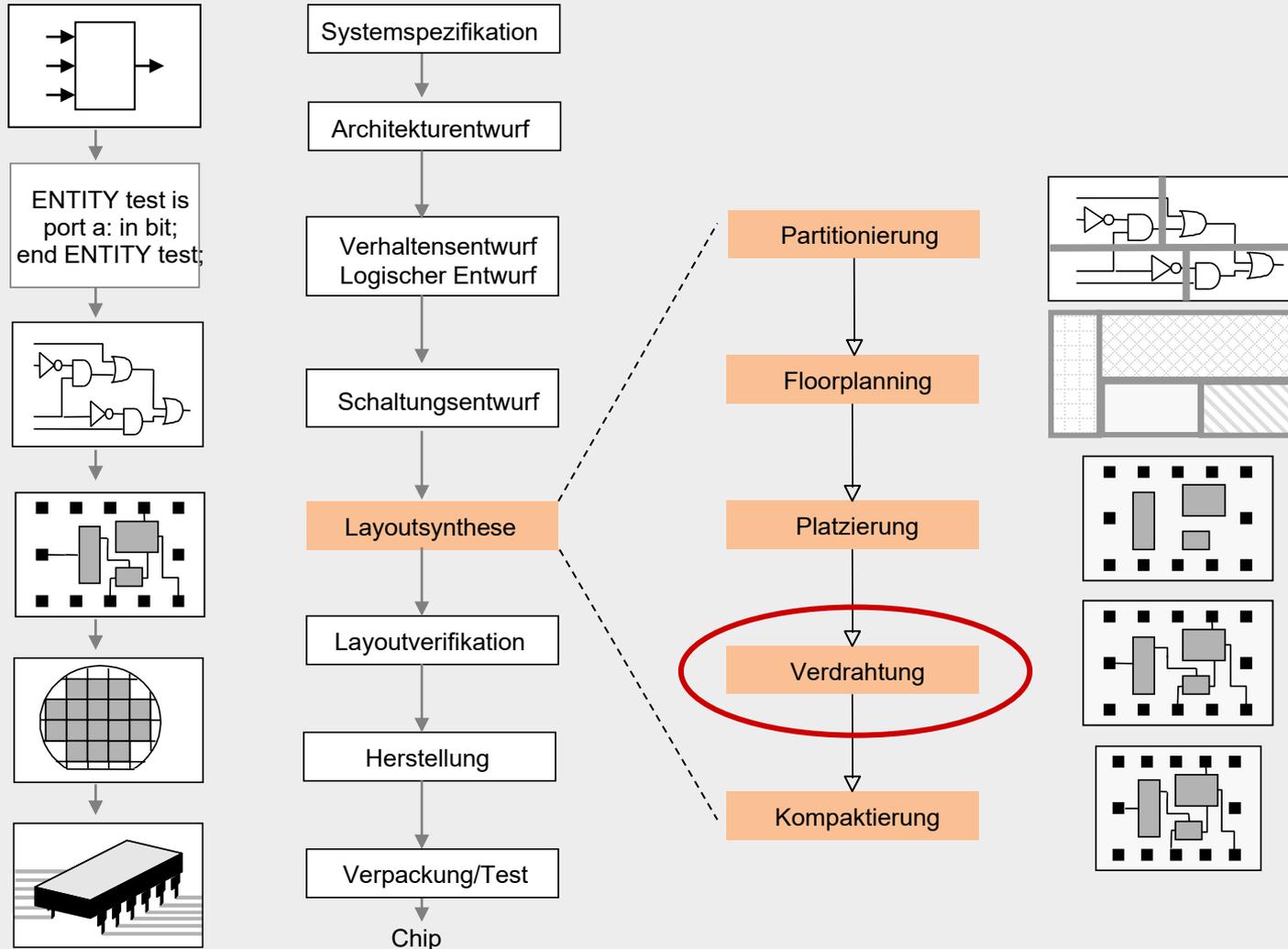


- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
 - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
 - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
 - 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:

