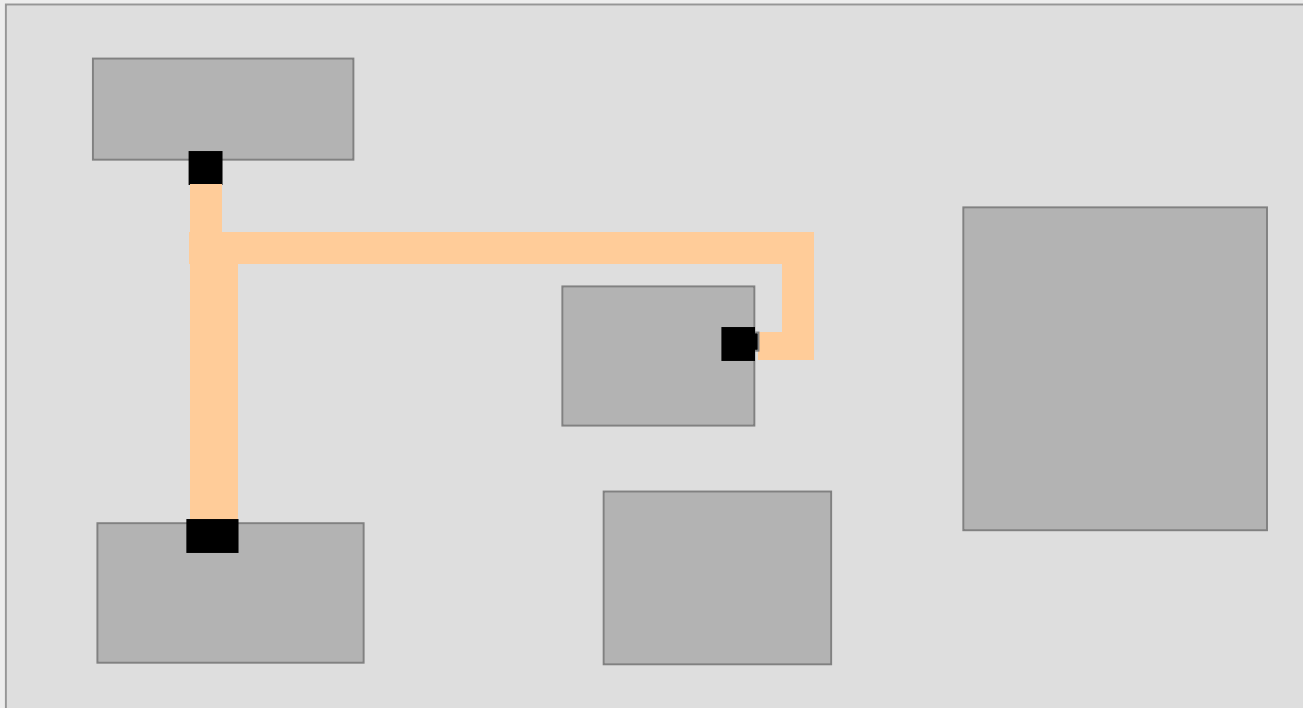
### Rasterverdrahtung bzw. Labyrinthverdrahtung (Grid routing, maze routing)



### Linienverdrahtung (Line probe routing)

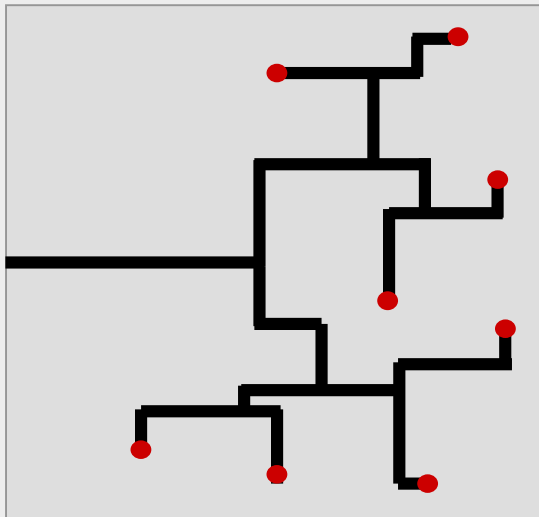


### Rasterunabhängige bzw. rasterfreie Verdrahtung (Shape based routing)

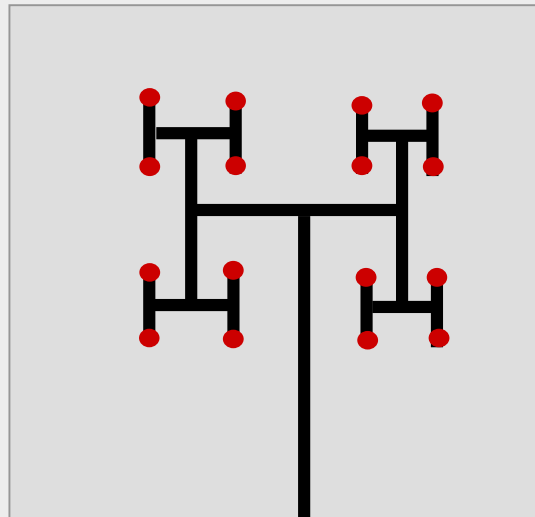




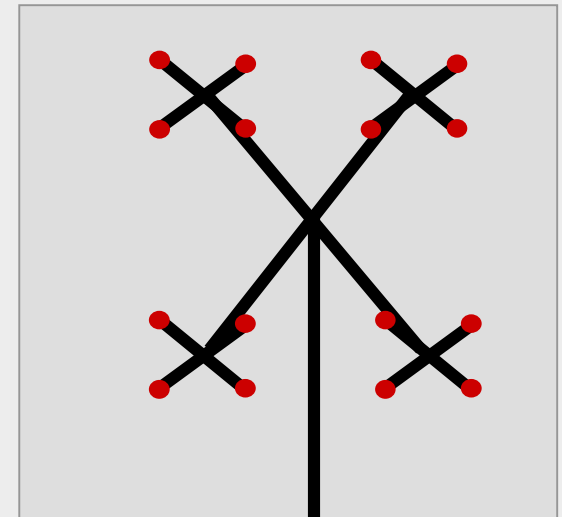
### Verdrahtung der Taktnetze (Clock routing)



Gleichgewichtsbaum  
(Balanced tree)

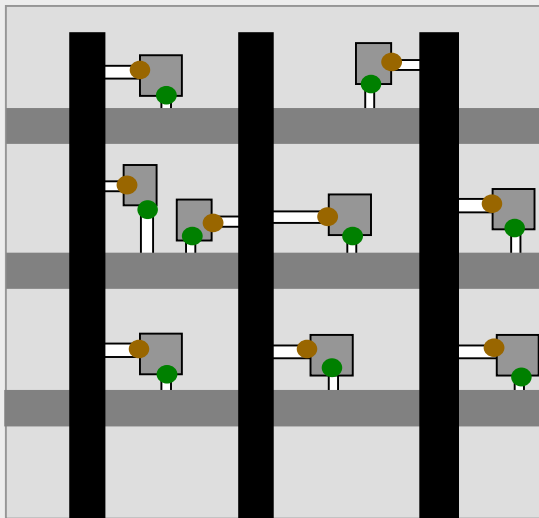


H-Baum (H tree)

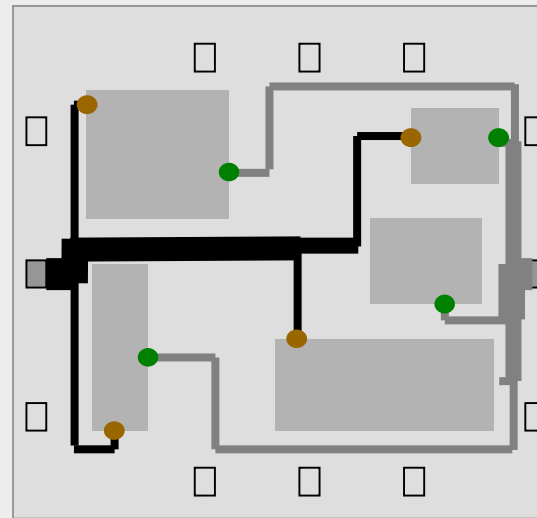


X-Baum (X tree)

### Verdrahtung der Versorgungsnetze (Power routing)

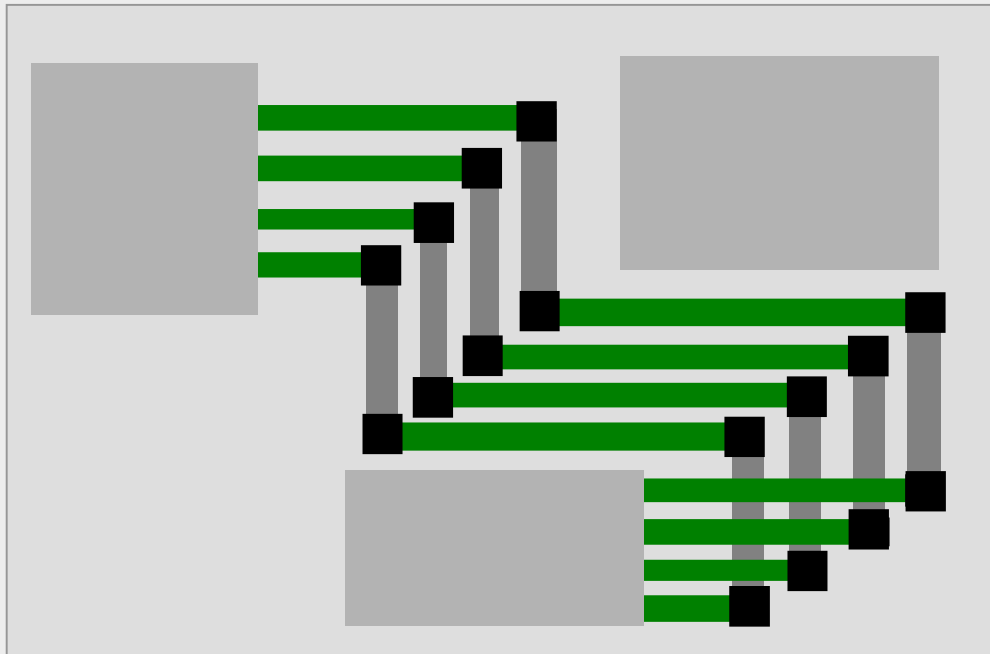


Versorgungsgitter

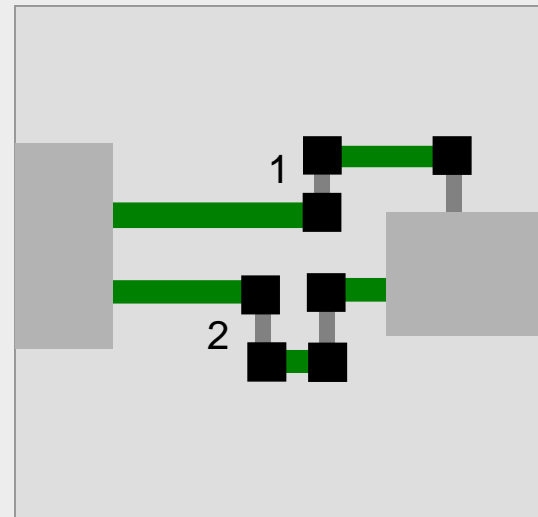
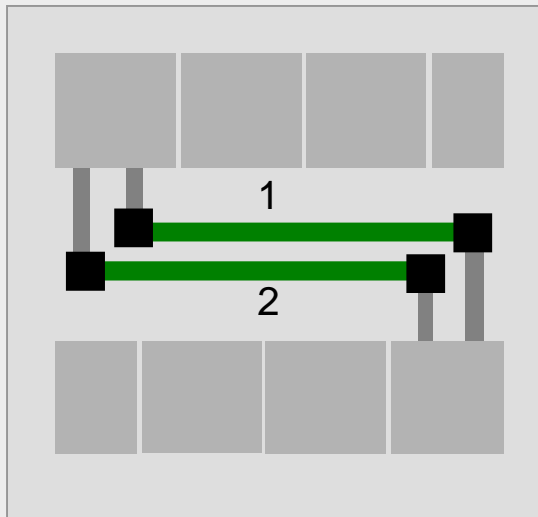


Baumstruktur

### Bus-Verdrahtung (Bus routing)

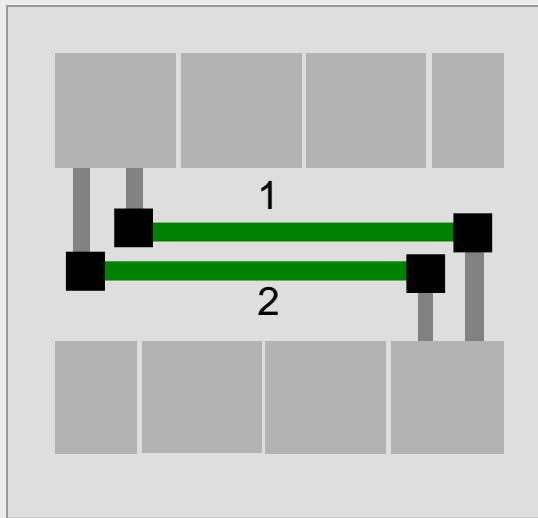


### Symmetrische Signalübertragung (Differential pair routing)



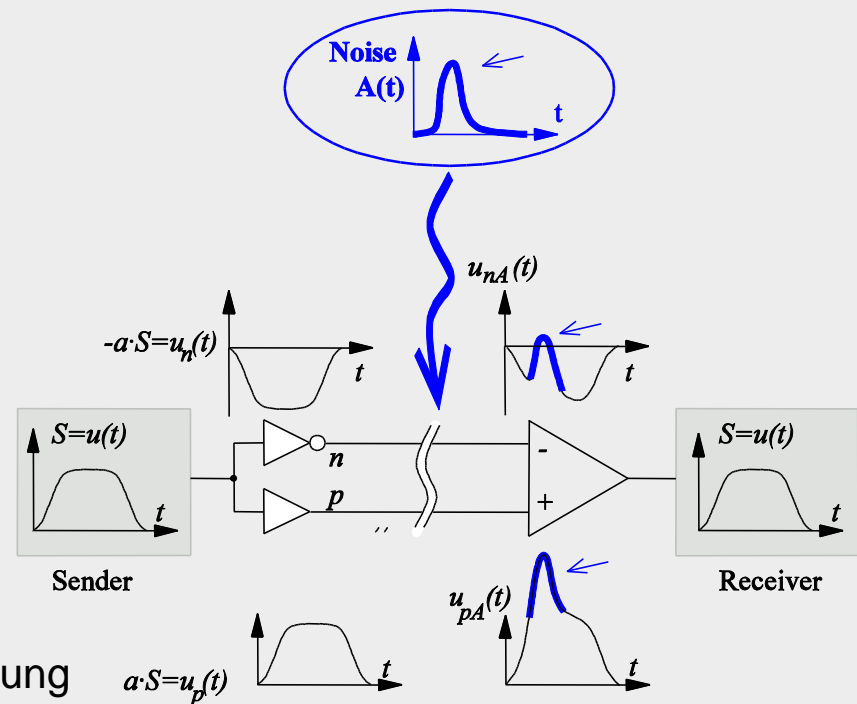
$$(R_1, C_1) = (R_2, C_2)$$

## Symmetrische Signalübertragung (Differential pair routing)



$$(R_1, C_1) = (R_2, C_2)$$

Differenzielle Übertragung



7.1 Einführung

7.2 Begriffsbestimmungen

→ 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

7.4 Manhattan- und euklidische Metrik

7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze

7.6 Optimierungsziele

7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen

7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*

7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung

7.7.3 Linienverdrahtung

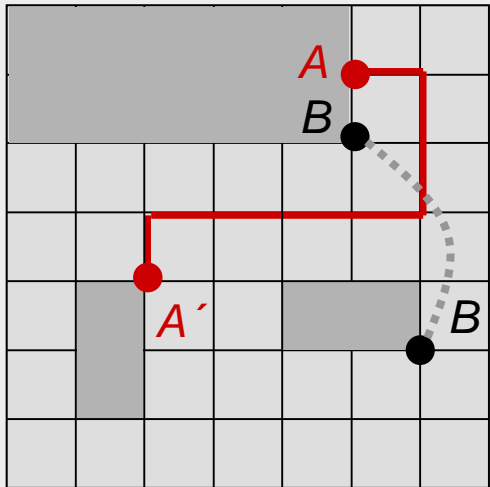
7.8 Quasiparallele Verdrahtung

7.9 Dreidimensionale Verdrahtung

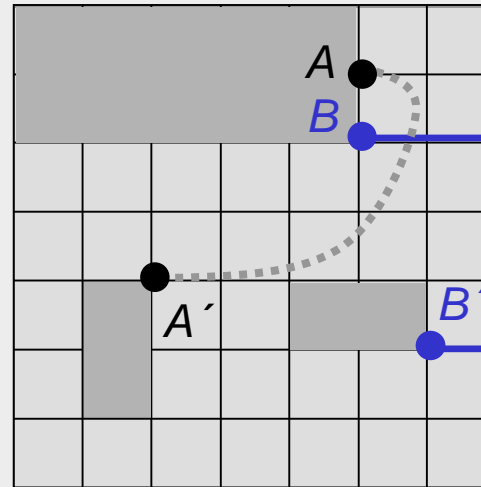
7.10 X-Verdrahtung

- Ein verdrahtetes Netz ist ein Hindernis für die nachfolgend zu verbindenden Netze
- ⇒ Reihenfolge der Netzverdrahtung hat maßgeblichen Einfluss auf den **Verdrahtungserfolg** der einzelnen Netze
- ⇒ Selbst wenn sich alle Netze einzeln verbinden lassen, so kann eine ungünstige Netzreihenfolge dazu führen, dass die Netze nacheinander nicht verdrahtbar sind
- ⇒ Auch ist die erzielte **Verdrahtungsqualität** stark von der Netzreihenfolge abhängig

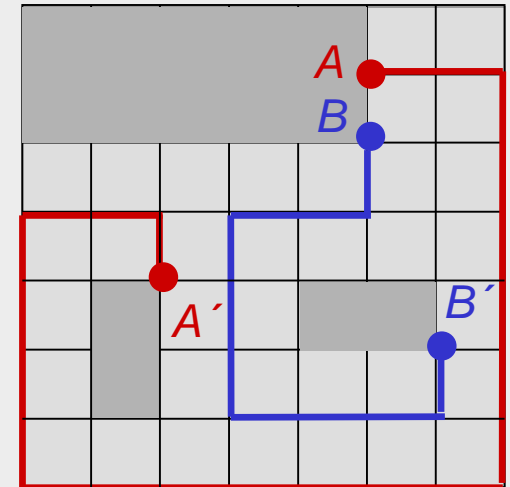
## Verdrahtungserfolg



Vorrangige Verdrahtung  
von Netz *A*



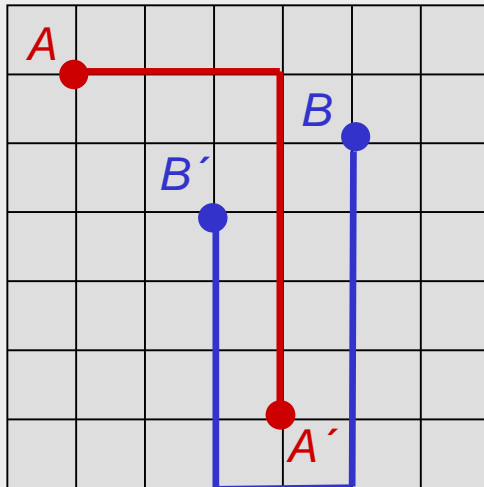
Vorrangige Verdrahtung  
von Netz *B*



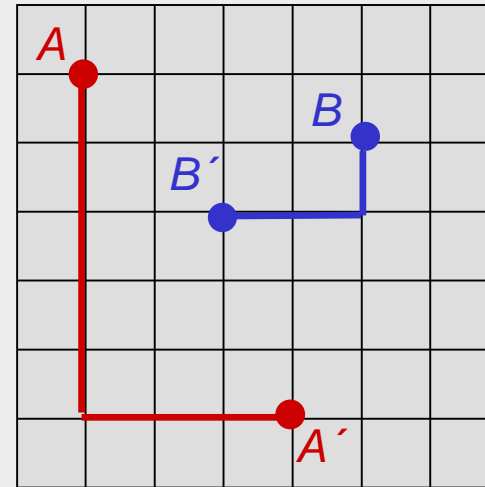
Nicht-optimale  
Verdrahtung beider  
Netze ermöglicht  
Verbindungsrealisierung



## Verdrahtungsqualität



Vorrangige Verdrahtung  
von Netz *A*

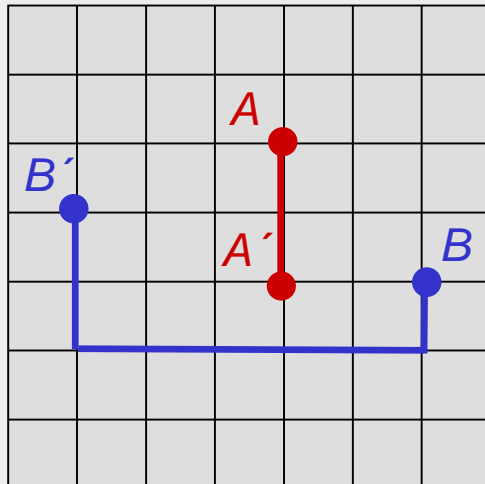


Vorrangige Verdrahtung  
von Netz *B*

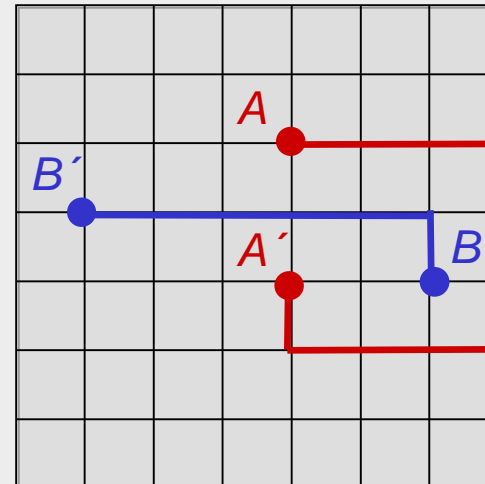
- Für  $n$  Netze ist die Suche nach der optimalen Reihenfolge von der Rechenkomplexität  $O(n!)$ , so dass sich diese Aufgabe einer optimalen algorithmischen Lösung entzieht
- ⇒ Bestimmung der Netzreihenfolge oft nach zuvor festgelegten **Regeln**

## 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

- **Regel 1:** Verdrahtung von Netz  $N_j$  vor  $N_k$ , falls  $L_j < L_k$ , d.h. kürzere Netze werden zuerst verbunden.
- **Regel 2:** Verdrahtung von Netz  $N_j$  vor  $N_k$ , falls  $L_j > L_k$ , d.h. längere Netze werden zuerst verbunden.