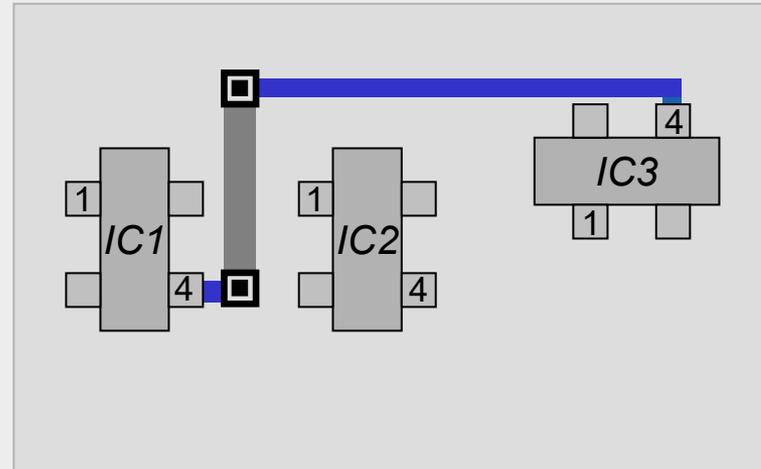
Netze mit den durch sie jeweils zu verbindenden Bauelemente-Anschlüssen, z.B.

$$N_1 = \{IC1_4, IC3_4\}$$

Technologie-Informationen:

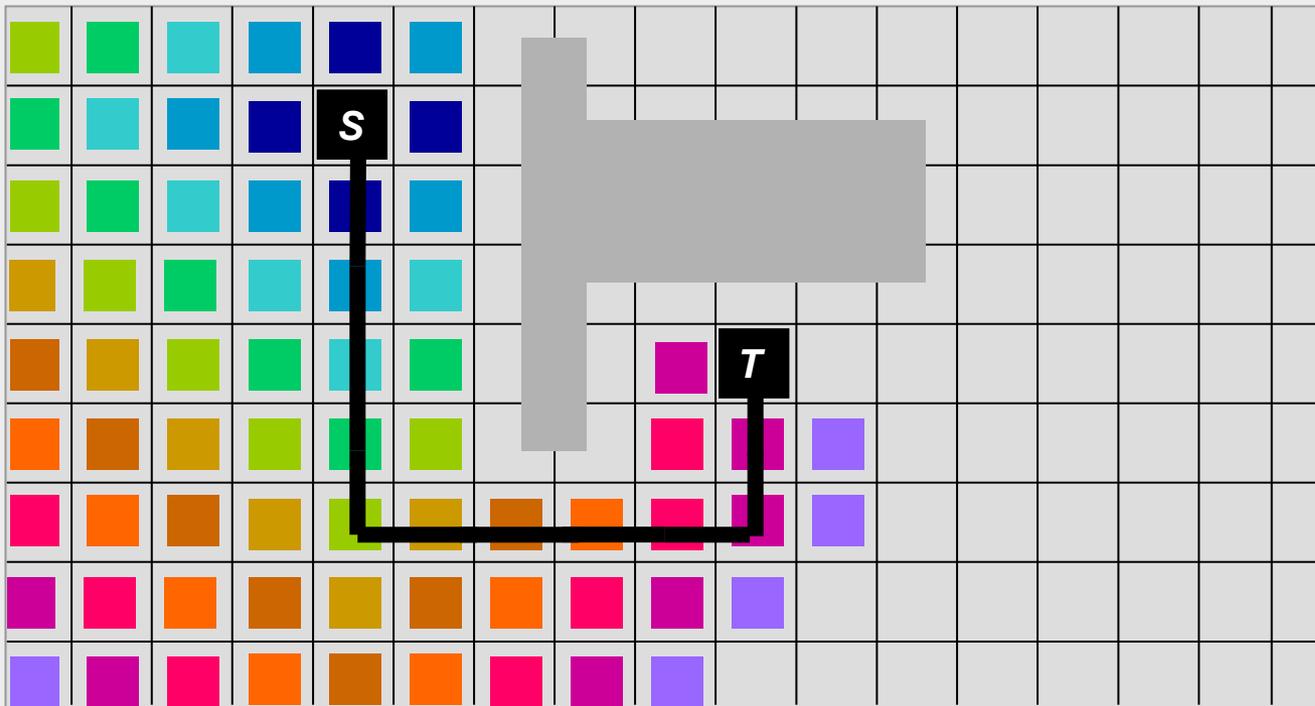
Abstandsregeln
Breitenregeln usw.