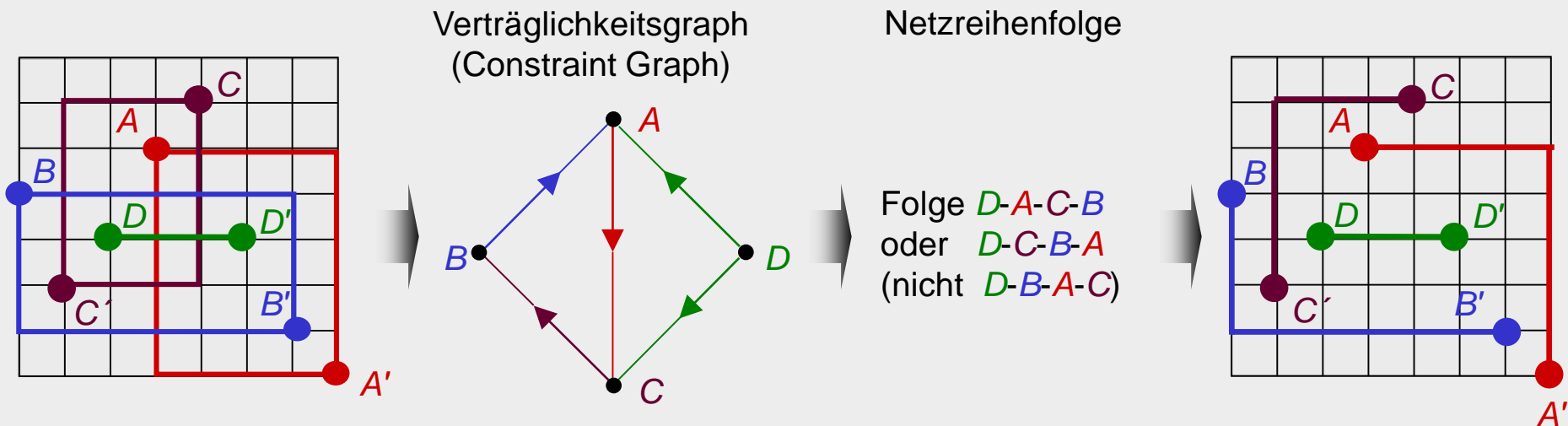
Vorrangige Verdrahtung  
kürzerer Netze



Vorrangige Verdrahtung  
längerer Netze

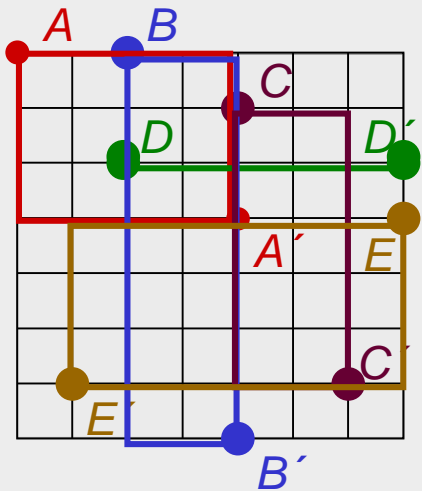
## 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

- Regel 3:** Verdrahtung von Netz  $N_j$  vor  $N_k$ , falls Einzelpins von  $N_j$  ( $P \in N_j$ ) innerhalb des minimal umschließenden Rechtecks MR ( $N_k$ ) des Netzes  $N_k$  liegen

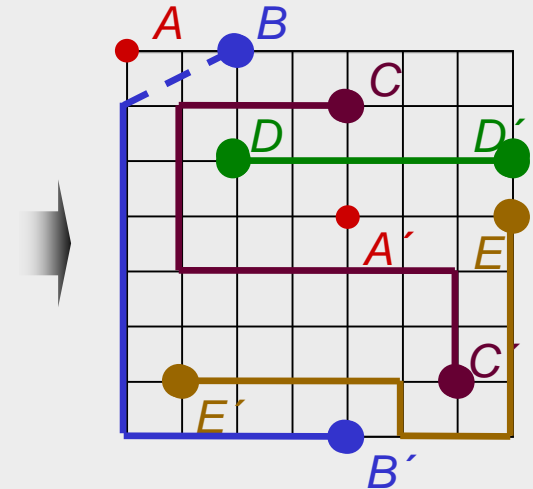


## 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

- Regel 4:** Verdrahtung von Netz  $N_j$  vor  $N_k$ , falls  $\pi(N_j) < \pi(N_k)$ , mit  $\pi(N_k)$  Anzahl der Pins in MR ( $N_k$ ), d.h. es ist das Netz vorrangig zu verdrahten, welches die wenigsten Pins anderer Netze innerhalb seines minimal umschließenden Rechtecks MR hat.



	Pins Innen (Rand)	$\pi(N)$
MR (A)	D (B,C)	3
B	- (A,C,D)	3
C	- (A)	1
D	- (-)	0
E	- (A,C)	2



- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 **Manhattan- und euklidische Metrik**
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung

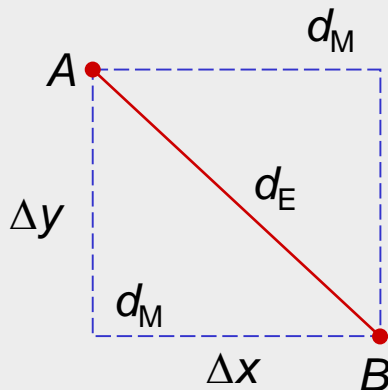
Die Abstandsfunktion in der Ebene für zwei Punkte  $(x_1, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  ist definiert mit


$$d = \sqrt[n]{|x_2 - x_1|^n + |y_2 - y_1|^n}, \text{ wobei}$$

$$n \begin{cases} = 1 & \text{Manhattan-Metrik} \\ & \text{(Rectilinear/Manhattan metric)} \\ = 2 & \text{Euklidische Metrik} \\ & \text{(Euclidian/Boston metric)}. \end{cases}$$

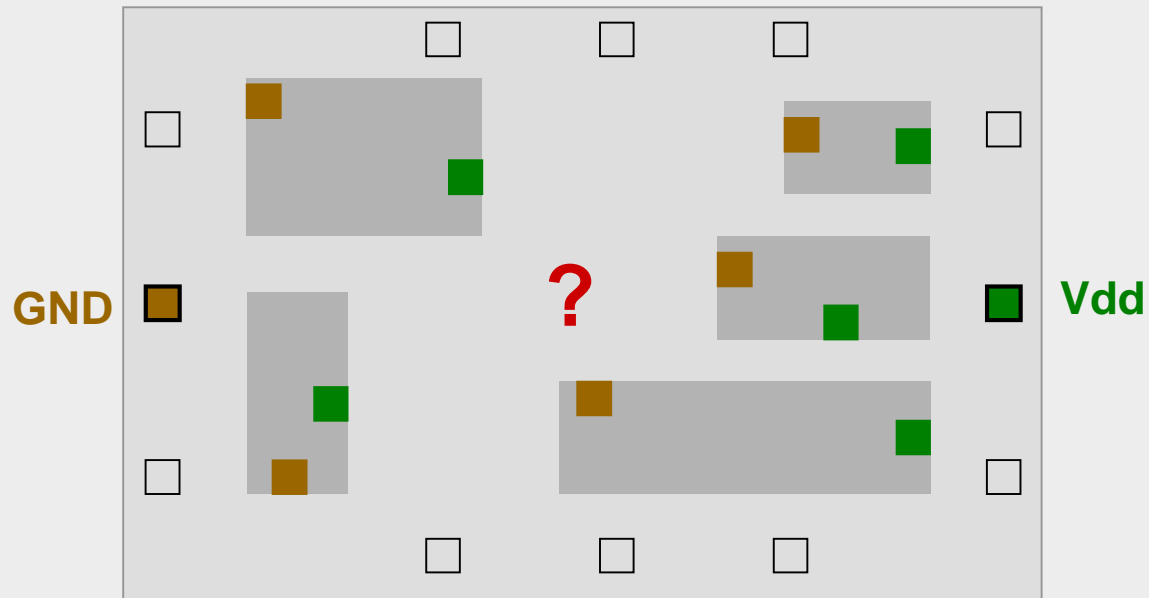
$$d_M = |\Delta x| + |\Delta y|,$$

$$d_E = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}.$$



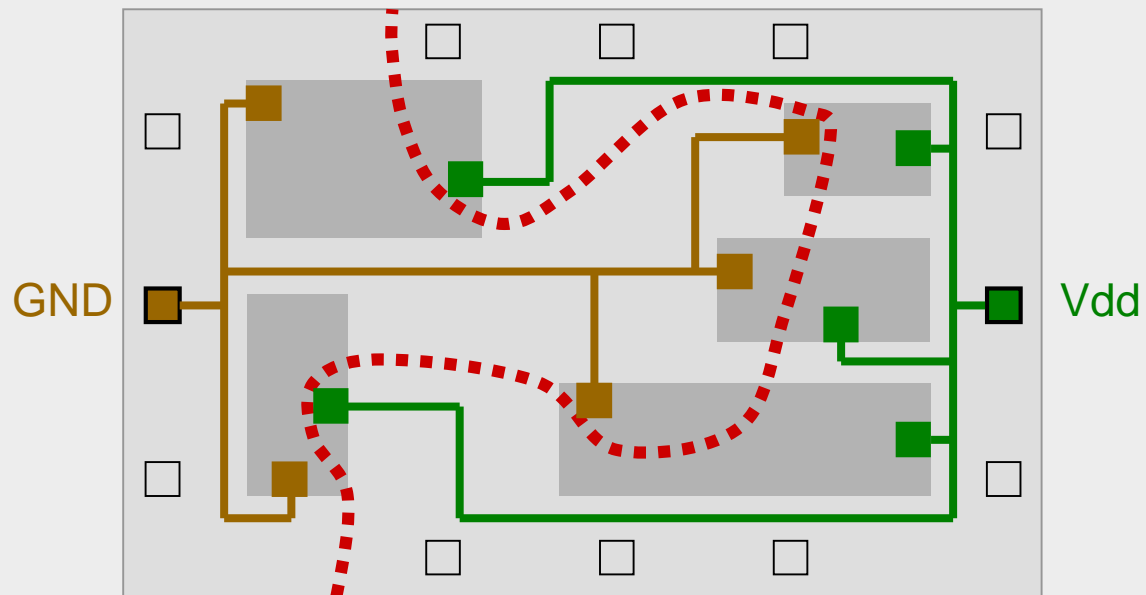
- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
-  7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung





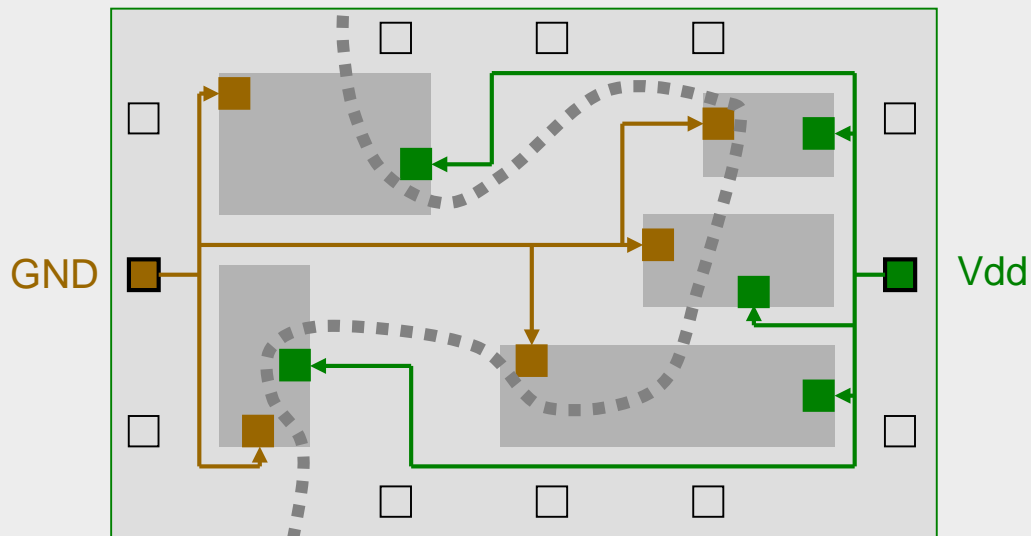
- Die Verdrahtung der Versorgungs- und Masseleitungen ist in einer Ebene unter folgenden Voraussetzungen immer möglich:
  - Jede Zelle hat nur jeweils einen Anschlusspunkt für Vdd und GND
  - Zellenabstand ist immer ausreichend für die Verdrahtung beider Netze zwischen den Zellen
- Nutzung einer **Hamiltonschen Linie**, die durch alle Zellen derart verläuft, dass die Anschlüsse des einen Netzes immer links und die des anderen Netzes immer rechts liegen

## Hamiltonsche Linie



**Schritt 1:** Planar-topologische Darstellung der Netze

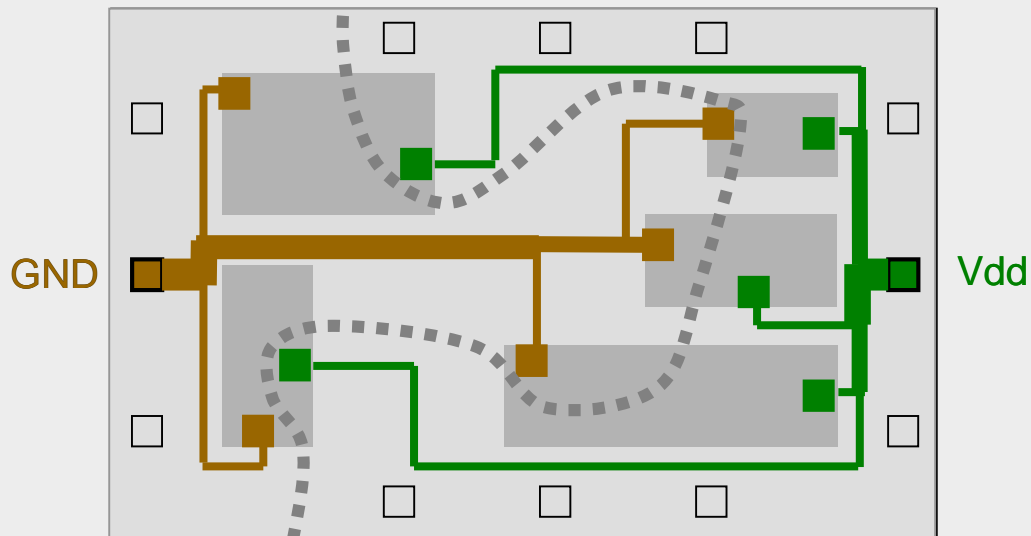
- Unter Beachtung der Hamiltonschen Linie sind zwei Bäume zu generieren, einer vom linken und der andere vom rechten Schaltungsrand
- Die Verdrahtungswege richten sich nach den Pinanschlüssen, wobei diese, vom Abstand zum linken bzw. rechten Schaltungsrand ausgehend, streng nacheinander angeschlossen werden.



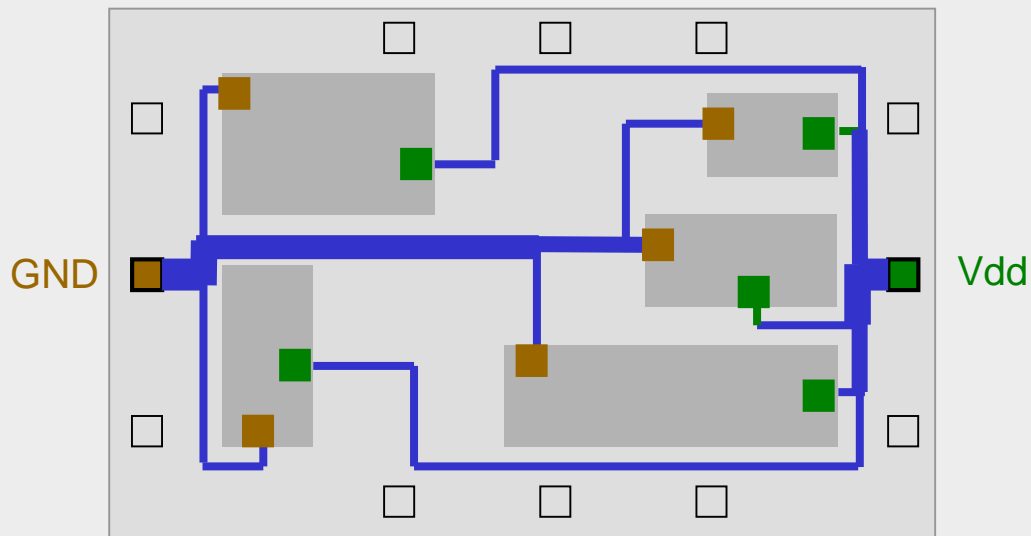
**Schritt 1:** Planar-topologische Darstellung der Netze


**Schritt 2:** Breitenberechnung der Netzsegmente

- Die Breiten der einzelnen Netzsegmente ergeben sich aus den maximalen Segmentströmen
- An Segmente angeschlossenen Zellen-Stromwerten sind dazu aufzuaddieren
- Umrechnen der segmentbehafteten Stromwerte in Breitenangaben für die einzelnen Baumsegmente



- Schritt 1:** Planar-topologische Darstellung der Netze
- Schritt 2:** Breitenberechnung der Netzsegmente
- Schritt 3:** Einbettung der Netzsegmente in die Verdrahtungsebene



- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
-  **7.6 Optimierungsziele**
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung

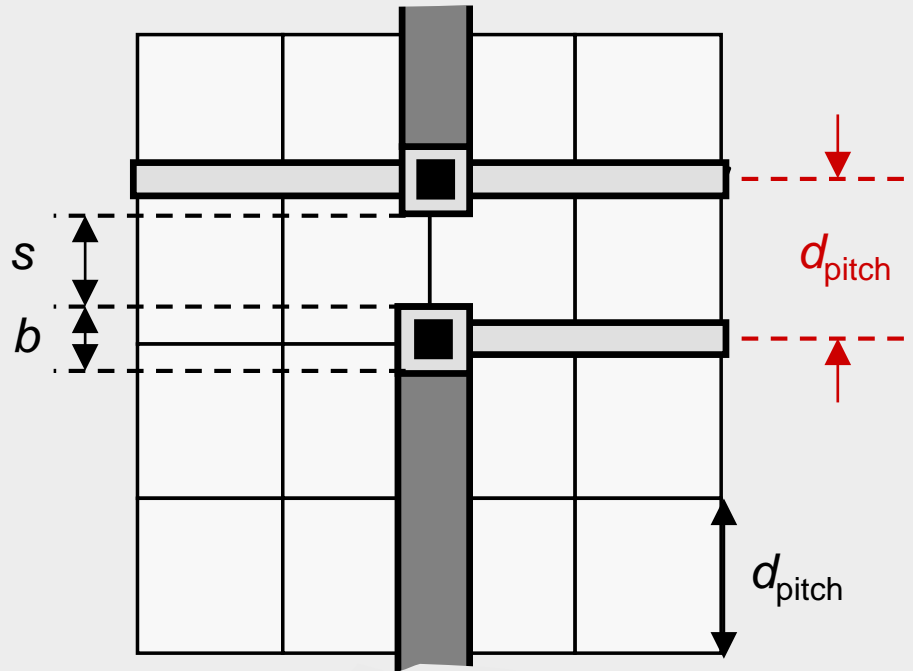
- Das wesentliche Ziel bei der Flächenverdrahtung besteht in der elektrisch und technologisch gültigen Verbindung aller Netze einer Schaltung entsprechend der Netzliste.
- Oft noch weitere Ziele, z.B.
  - Minimierung der Gesamtverbindungslänge bzw. der Netzlänge des jeweils längsten Netzes
  - Minimierung der Viaanzahl
  - Minimierung der für die Verdrahtung benötigten Fläche und Ebenenanzahl
  - Gleichverteilung der Verdrahtungsdichte
  - Vermeidung von Kopplungen zwischen benachbarten Leitungen.



- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen**
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung

	<i>Lee (1961)</i>	<i>Müller (1990)</i>	<i>Hightower (1969)</i>
Methode	Rasterverdrahter	Rasterverdrahter	Linienverdrahter
Algorithmus	Breadth-First-Search im Gitter	Best-First-Search im Gitter	Depth-First-Search in der Ebene
Vorteile	Lösungsgarantie	Optimaler Weg bzgl. mehrerer Kriterien	Schnell, wenig Richtungswechsel
Nachteile	Langsam	Langsam	Keine Lösungsgarantie
Anwendung	Viele Hindernisse, d.h. für letzte zu verdrahtende Netze	Kritische Netze, mehrere Optimierungskriterien	Wenig Hindernisse, d.h. für erste zu verdrahtende Netze

## 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee



$s$  ... minimaler Abstand

$b$  ... maximale Breite des Leiterzuges bzw. Vias

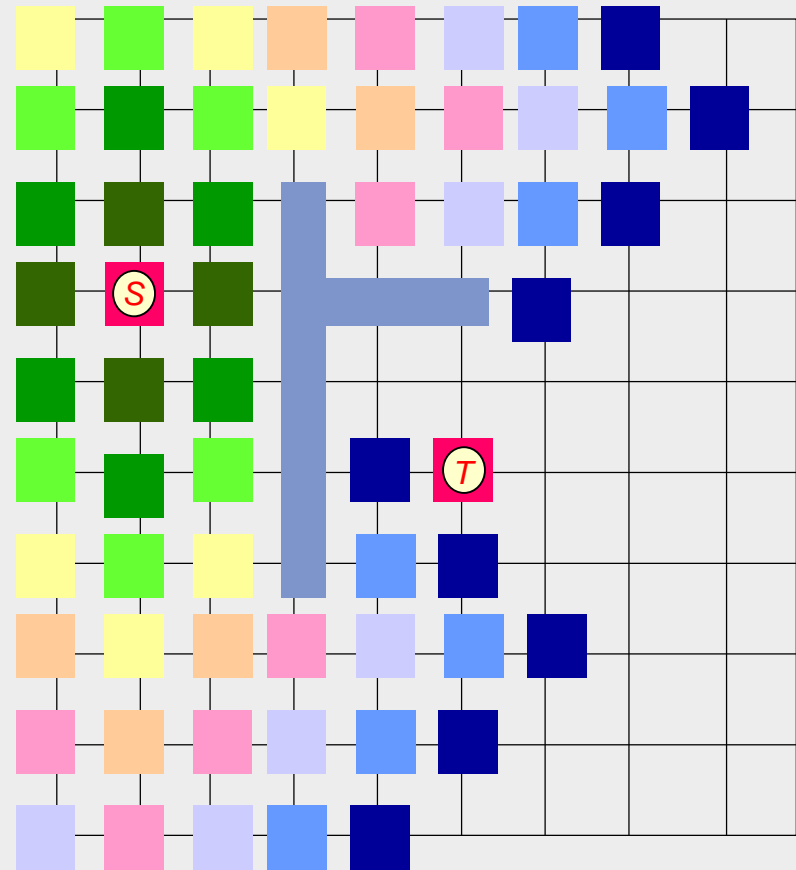
Rasterabstand:  $s + b = d_{pitch}$

## 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee

- 1961 von *Lee* vorgestellt
- Findet immer einen Weg zwischen zwei Punkten, sofern ein derartiger Weg existiert
- Auch ist garantiert, dass der gefundene Weg der kürzest mögliche ist

### Ablauf:

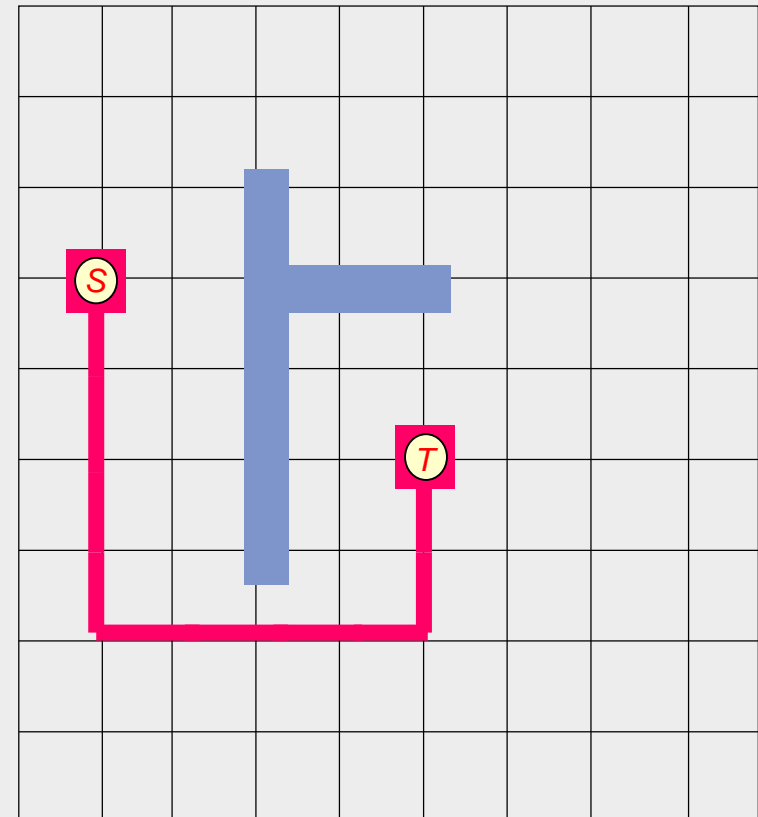
1. Wellenausbreitung von Start- zum Zielpunkt





### Ablauf:

1. Wellenausbreitung von Start- zum Zielpunkt
2. Rückverfolgung
3. Aufräumphase



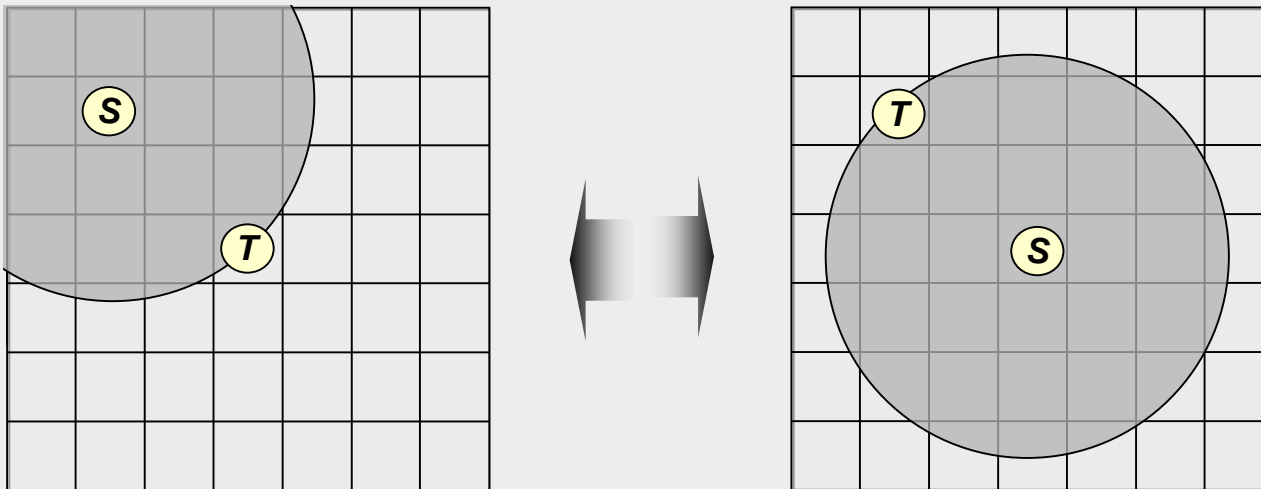
### Lee-Algorithmus

Auswahl der Rasterpunkte für Start ( $S$ ) und Ziel ( $T$ ).

1. Ausbreitungsphase von  $S$  nach  $T$ .  
Indizieren aller freien Nachbarpunkte des Rasterpunktes  $i$  mit  $i+1$ , beginnend bei  $S$  mit Index 0 und so lange fortfahrend, bis  $T$  indiziert ist oder keine Indizierungen mehr möglich sind. Im letzteren Fall ABBRUCH.
2. Rückverfolgungsphase von  $T$  nach  $S$ .  
Iteratives Rückverfolgen des Verdrahtungsweges vom jeweiligen Rasterpunkt  $i$  zum Punkt  $i-1$ , beginnend bei  $T$  und endend bei  $S$ , wobei Richtungsänderungen zu minimieren sind.
3. Markieren der Rasterpunkte des Verdrahtungsweges als belegt, Löschen aller Indizierungen. ENDE.

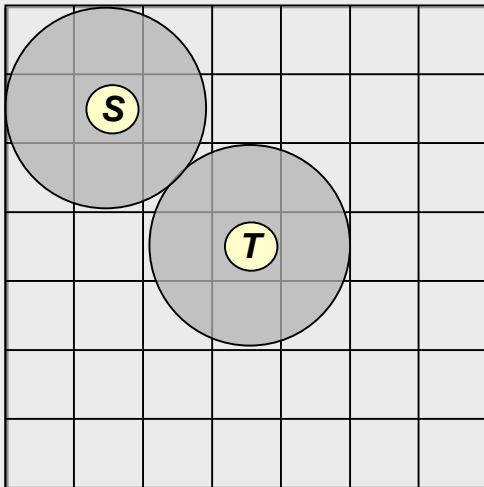


## Einsparung von Rechenzeit



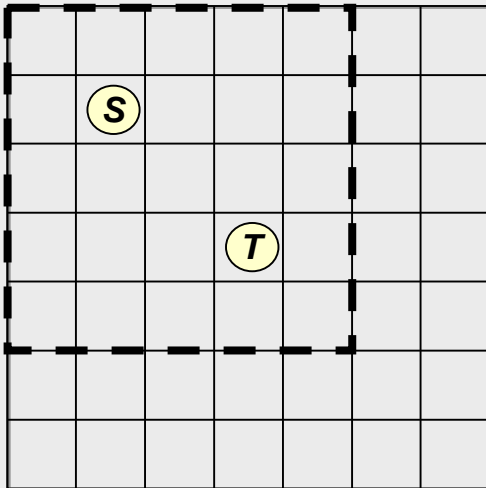
Geeignete Auswahl des Startpunktes

### Einsparung von Rechenzeit



Gleichzeitige Ausbreitung (Double fan-out)

### Einsparung von Rechenzeit



Suchraum-Begrenzung (Framing)

### Einsparung von Speicherplatz

2	1	2	3			
1	<b>S</b>	1	2			
2	1	2	3			
		3	1	2	3	
		1	2	3		
		2	3	<b>T</b>		
		3				

1,2,3-Sequenz

⇒ drei Bit pro Rasterpunkt

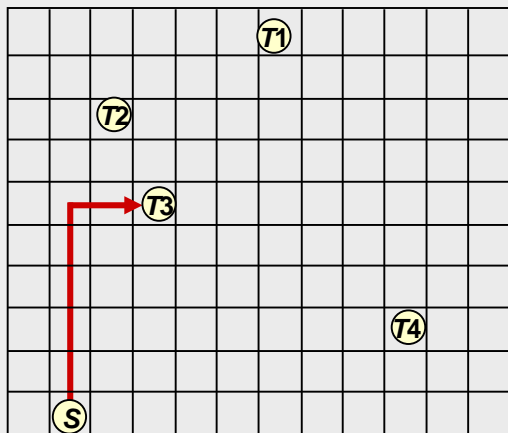
### Einsparung von Speicherplatz

1	1	1	2			
1	<b>S</b>	1	1			
1	1	1	2			
		2	2	1	1	
		2	1	1		
		1	1	<b>T</b>		
		1				

1,1,2,2-Sequenz

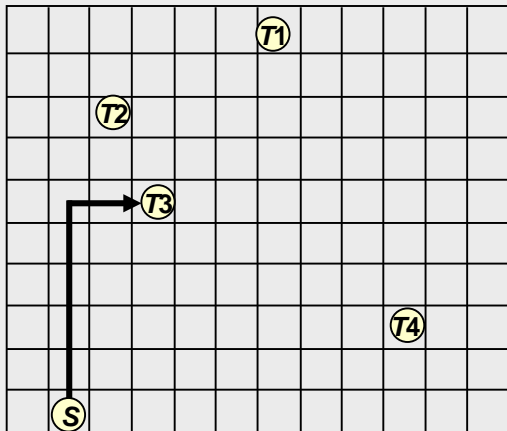
⇒ zwei Bit pro Rasterpunkt

### Verbindung von Multi-Pin-Netzen

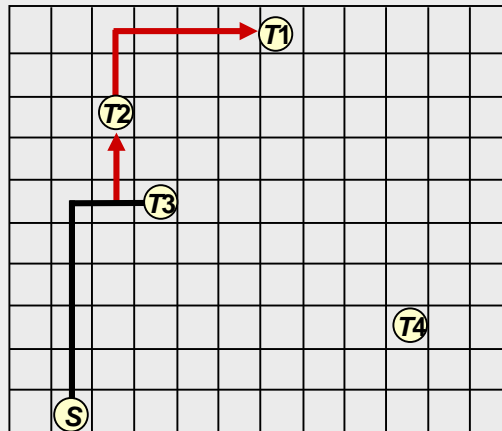


Verbindung S-T3

### Verbindung von Multi-Pin-Netzen

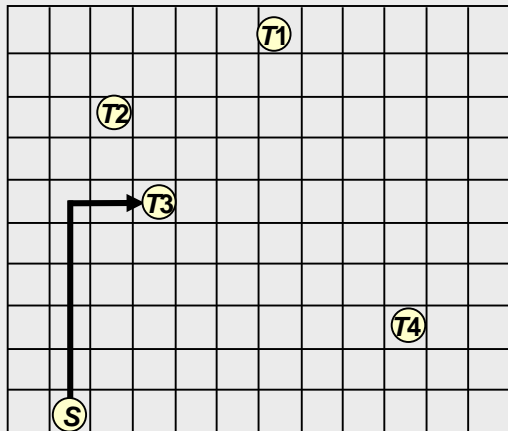


Verbindung S-T3

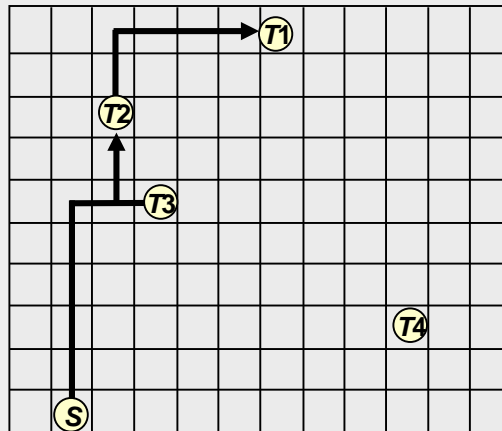


Anschluss T2, T1

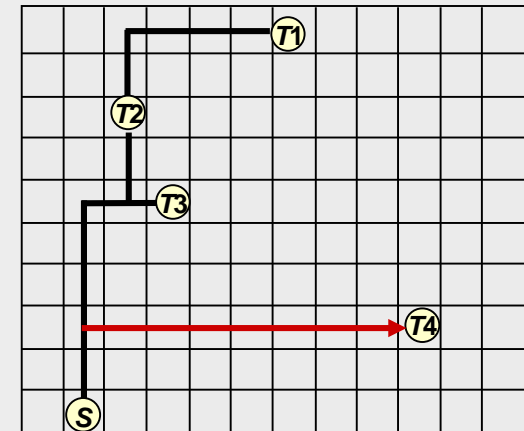
## Verbindung von Multi-Pin-Netzen



Verbindung S-T3



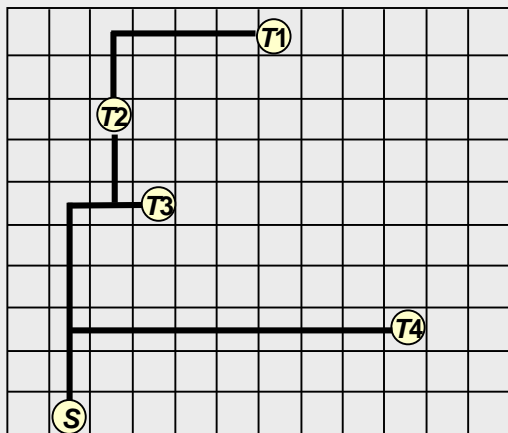
Anschluss T2, T1



Anschluss T4

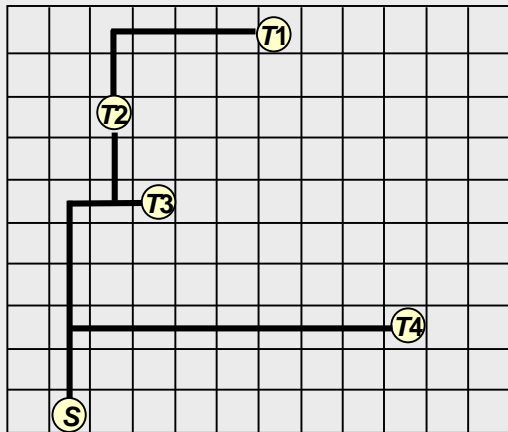


### Verbindungsoptimierung

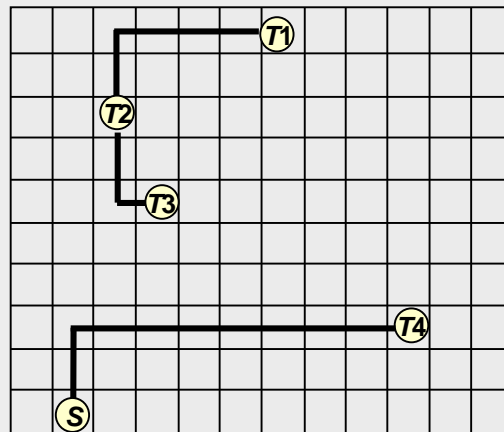


Originale Netzverbindung

## Verbindungsoptimierung



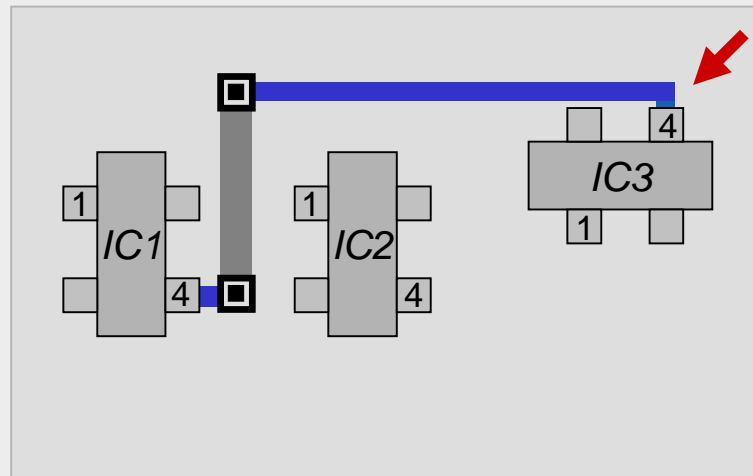
Originale Netzverbindung



Auftrennung in Teilnetze



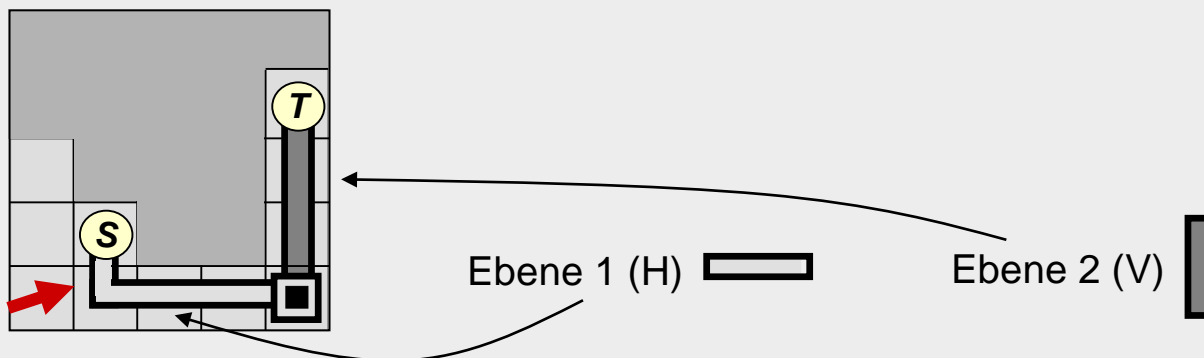
## 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung



Vorzugsrichtungen

## 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung

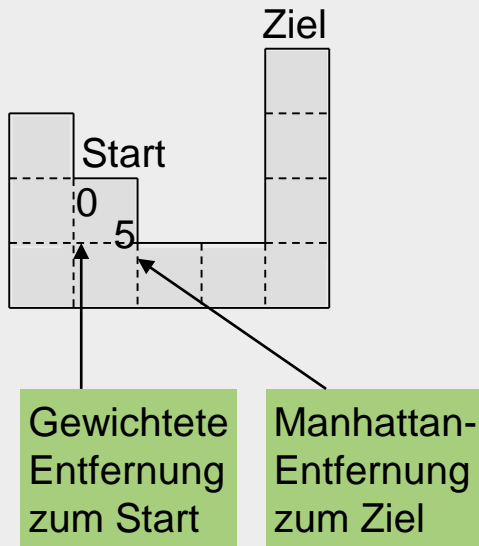
- Optimierte Wegsuche hinsichtlich Wegkosten, welche die Vorzugsrichtungen in den einzelnen Ebenen sowie Kosten für Vias berücksichtigen und gegeneinander abwägen
- ⇒ Damit Ebenenwechsel kostenoptimiert, nämlich nur dann, wenn die durch Verlegung in Vorzugsrichtung niedrigeren Kosten die aufgrund eines damit verbundenen Ebenenwechsels notwendigen Viakosten kompensieren
- ⇒ Einhaltung von Vorzugsrichtungen von der jeweiligen Segmentlänge abhängig, d.h. kurze Segmente toleriert man auch auf der Ebene mit einer dem Segment entgegengesetzten Vorzugsrichtung



- Während der Wegsuche werden jedem Rasterpunkt  $\alpha$  zwei Bewertungskriterien  $d_w(\alpha)$  und  $d_m(\alpha)$  zugeordnet:
  - Die **Wegkosten**  $d_w(\alpha)$  des Rasterpunktes  $\alpha$ , die seine gewichtete Entfernung zum Start verkörpern.  
Einbezogenen Faktoren: horizontale und vertikale Abstandsgewichtungen in der Verdrahtungsebene  $z$ , d.h.  $w_h(z)$  und  $w_v(z)$ , sowie Viakosten  $w_{via}$ .
  - Die **Zielentfernung**  $d_m(\alpha)$ , welche die Manhattan-Entfernung des Rasterpunktes  $\alpha$  zum Ziel angibt.
- Der Rasterpunkt  $\alpha_i$  mit minimaler Summe  $d_w(\alpha_i) + d_m(\alpha_i)$  indiziert jeweils seine Nachbarn. Gibt es hier mehrere Rasterpunkte  $\alpha_i$ , so ist der Punkt mit minimaler Manhattan-Entfernung zum Ziel zu nehmen.
- Rückverfolgung nach Zielerreichung

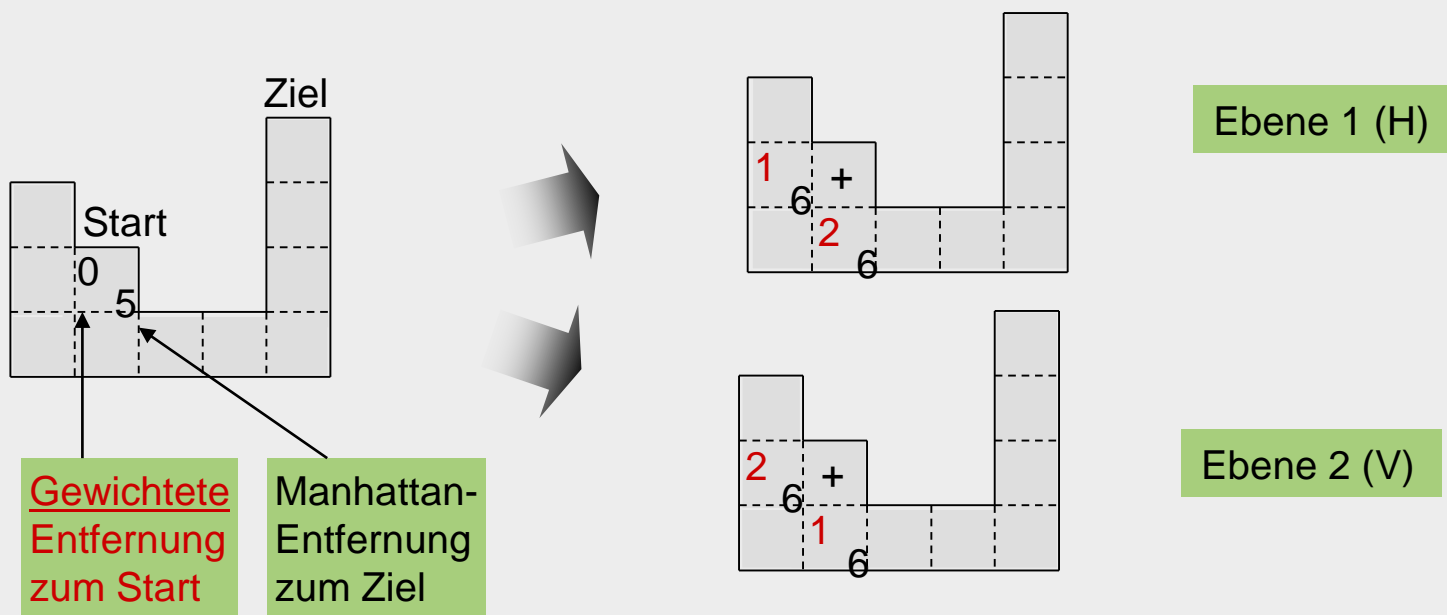
## 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

- Die Start- und Ziel-Rasterpunkte  $S$  und  $T$  sind jeweils auf beiden Ebenen vorhanden.
- In jedem Rasterpunkt sind die gewichtete Entfernung zum Start (**Wegkosten**) und die Manhattan-Entfernung zum Ziel (**Zielentfernung**) angegeben



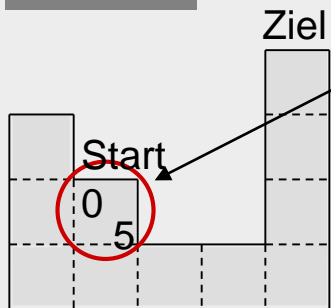
## 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

- Für Ermittlung der **Wegkosten** (gewichtete Entfernung zum Start) notwendigen Faktoren der horizontalen und vertikalen Abstandsgewichtung:
    - $w_h(\text{Ebene 1}) = 1$ ,  $w_v(\text{Ebene 1}) = 2$ ,
    - $w_h(\text{Ebene 2}) = 2$ ,  $w_v(\text{Ebene 2}) = 1$ ,
    - $w_{\text{via}} = 1$
- ⇒ Erste Ebene mit horizontaler und zweite Ebene mit vertikaler Vorzugsrichtung



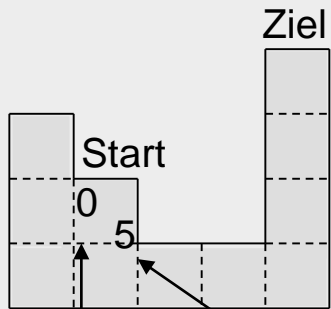


Schritt 1:



Punkt, der seine Nachbarn als nächstes indiziert

Ebene 1 (H)



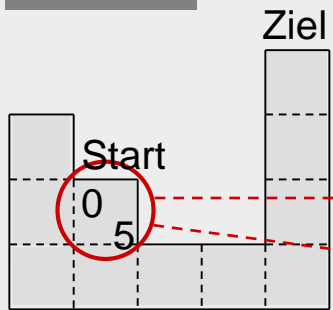
Ebene 2 (V)

Gewichtete  
Entfernung  
zum Start

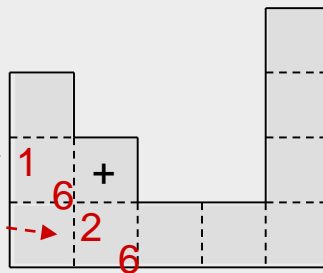
Manhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

# 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

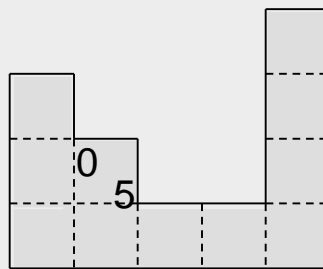
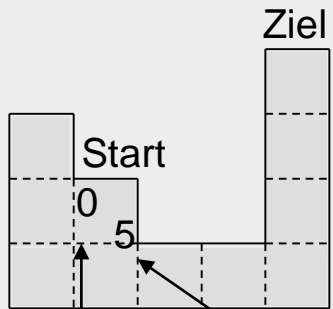
Schritt 1:



Schritt 2:



Ebene 1 (H)



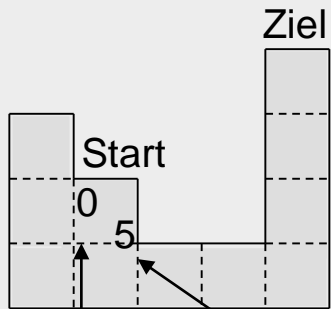
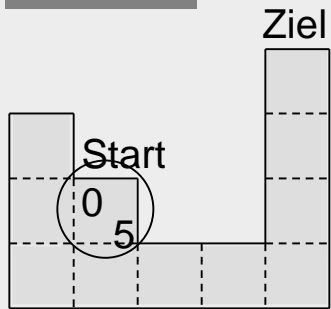
Ebene 2 (V)

Gewichtete  
Entfernung  
zum Start

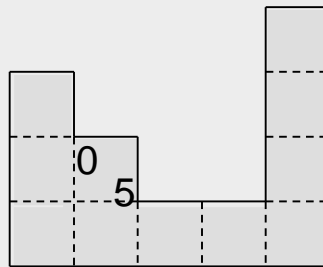
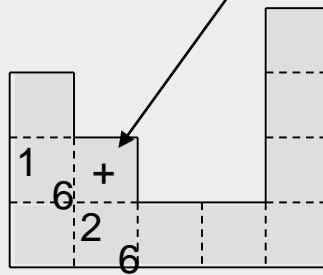
Manhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

Schritt 1:

Gewichtete  
Entfernung  
zum StartManhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

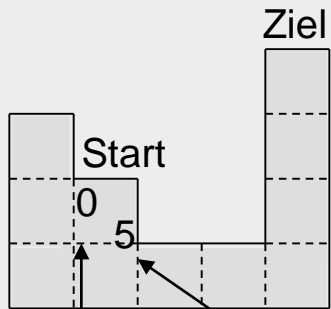
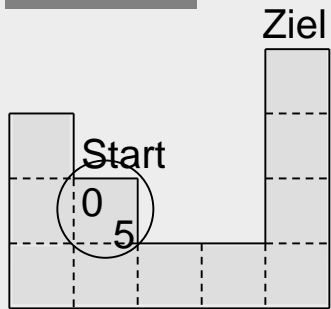
Schritt 2:

Ehemaliger Punkt mit minimaler Summe  
(möglicher Rückverfolgungsweg)

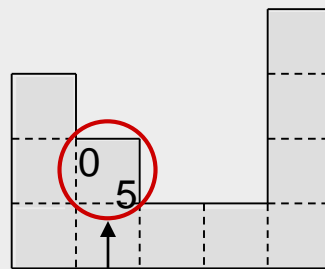
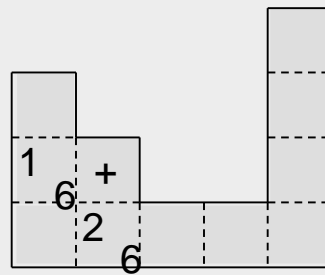
Ebene 1 (H)

Ebene 2 (V)

Schritt 1:

Gewichtete  
Entfernung  
zum StartManhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

Schritt 2:

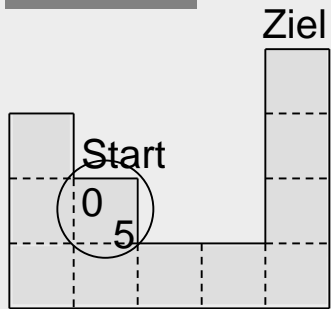


Ebene 1 (H)

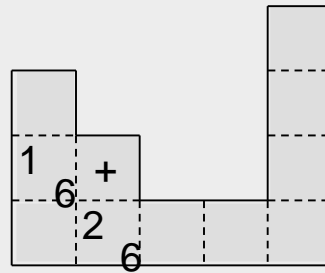
Ebene 2 (V)

Aktueller Punkt mit minimaler Summe, der  
seine Nachbarn als nächstes indiziert ?

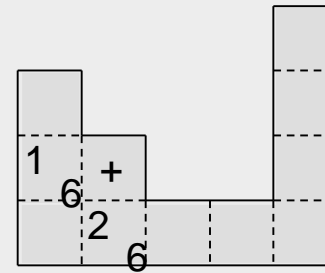
Schritt 1:



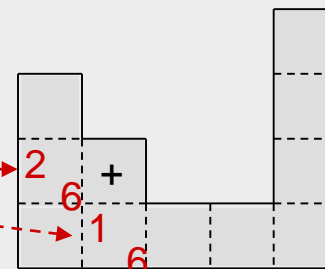
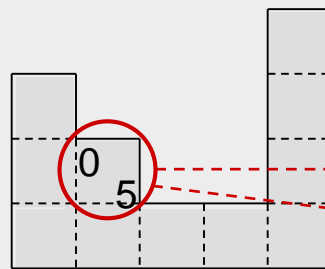
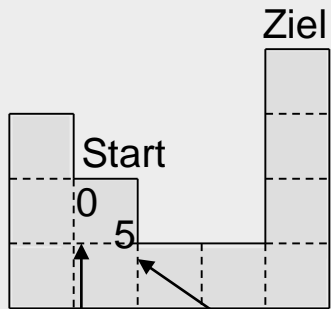
Schritt 2:



Schritt 3:



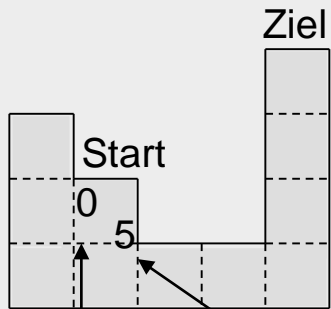
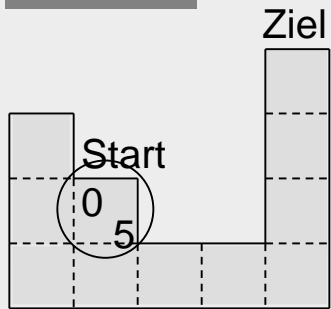
Ebene 1 (H)



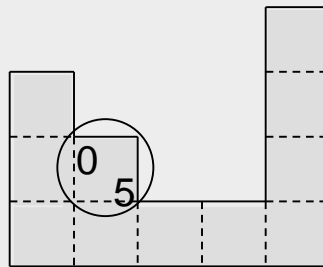
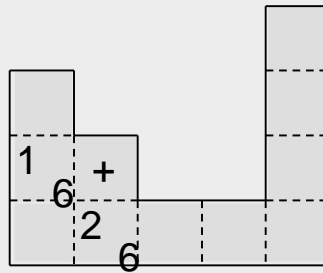
Ebene 2 (V)

Gewichtete  
Entfernung  
zum StartManhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

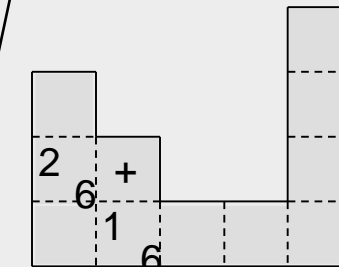
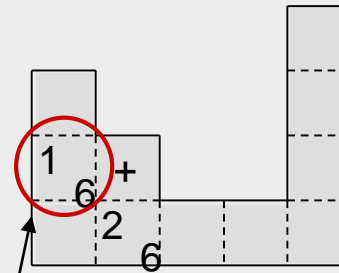
Schritt 1:

Gewichtete  
Entfernung  
zum StartManhattan-  
Entfernung  
zum Ziel

Schritt 2:



Schritt 3:

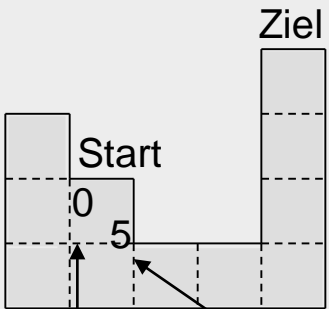
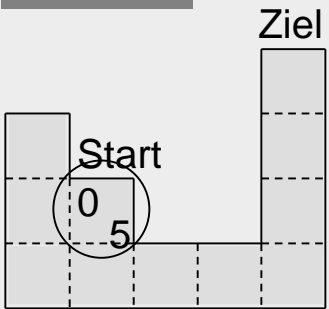


Ebene 1 (H)

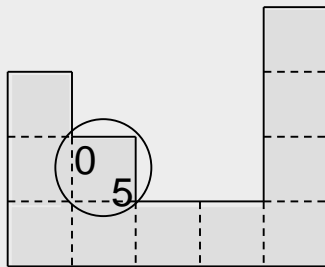
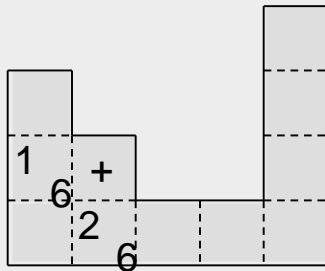
Ebene 2 (V)

Aktueller Punkt mit minimaler Summe, der  
seine Nachbarn als nächstes indiziert ?

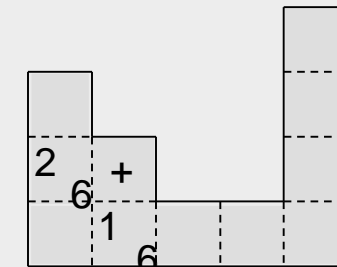
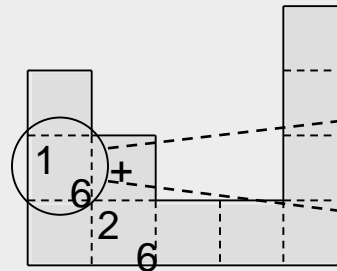
Schritt 1:



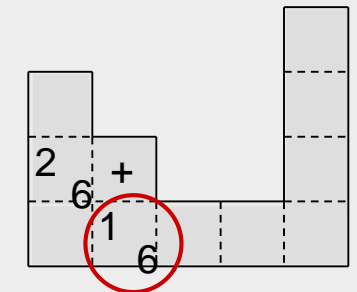
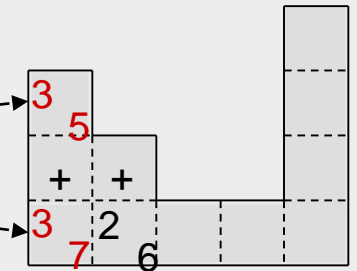
Schritt 2:



Schritt 3:



Schritt 4:



Ebene 1 (H)

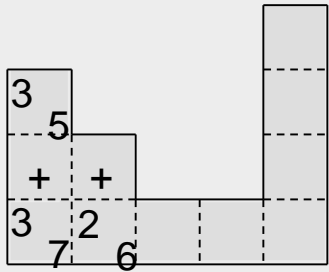
Ebene 2 (V)

Gewichtete Entfernung zum Start

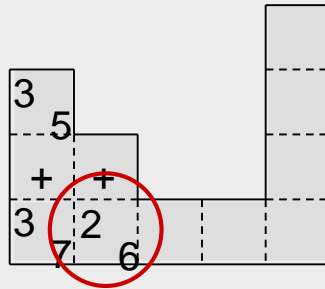
Manhattan-Entfernung zum Ziel

Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

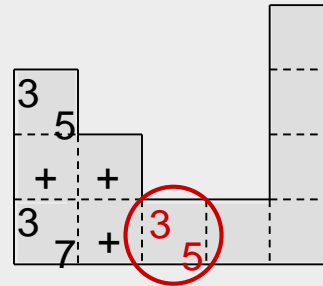
Schritt 5:



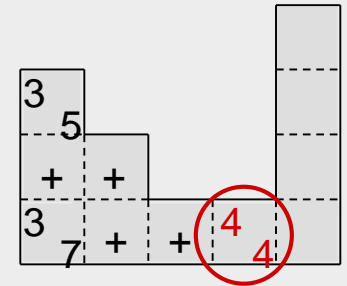
Schritt 6:



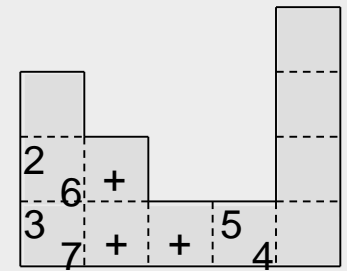
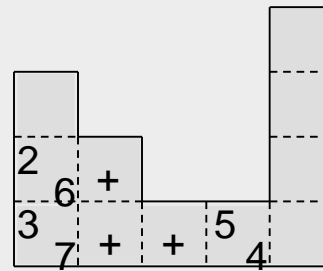
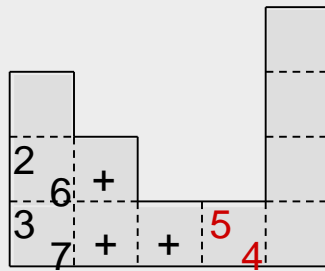
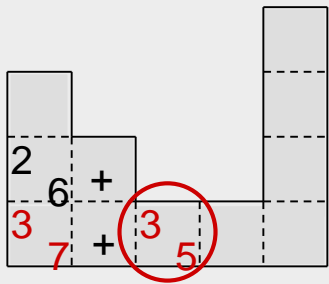
Schritt 7:



Schritt 8:



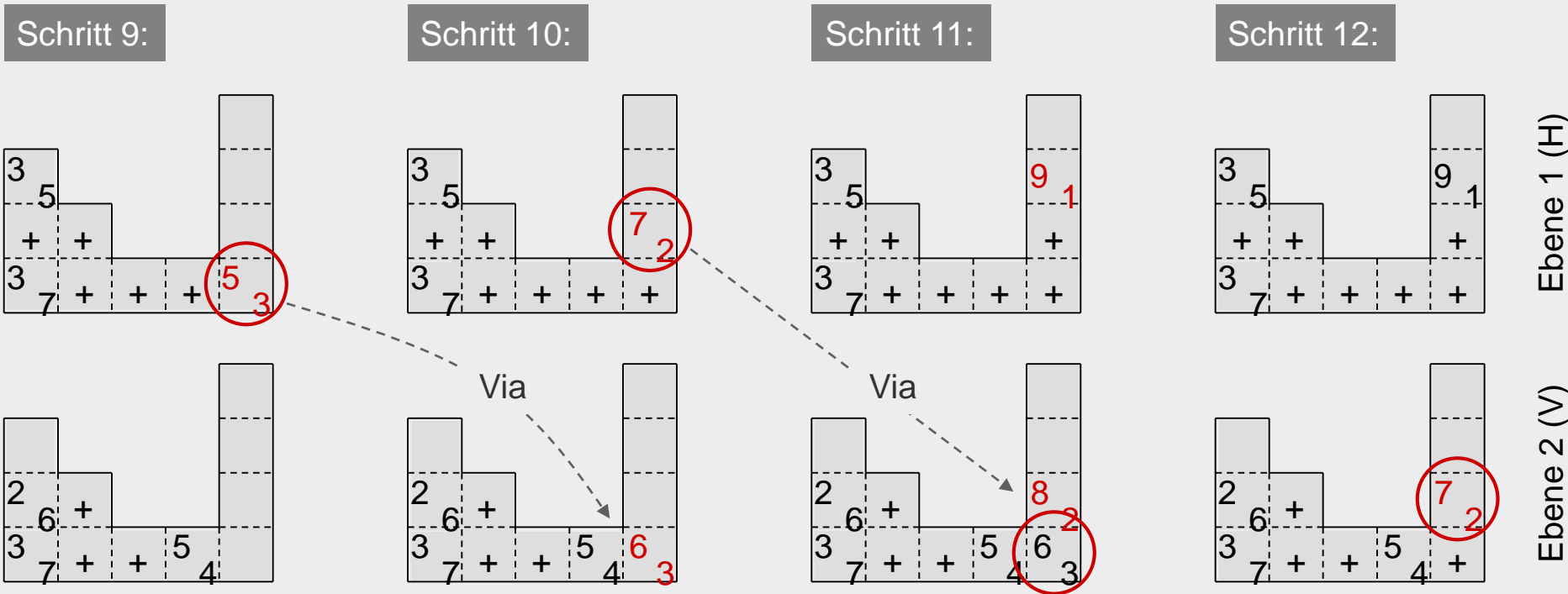
Ebene 1 (H)



Ebene 2 (V)

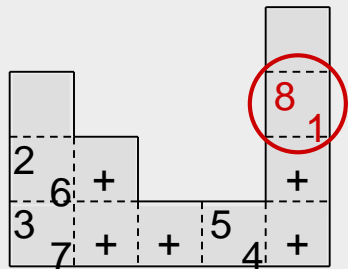
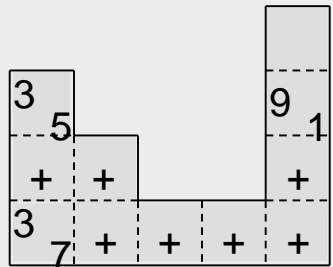


# 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

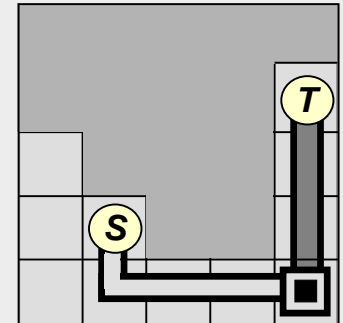
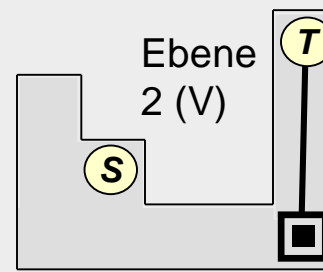
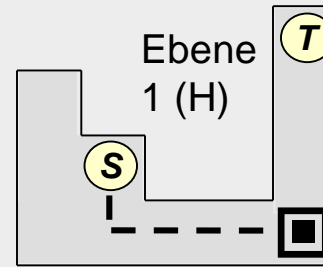
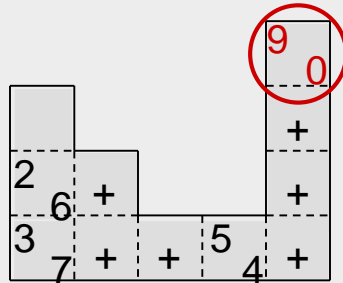
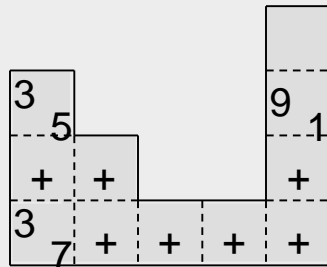


Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

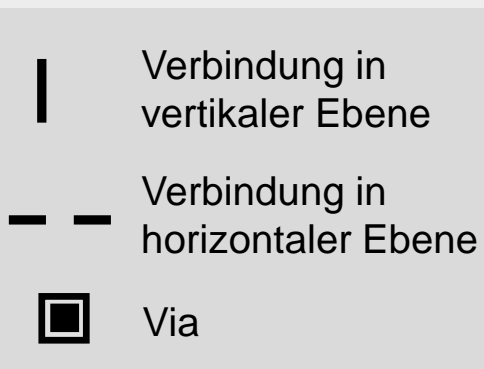
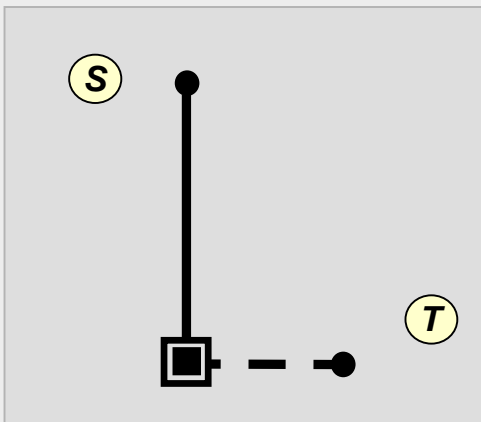
Schritt 13:



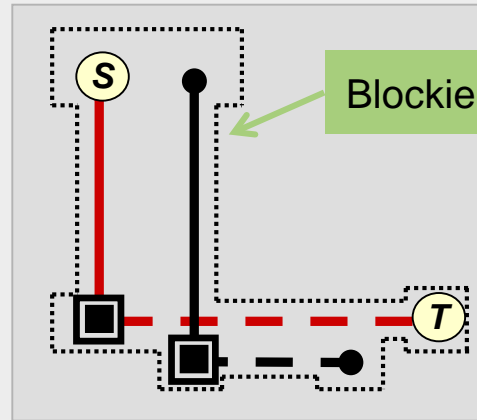
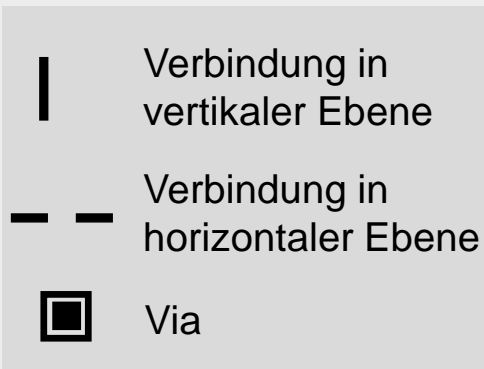
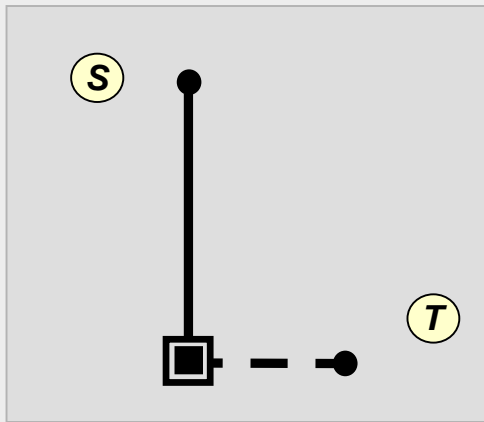
Schritt 14:



## 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Adaptive Optimierung

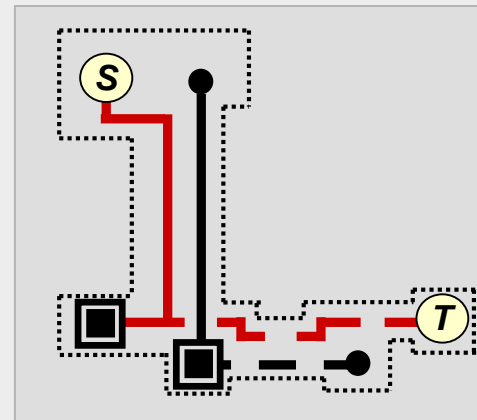


# 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Adaptive Optimierung



Blockierte Fläche

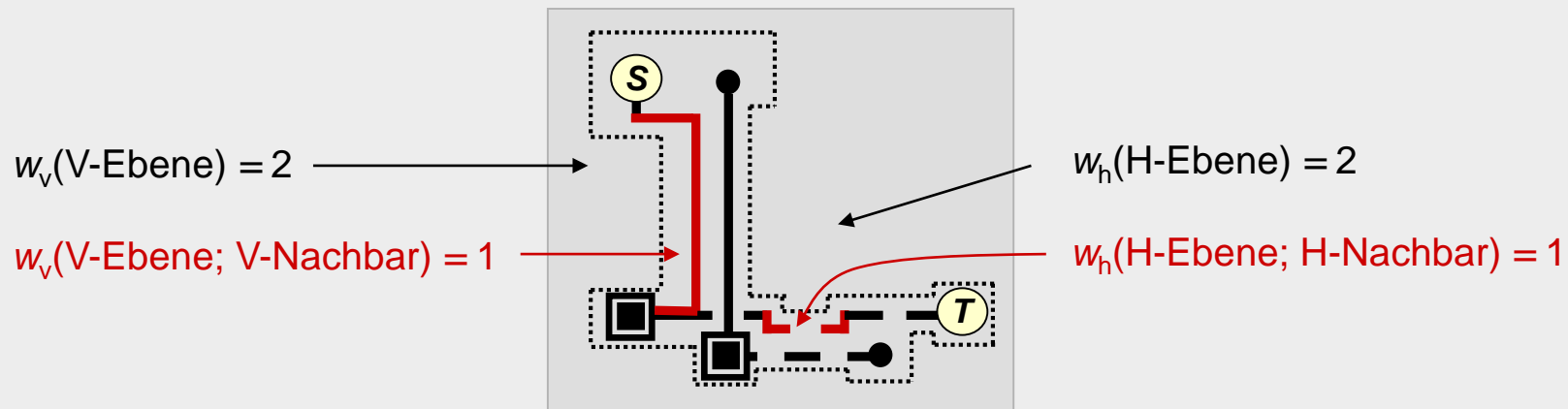
Kürzeste Verbindung S-T



Minimierung der blockierten Fläche

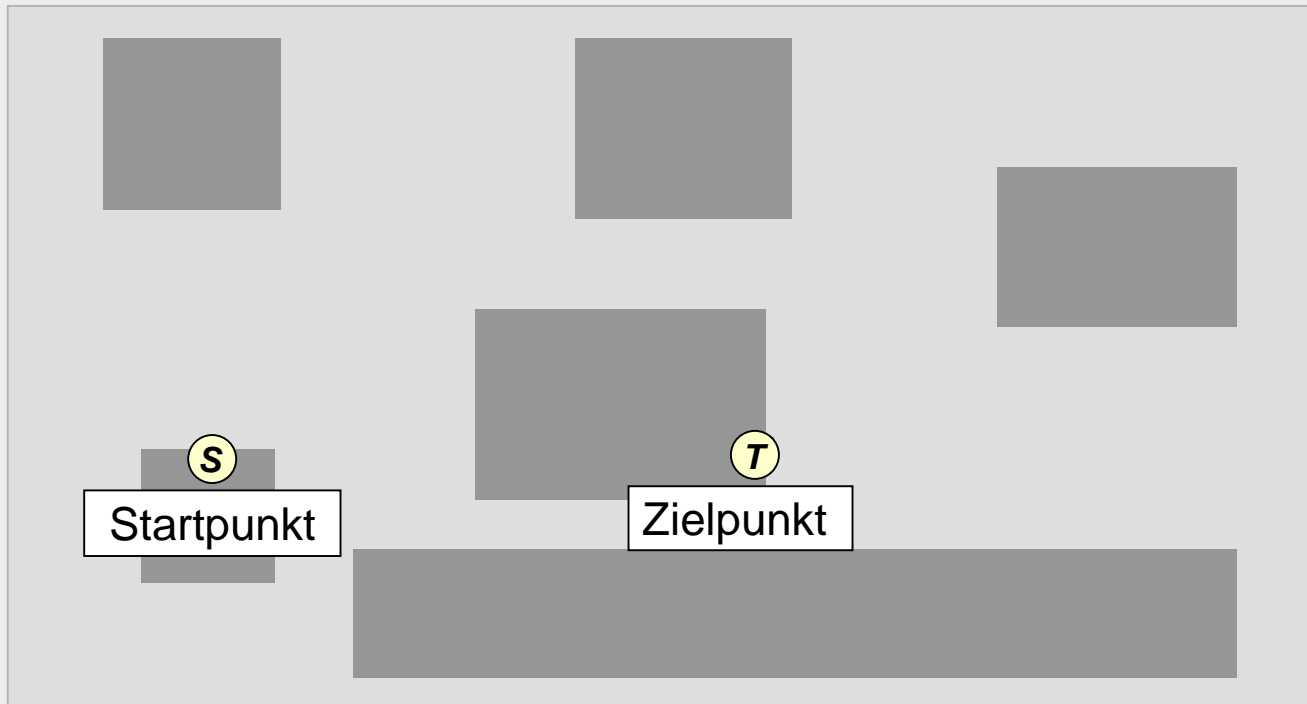
### Vorgehensweise

- Flexible, ortsabhängige Anpassung der horizontalen und vertikalen Abstandsgewichte, z.B. auf H-Ebene
  - $w_h(\text{H-Ebene}) = 2$ , in unmittelbarer Nähe eines H-Elements = 1, damit „Heranziehen“ eines neuen H-Elements an ein schon existierendes
  - $w_v(\text{H-Ebene}) = 4$ , in unmittelbarer Nähe eines V-Elements = 2, damit Tolerierung eines neuen V-Elements neben einem schon existierenden

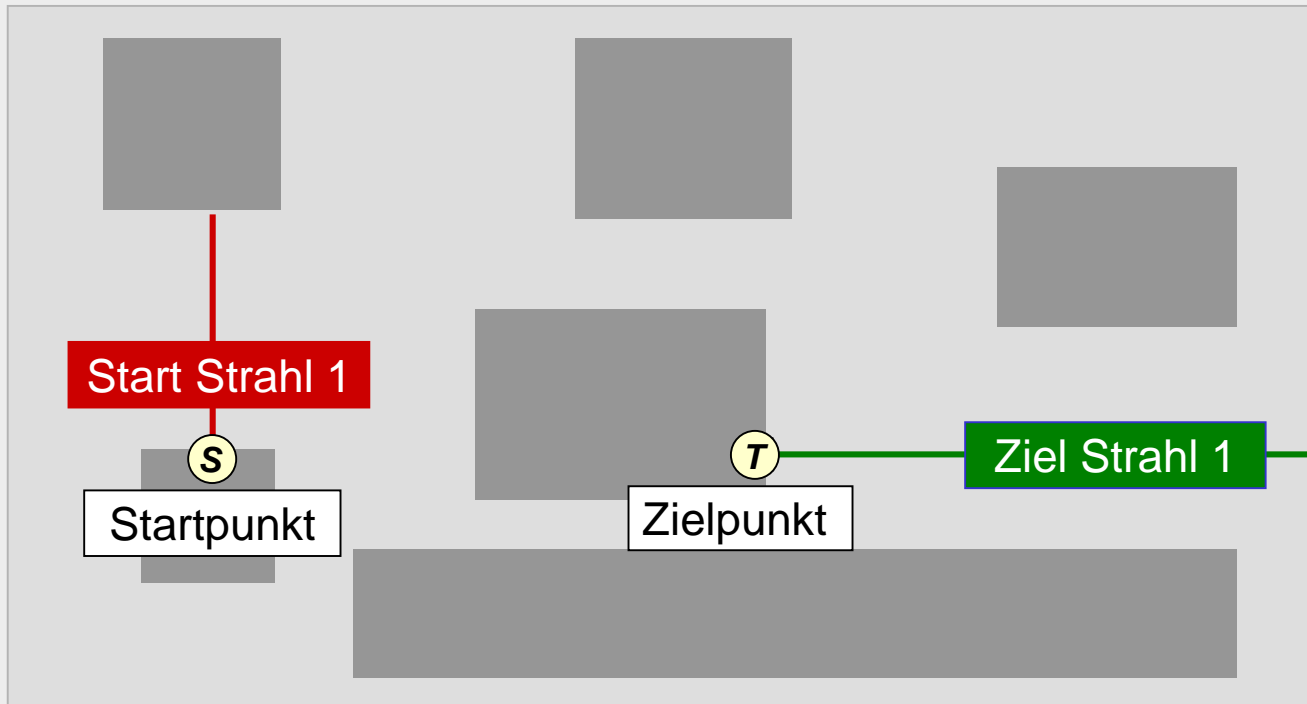


- Nachteile der Rasterverdrahtung (Zeit- und Speicherbedarf) führten zur Entwicklung von Linienverdrahtern
- Aussendung von (Such-)Strahlen vom Start- und vom Zielpunkt bis zu deren Überschneidung
- Vorteil: schnelle Wegfindung
- Nachteile:
  - Nicht immer wird Weg gefunden, auch wenn einer existiert
  - Gefundener Weg muss nicht der kürzest mögliche sein