Verdrahtungsergebnis:

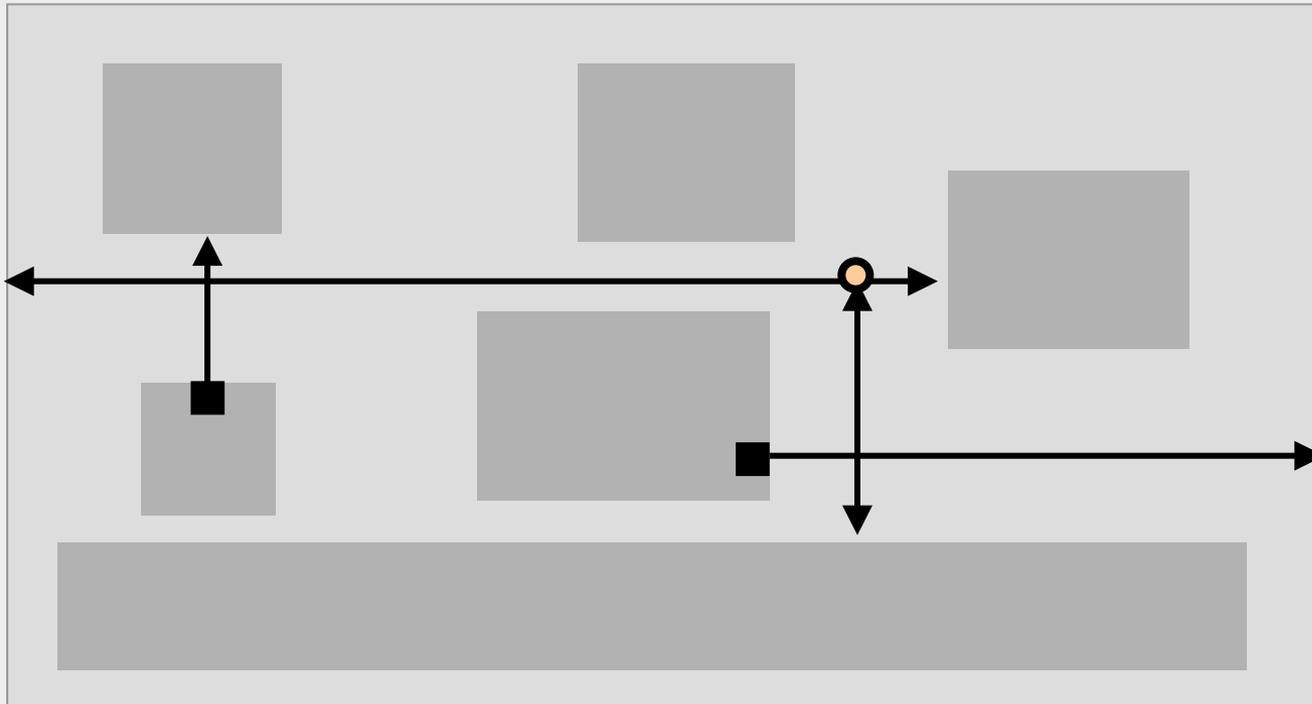


7.2 Begriffsbestimmungen

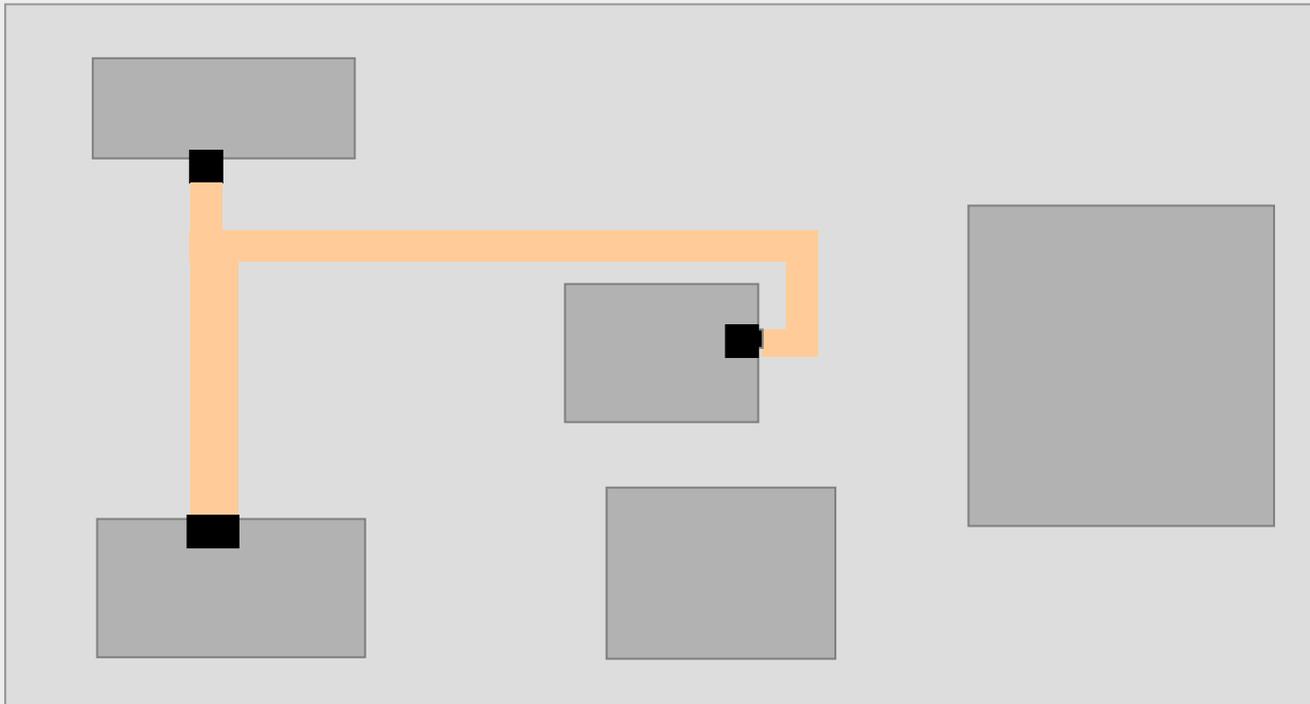
Rasterverdrahtung bzw. Labyrinthverdrahtung (Grid routing, maze routing)



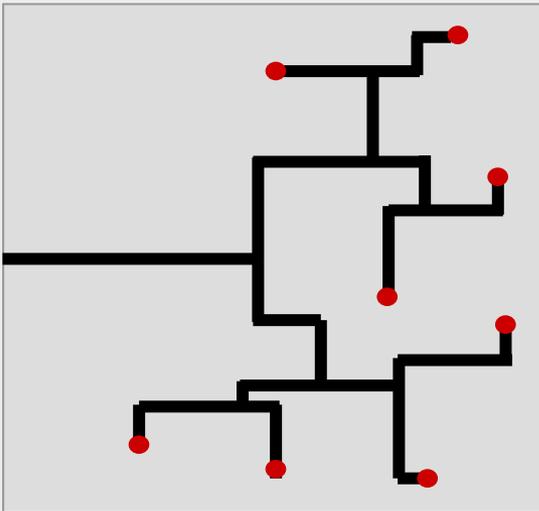
Linienverdrahtung (Line probe routing)



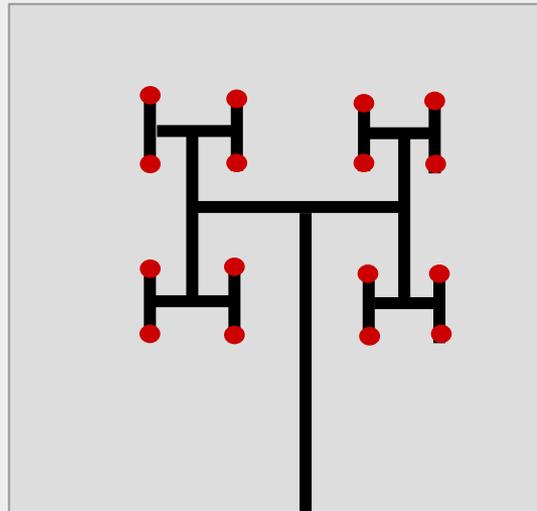
Rasterunabhängige bzw. rasterfreie Verdrahtung (Shape based routing)