## 7.7.3 Linienverdrahtung

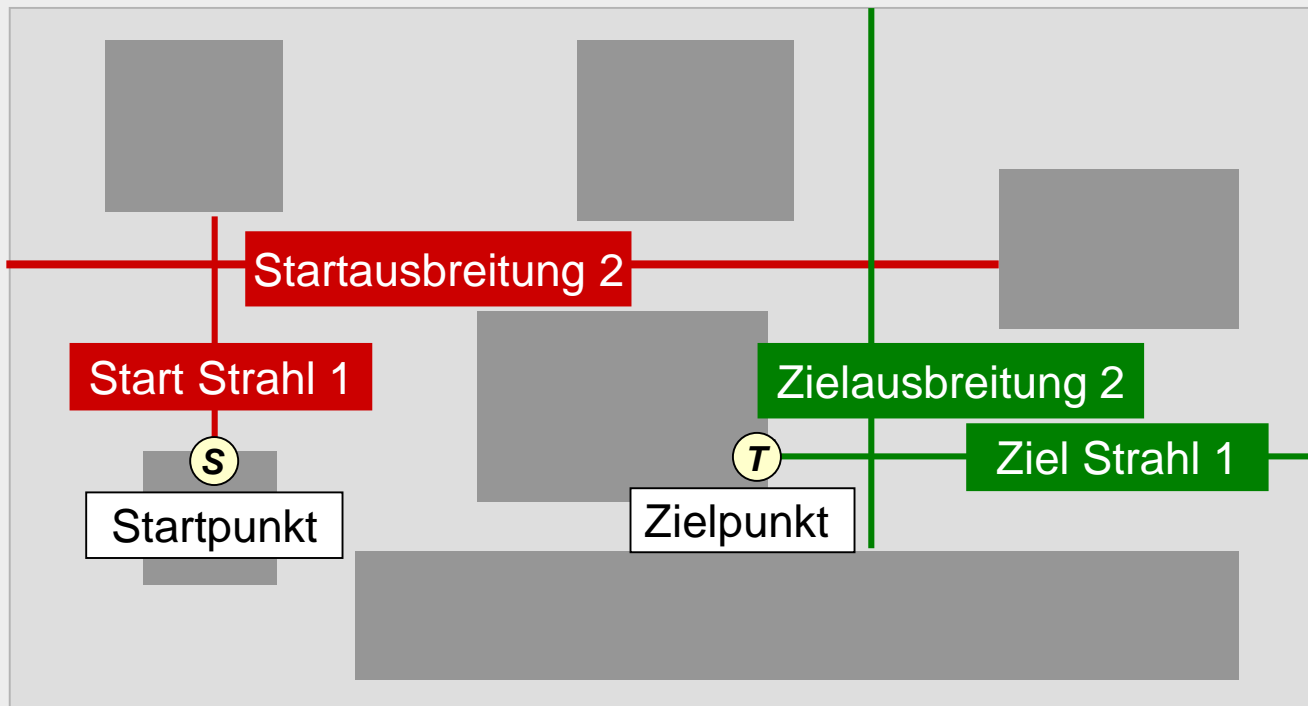


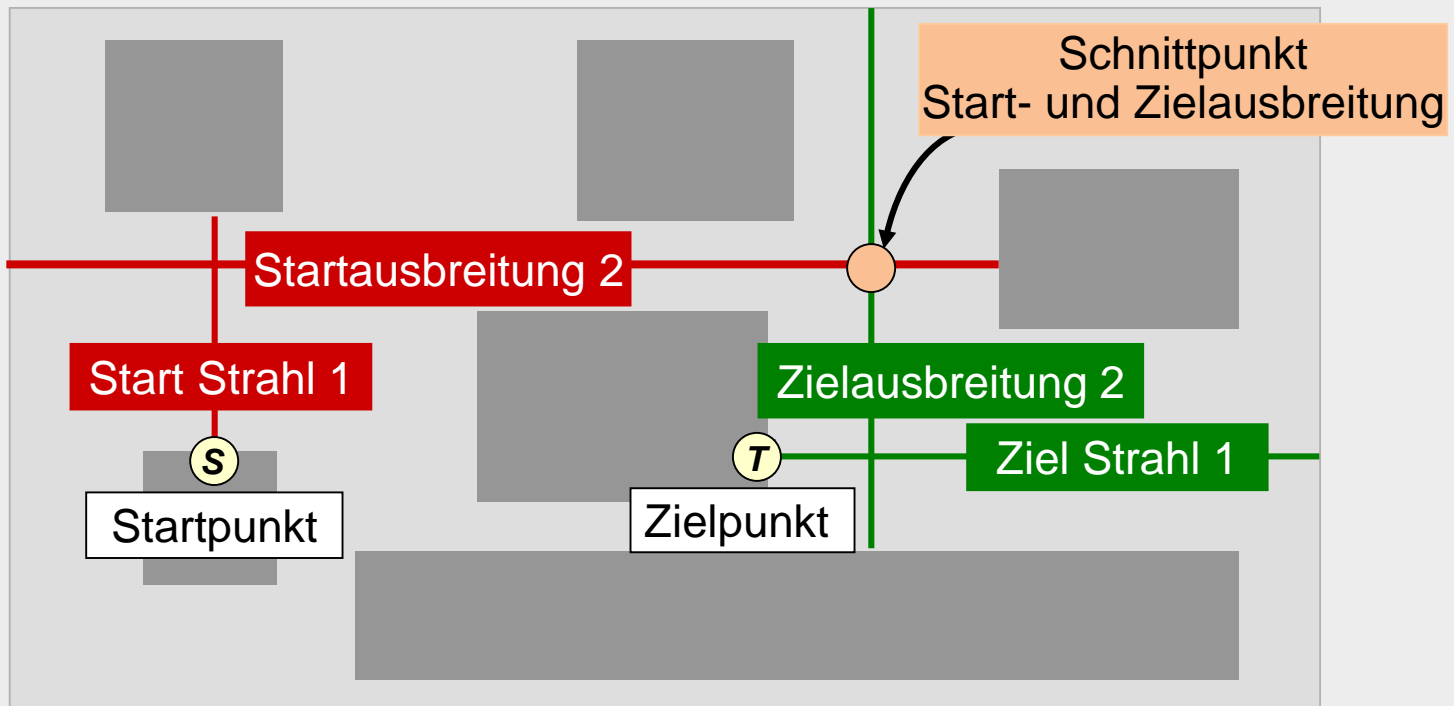
## 7.7.3 Linienverdrahtung



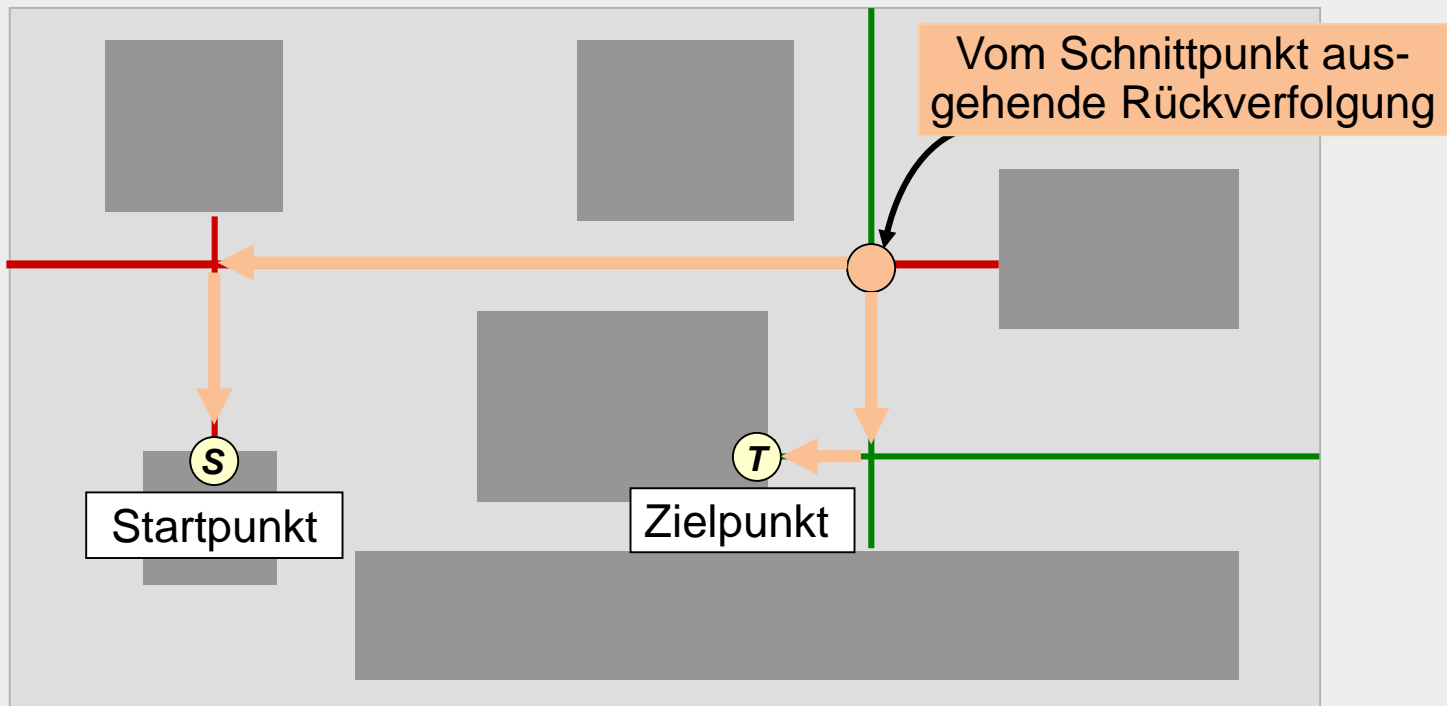


## 7.7.3 Linienverdrahtung

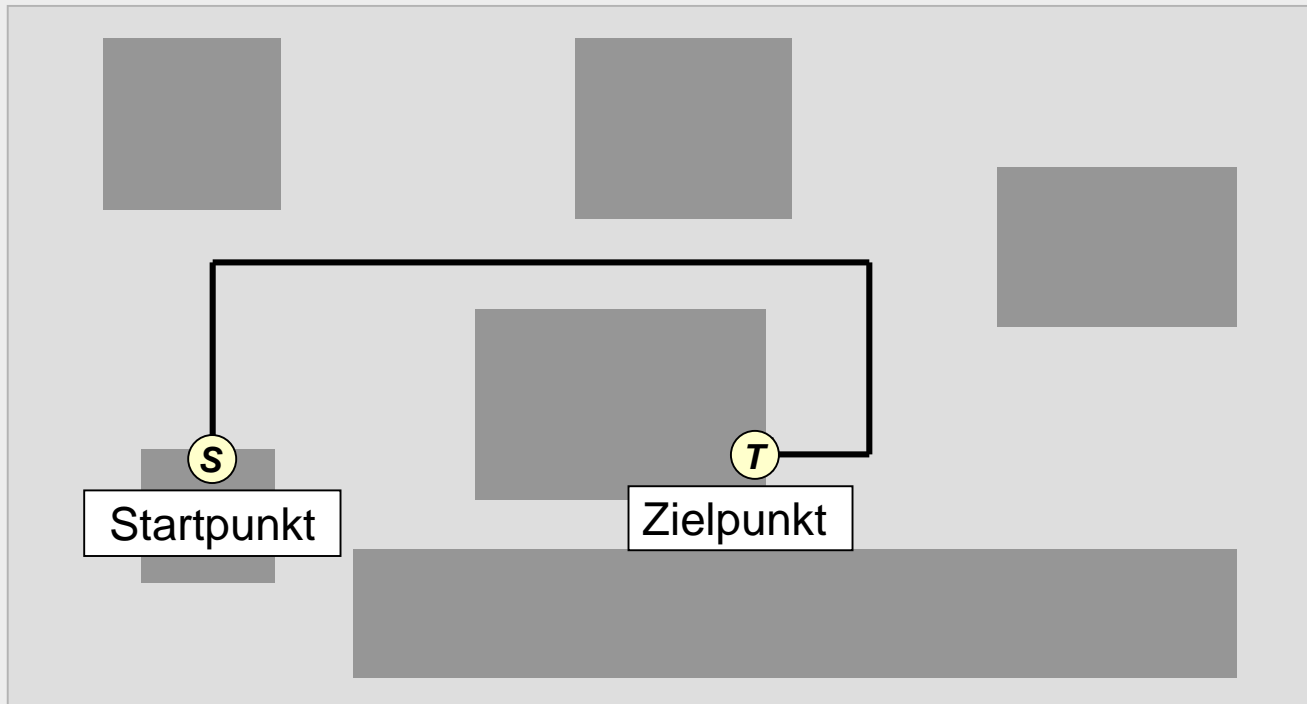




## 7.7.3 Linienverdrahtung



## 7.7.3 Linienverdrahtung

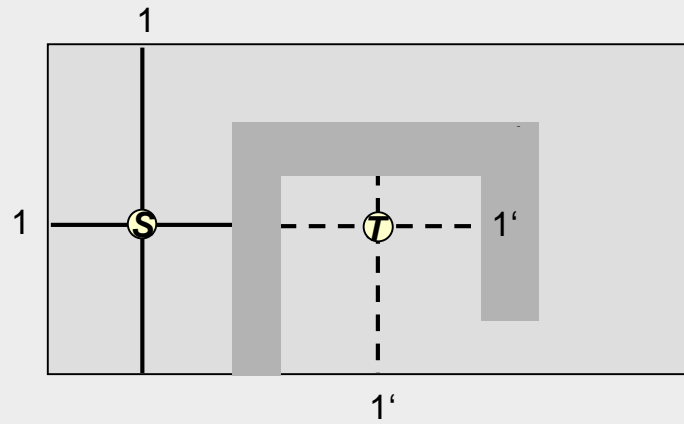


- Sowohl vom Start- als auch vom Zielpunkt ausgehend werden jeweils zwei Geraden (horizontal und vertikal) angelegt, bis sie auf ein Hindernis oder auf den Rand des Verdrahtungsbereiches treffen
- Geraden als sog. **Versuchslinien** (Trial lines) vom Grad Null abgespeichert
- In jeder Iteration  $i$  werden zwei Schritte durchgeführt:
  - Jede Versuchslinie vom Grad  $i$  wird einzeln betrachtet, indem jeder Punkt auf dieser als **Ausgangspunkt** (Base point) einer senkrecht dazu liegenden neuen Versuchslinie vom Grad  $i+1$  dient
  - Sollte eine Versuchslinie vom Grad  $i+1$  eine Versuchslinie vom anderen Ausgangspunkt schneiden: Rückverfolgung  
Andernfalls werden alle Versuchslinien vom Grad  $i+1$  abgespeichert und Schritt 1 wiederholt.

### Algorithmus

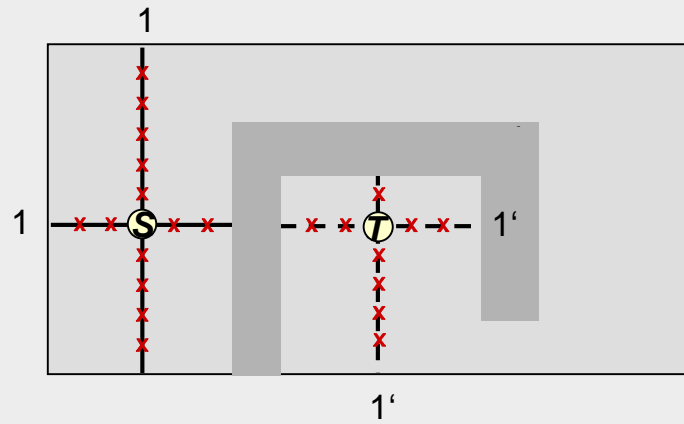
1. Erzeugen zweier Expansionslinien  $1$  bzw.  $1'$ , die an den beiden zu verbindenden Pins  $S$  bzw.  $T$  starten und bis zum nächsten Hindernis oder Chiprand gehen.
2. Falls Geraden  $j$  und  $j'$  oder  $j$  und  $(j-1)'$  oder  $(j-1)$  und  $j'$  sich schneiden, Rückverfolgung auf den Geraden  $j$  und  $j'$ ,  $(j-1)$  und  $(j-1)'$ ,  $(j-2)$  und  $(j-2)'$  usw., beginnend am Schnittpunkt. ENDE.  
Andernfalls weiter mit Schritt 3.
3. Erzeugen von Versuchslinien  $(j+1)$  bzw.  $(j+1)'$  senkrecht zu  $j$  bzw.  $j'$  in allen Ausgangspunkten auf  $j$  bzw.  $j'$ .  
Weiter mit Schritt 2.

# 1. Ausbreitung Versuchslinien Grad 1



— Versuchslinien vom Startpunkt  
---- Versuchslinien vom Zielpunkt

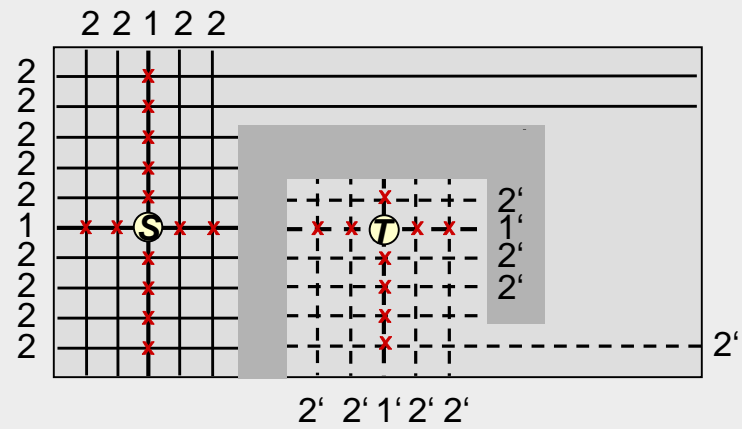
# 1. Ausbreitung Versuchslinien Grad 1 und 2



- Versuchslinien vom Startpunkt
- - - - Versuchslinien vom Zielpunkt
- x Ausgangspunkte, Grad 1



# 1. Ausbreitung Versuchslinien Grad 1 und 2

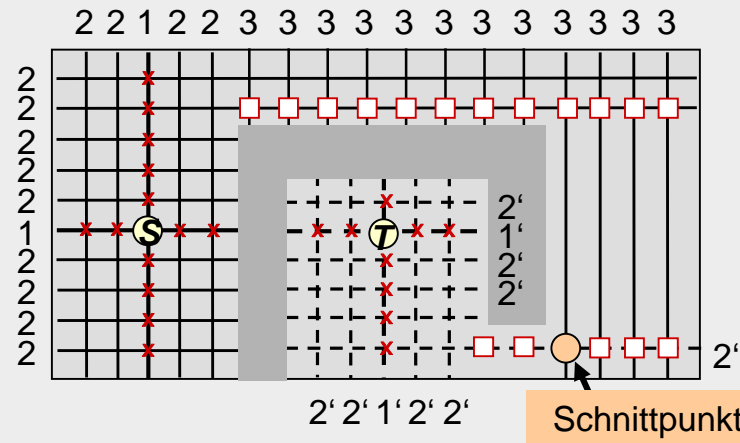
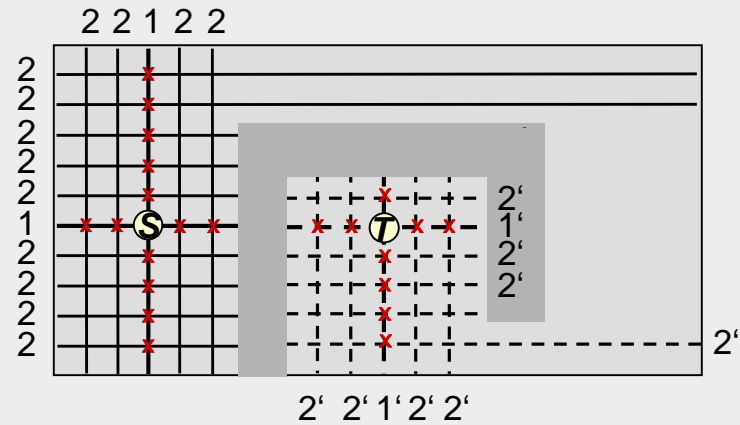


- Versuchslinien vom Startpunkt
- Versuchslinien vom Zielpunkt
- x Ausgangspunkte, Grad 1

1. Ausbreitung Versuchslinien  
Grad 1 und 2



2. Ausbreitung Versuchslinien  
Grad 3 mit Schnittpunkt



- Versuchslinien vom Startpunkt
- - - Versuchslinien vom Zielpunkt
- x Ausgangspunkte, Grad 1
- Ausgangspunkte, Grad 2

1. Ausbreitung Versuchslinien  
Grad 1 und 2

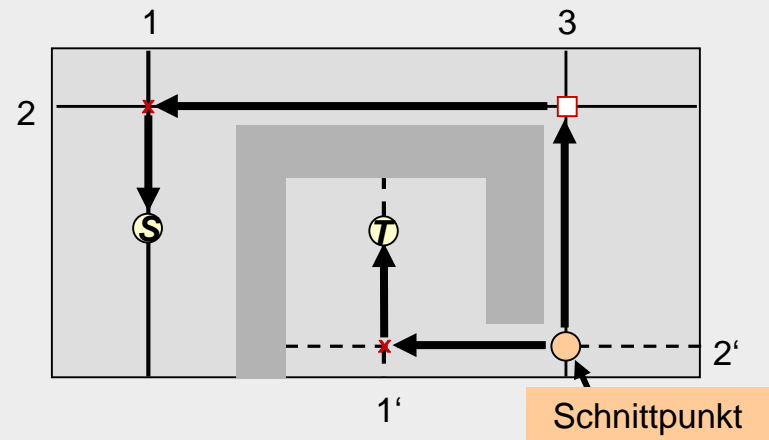
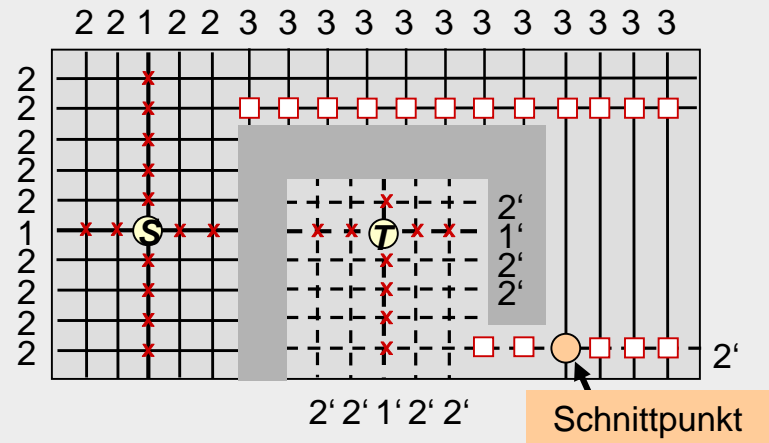
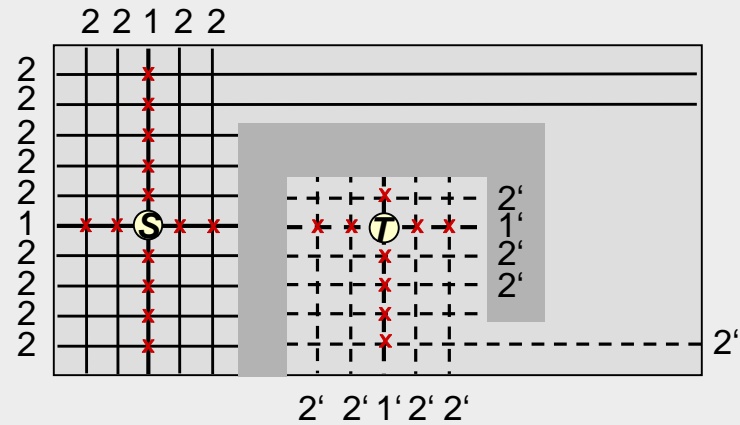