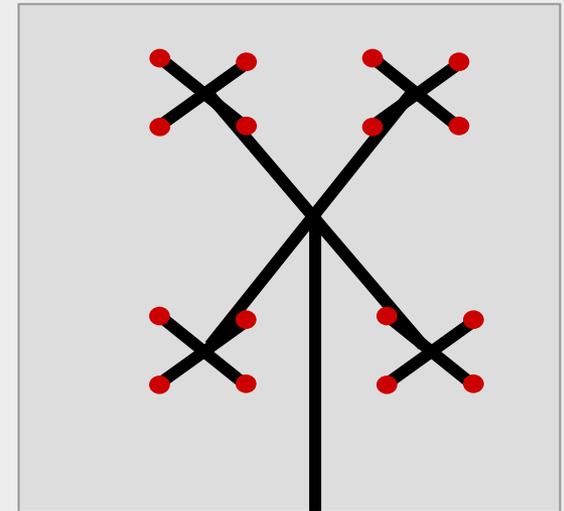
Verdrahtung der Taktnetze (Clock routing)



Gleichgewichtsbaum
(Balanced tree)

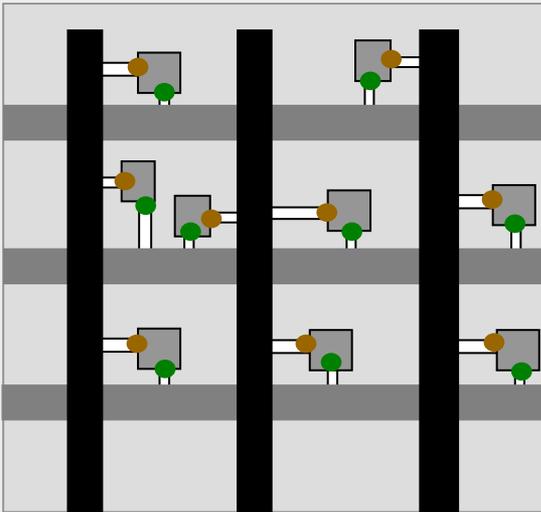


H-Baum (H tree)

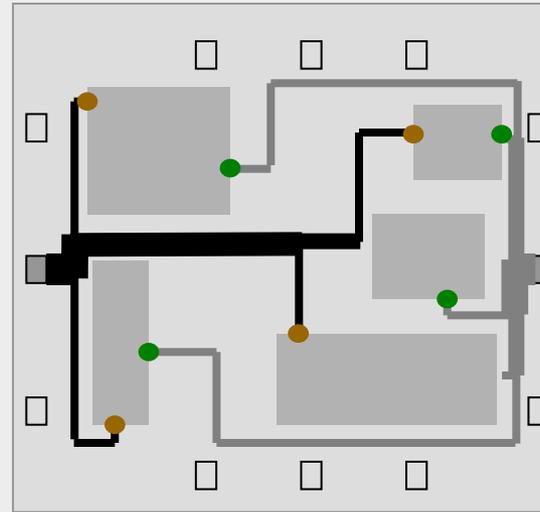


X-Baum (X tree)

Verdrahtung der Versorgungsnetze (Power routing)