2. Ausbreitung Versuchslinien  
Grad 3 mit Schnittpunkt



3. Rückverfolgung

- Versuchslinien vom Startpunkt
- - - Versuchslinien vom Zielpunkt
- x Ausgangspunkte, Grad 1
- Ausgangspunkte, Grad 2



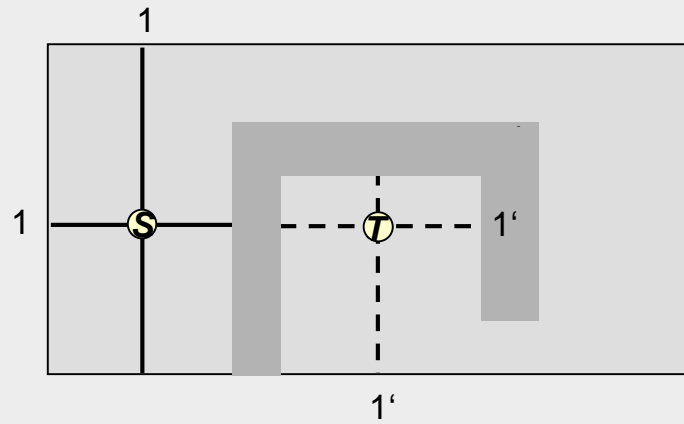
- 1969 veröffentlicht
- Unterschied zu Mikami-Tabuchi-Algorithmus: nur jeweils eine Gerade aussendend
- **Aktuelles Hindernis**: von diesem ausgehende vertikale oder horizontale Linie schneidet den aktuell betrachteten Ausbreitungspunkt
- **Fluchtpunkte**: mindestens eine der von diesen ausgehende Linien (**Fluchtlinien**) schneidet nicht aktuelles Hindernis

### Algorithmus

1. Erzeugen zweier Expansionslinien  $1$  bzw.  $1'$ , die an den beiden zu verbindenden Pins  $S$  bzw.  $T$  starten und bis zum nächsten Hindernis oder Chiprand gehen.
2. Falls Geraden  $j$  und  $j'$  oder  $j$  und  $(j-1)'$  oder  $(j-1)$  und  $j'$  sich schneiden, Rückverfolgung auf den Geraden  $j$  und  $j'$ ,  $(j-1)$  und  $(j-1)'$ ,  $(j-2)$  und  $(j-2)'$  usw., beginnend am Schnittpunkt. ENDE.  
Andernfalls weiter mit Schritt 3.
3. Erzeugen zweier Fluchtlinien  $(j+1)$  bzw.  $(j+1)'$  senkrecht zu  $j$  bzw.  $j'$  in solchen Fluchtpunkten, die
  - weit genug entfernt von den letzten Fluchtpunkten sind, um das aktuelle Hindernis zu überwinden,
  - dicht genug am letzten Fluchtpunkt bzw. Pin liegen, um Überlängen zu vermeiden.

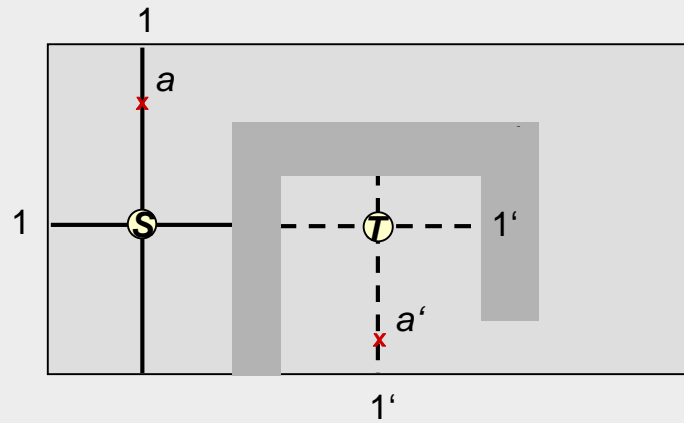
Weiter mit Schritt 2.

# 1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1



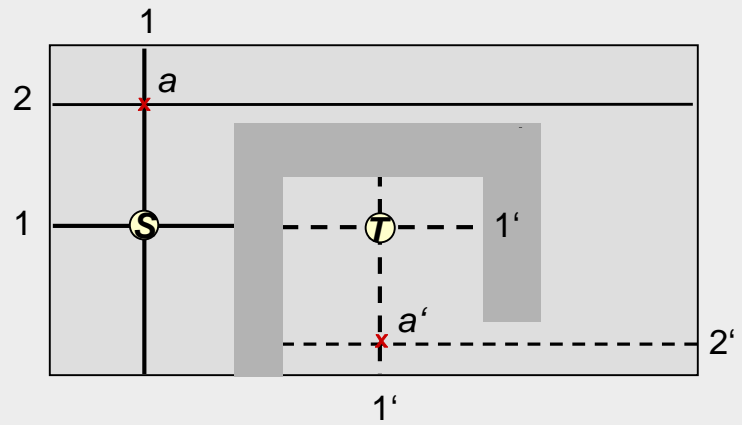
- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - - Fluchtlinien vom Zielpunkt

# 1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1 und 2



- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - - Fluchtlinien vom Zielpunkt
- x Fluchtpunkte, Grad 1

# 1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1 und 2



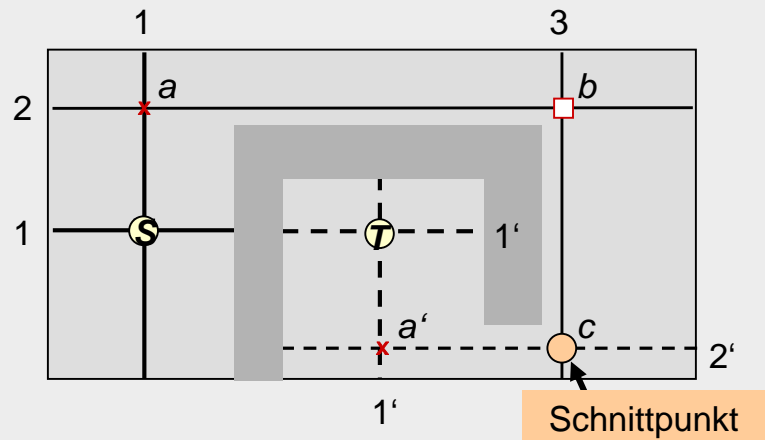
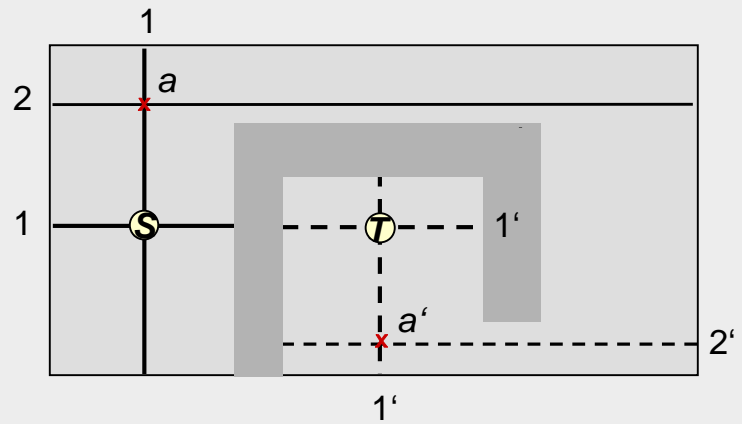
- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - - Fluchtlinien vom Zielpunkt
- x Fluchtpunkte, Grad 1



1. Ausbreitung Fluchtlinien  
Grad 1 und 2



2. Ausbreitung Fluchtlinien  
Grad 3 mit Schnittpunkt



- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - Fluchtlinien vom Zielpunkt
- x Fluchtpunkte, Grad 1
- Fluchtpunkt, Grad 2

1. Ausbreitung Fluchtlinien  
Grad 1 und 2

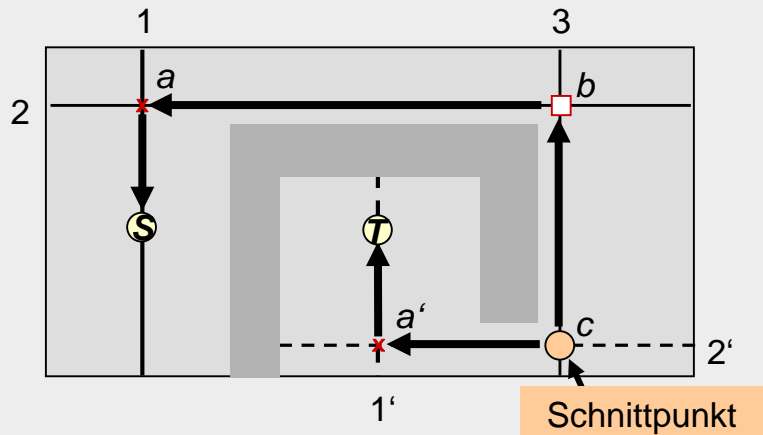
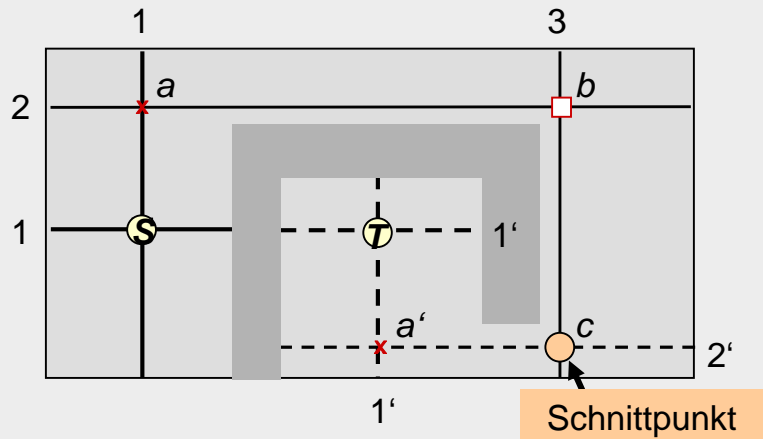
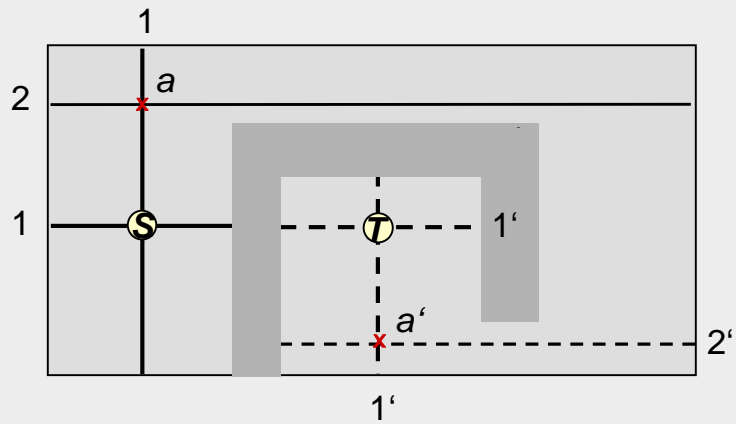


2. Ausbreitung Fluchtlinien  
Grad 3 mit Schnittpunkt



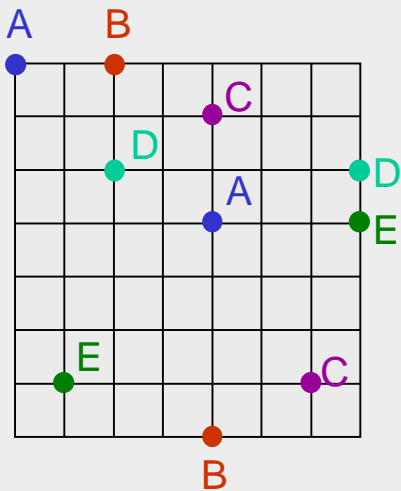
3. Rückverfolgung

- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - Fluchtlinien vom Zielpunkt
- x Fluchtpunkte, Grad 1
- Fluchtpunkt, Grad 2

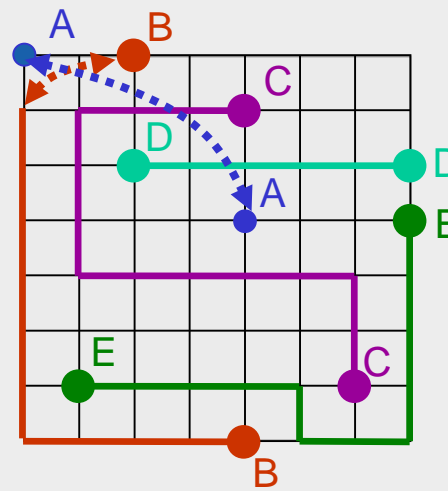


- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung

- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung



Serielle Verdrahtung:

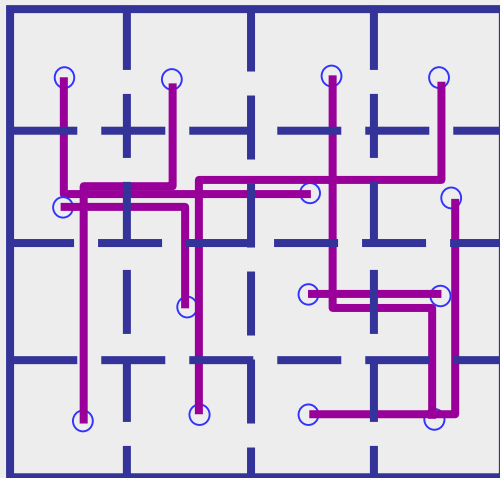


-> seriell in Manhattan-Geometrie  
nicht verdrahtbar

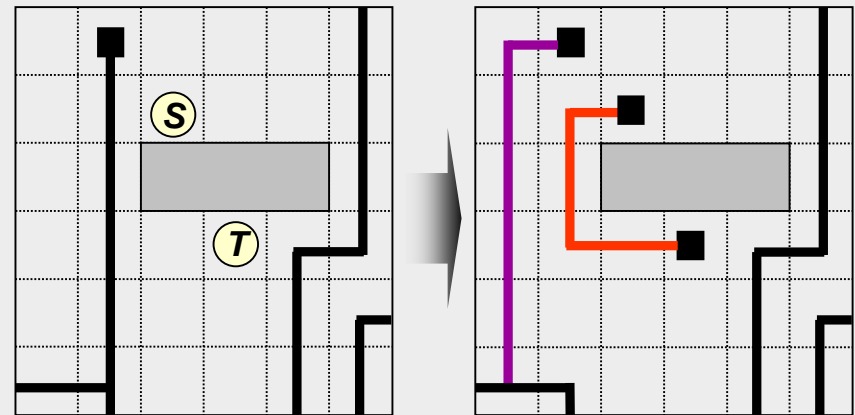
## 7.8 Quasiparallele Verdrahtung

- Echte parallele Netzabarbeitung nicht möglich -> quasiparallel
- Gleichzeitige Betrachtung verhindert Blockierungen

Hierarchische Verdrahtung



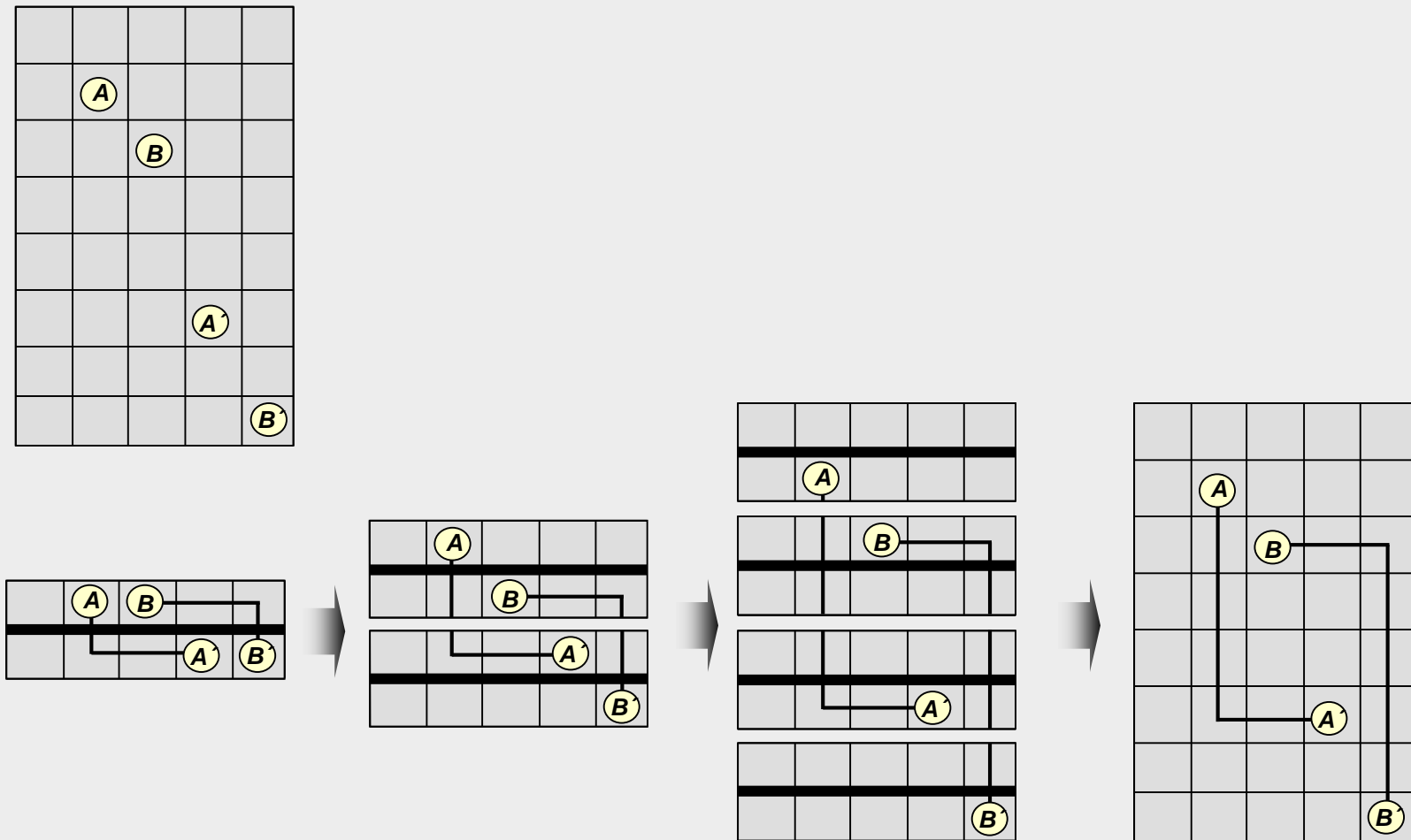
Rip-Up and Reroute



## 7.8.1 Hierarchische Verdrahtung

- Erstmals 1983 von *Burstein* und *Pelavin* vorgestellt
- Das Grundprinzip besteht in einem sukzessiven Schnittverfahren, bei dem eine Reduktion des  $m \times n$  Verdrahtungsproblems ( $m$ ,  $n$  Anzahl der horizontalen und vertikalen Gitterlinien) auf ständig verfeinerte  $2 \times n$ -Raster erfolgt.
- Das geschieht durch rekursive Aufteilung der Verdrahtungsfläche in zwei Teilflächen, welche dann durch Schnittlinien weiter aufgespalten werden

## 7.8.1 Hierarchische Verdrahtung: Beispiel

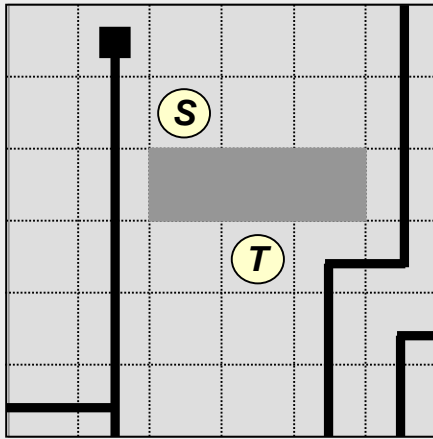




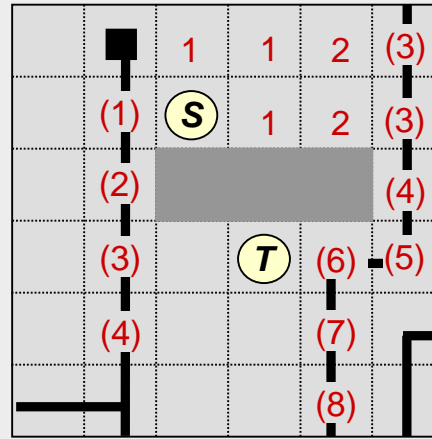
## 7.8.2 Rip-Up and Reroute

- Bei einer hohen Anzahl von bereits verdrahteten Netzen steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass diese die noch zu verlegenden Verbindungen blockieren.
- **Rip-up and reroute:** bereits verlegte werden Netze wieder aufgetrennt (Rip-up) und nach Verlegen des bisher blockierten Netzes neu verdrahtet (Reroute).
- Alternativ **Push and shove:** „Beiseiteschieben“ blockierender Verbindungen.

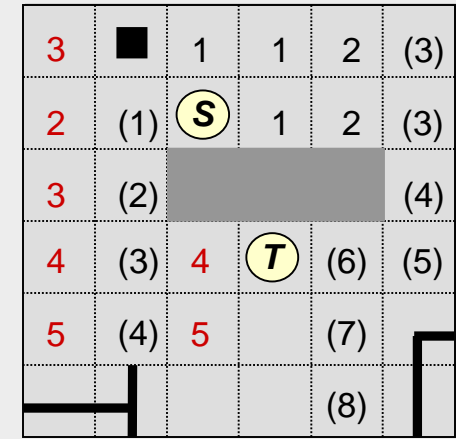
# 7.8.2 Rip-Up and Reroute: Minimale Netzauftrennung – Beispiel



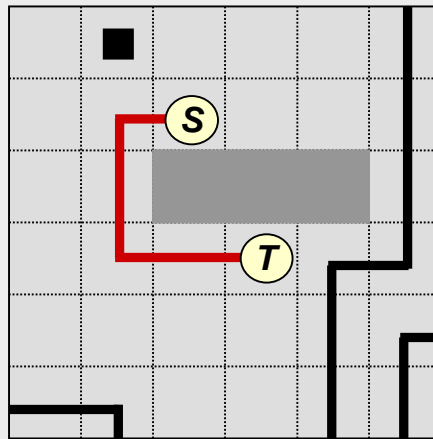
a)



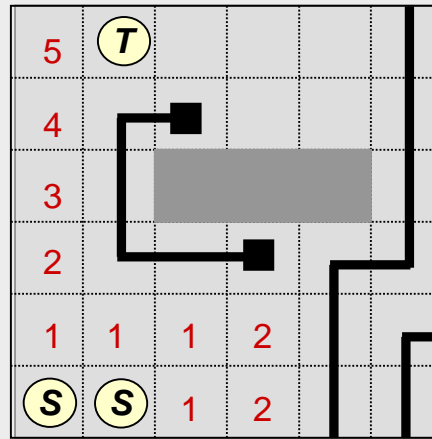
b)



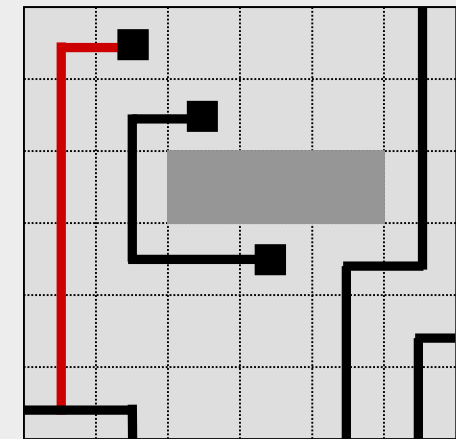
c)



d)

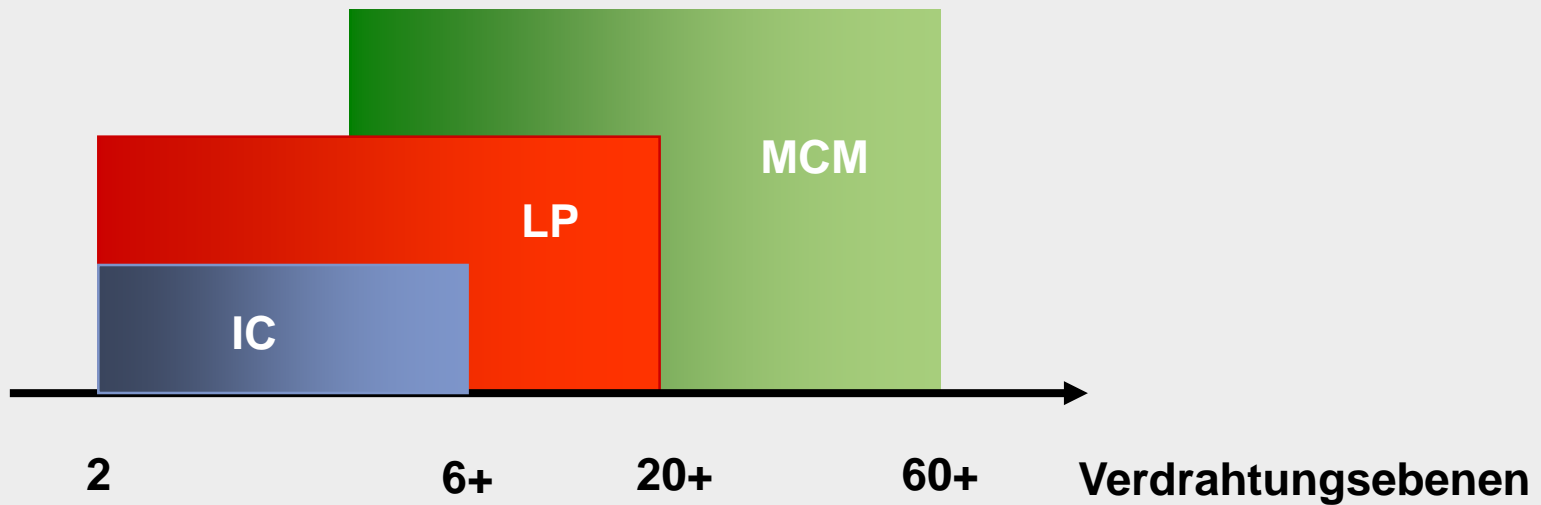


e)

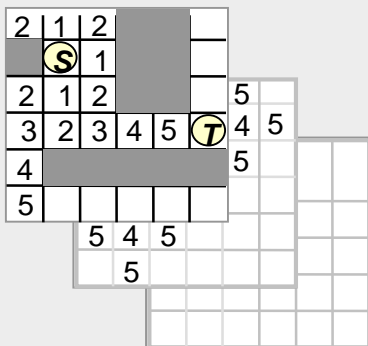


f)

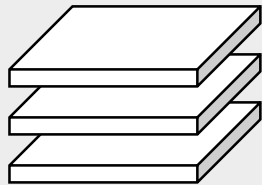
- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung**
- 7.10 X-Verdrahtung



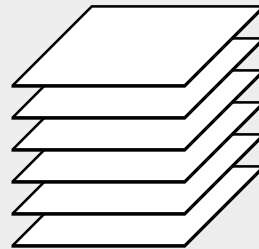
Raster-  
verdrahtung



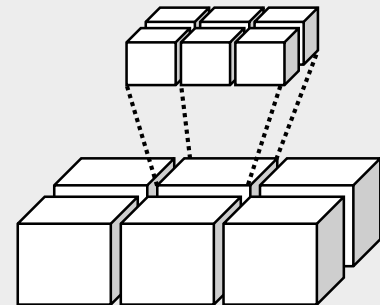
Mehrstu-  
fen-  
Verdrahtung



Planar-  
verdrahtung



Turm-  
verdrahtung



- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung**

- Nicht-orthogonaler Verdrahtungsstil auch bei digitalen Schaltungen
- Terminologie beruht auf der sog.  $\lambda$ -Geometrie. Der Wert  $\lambda$  repräsentiert hierbei die Anzahl möglicher Verdrahtungsrichtungen in der Ebene in aufeinander folgenden Winkeln von  $\pi/\lambda$ :
  - $\lambda = 2$  (90 Grad): **Manhattan-Verdrahtung** (vier Verdrahtungsrichtungen)
  - $\lambda = 3$  (60 Grad): **Y-Verdrahtung** (sechs Verdrahtungsrichtungen)
  - $\lambda = 4$  (45 Grad): **X-Verdrahtung** (acht Verdrahtungsrichtungen)
- Vorteile: Minimierung der Verbindungslänge sowie der benötigten Vias, was sich in einer verringerten Verdrahtungsfläche und verbesserten Signaleigenschaften widerspiegelt
- Problem: Heutiger digitaler Entwurfsprozess ist auf orthogonale Strukturen ausgerichtet, womit Erweiterung langwierig und aufwendig



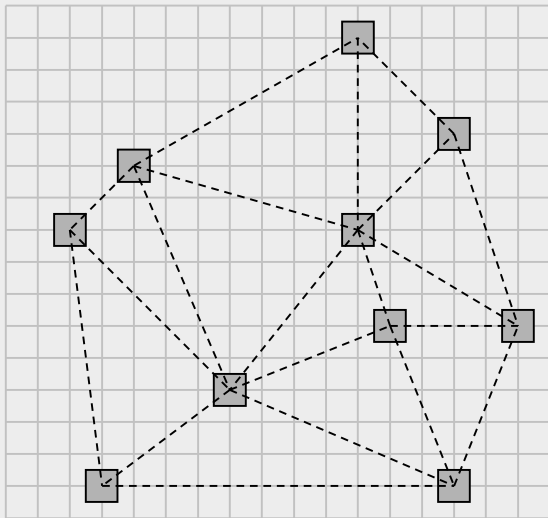


### Oktilinearer Steinerbaum-Algorithmus

1. Verbinden von jeweils drei benachbarten Netzanschlüssen durch Delaunay-Triangulation \*
2. Für jedes Dreieck  $T$ : Bestimmung der minimalen oktilinearen Verbindungslänge für die drei beteiligten Netzanschlüsse
3. Sortieren aller Dreiecke  $T$  in aufsteigender Reihenfolge ihrer Verbindungslängen
4. Für jedes Dreieck  $T$  in sortierter Liste:
  - a) Verdrahtung des Dreiecks mit minimaler Verbindungslänge
  - b) Einfügen des neuen Subgraphen in den OMST des Netzes
  - c) Optimieren des OMST.

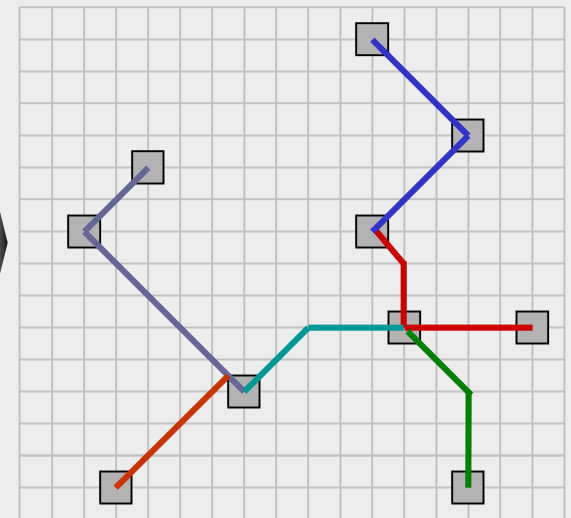
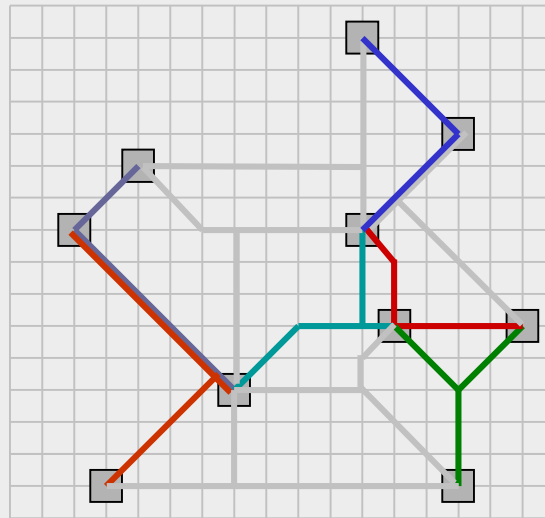
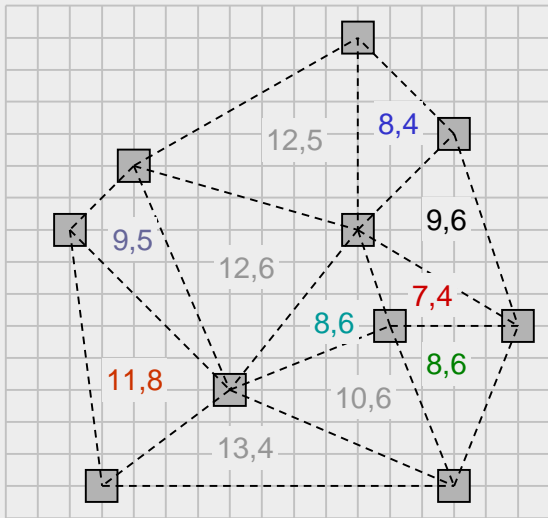
\* Mit dem Verfahren der **Delaunay-Triangulation** werden Punkte so zu Dreiecken vernetzt, dass innerhalb des Kreises, auf dem die drei Dreieckspunkte liegen, keine anderen Punkte enthalten sind.

### (1) Triangulation



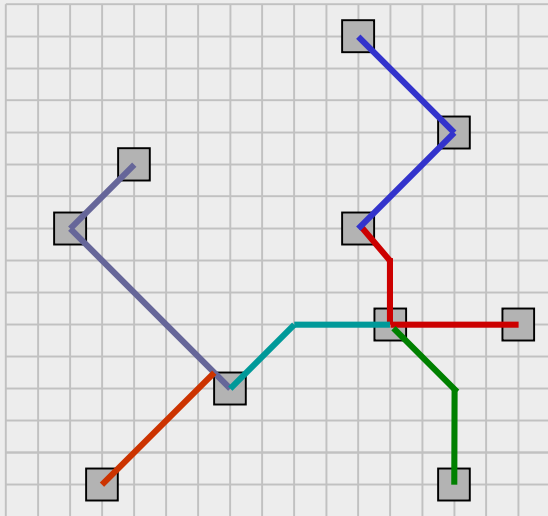
## 7.10.1 Oktilineare Steinerbäume: Beispiel

(1) Triangulation, (2/3) Verbindungslänge (4 a) Dreiecksverdrahtung (4 b) Einfügen der Subgraphen

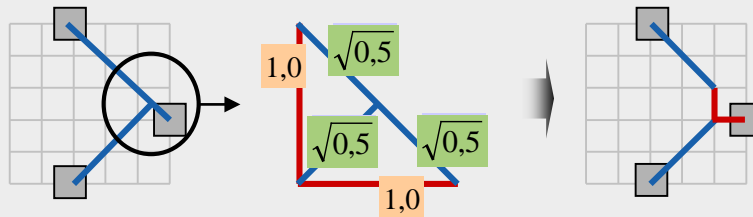
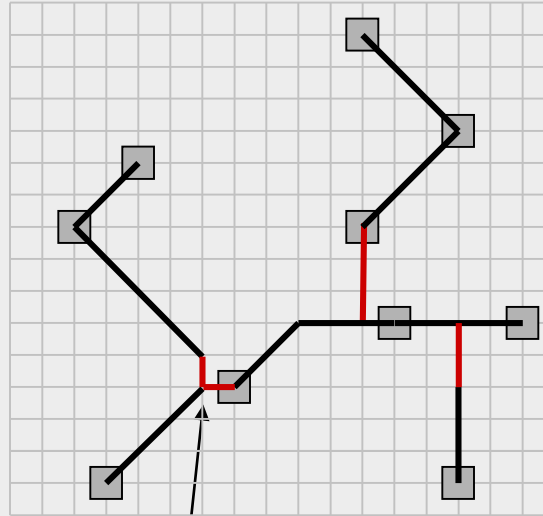


# 7.10.1 Oktilineare Steinerbäume: Beispiel

(4 b) Einfügen der Subgraphen

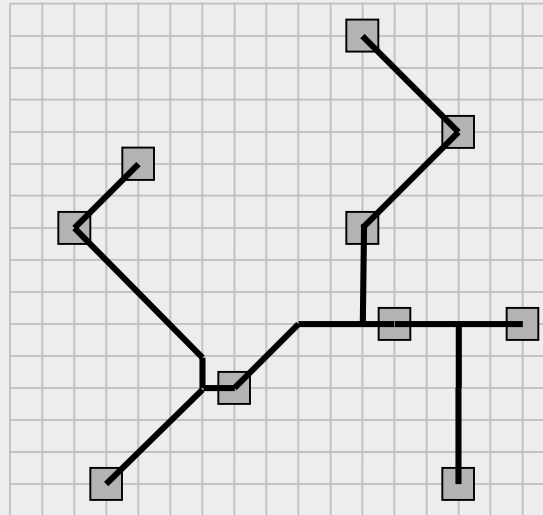


(4 c) Optimieren des oktilinearen Steinerbaums

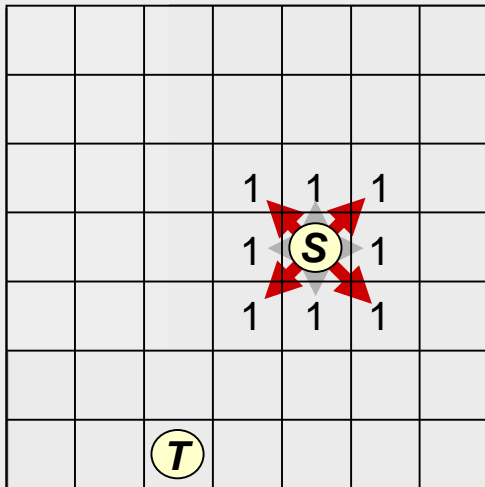


$$(1+1) < (\sqrt{0,5} + \sqrt{0,5} + \sqrt{0,5})$$

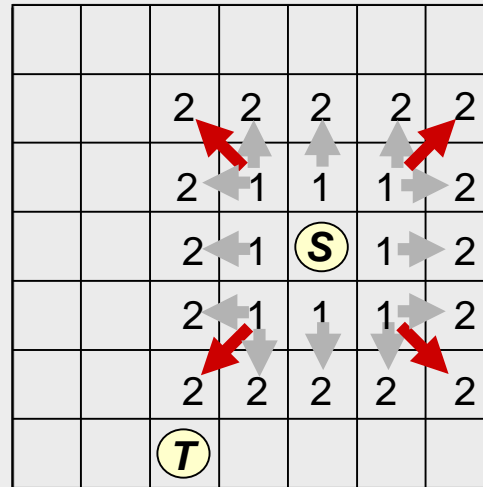
Oktilinearer Steinerbaum



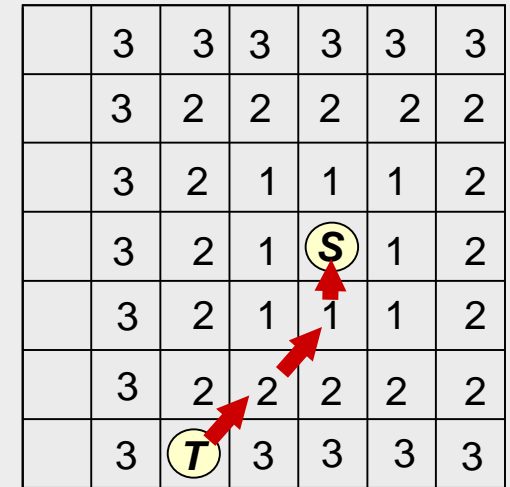
## 7.10.2 Oktilineare Wegsuche



Ausbreitung (1)

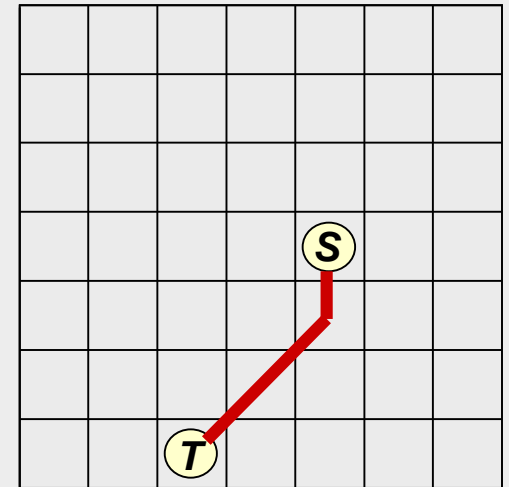


Ausbreitung (2)



Rückverfolgung

## 7.10.2 Oktilineare Wegsuche



- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
  - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
  - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
  - 7.7.3 Linienverdrahtung
- 7.8 Quasiparallele Verdrahtung
- 7.9 Dreidimensionale Verdrahtung
- 7.10 X-Verdrahtung