Versorgungsgitter

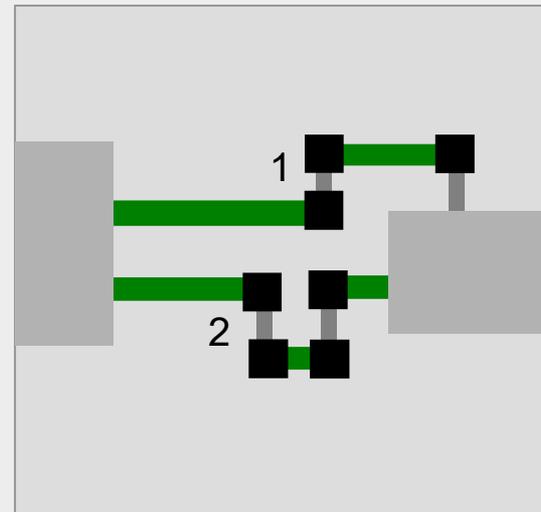
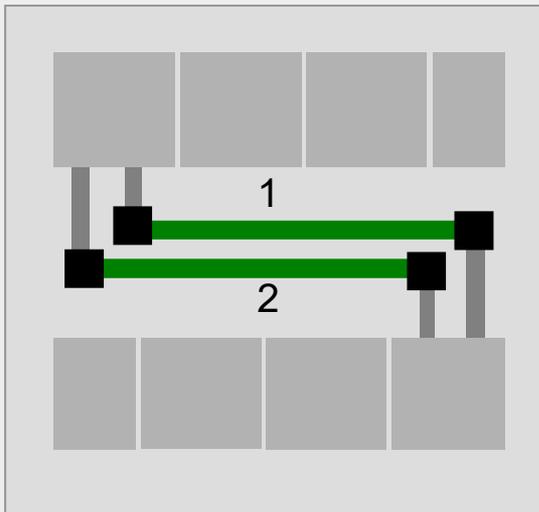


Baumstruktur

Bus-Verdrahtung (Bus routing)

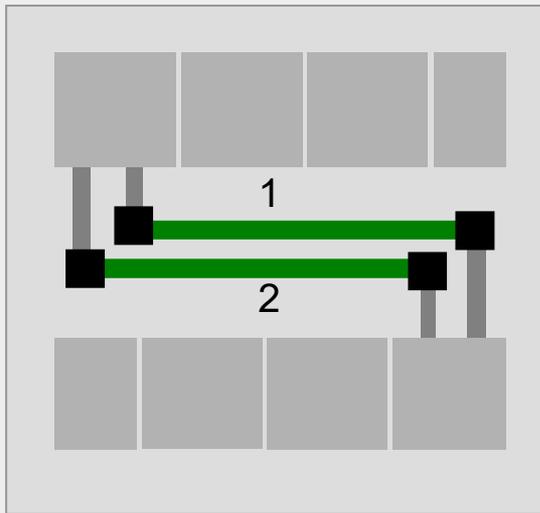


Symmetrische Signalübertragung (Differential pair routing)



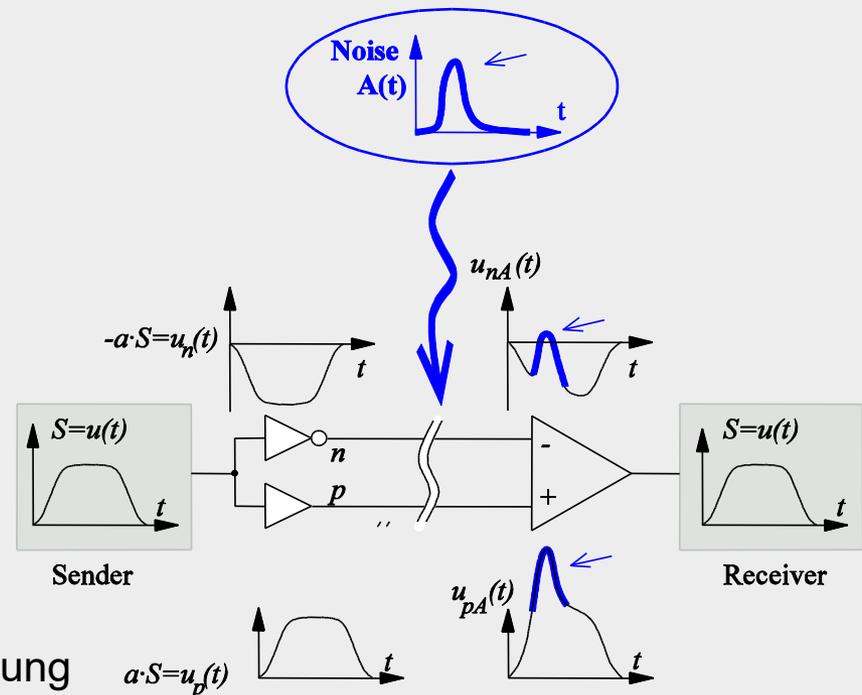
$$(R_1, C_1) = (R_2, C_2)$$

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

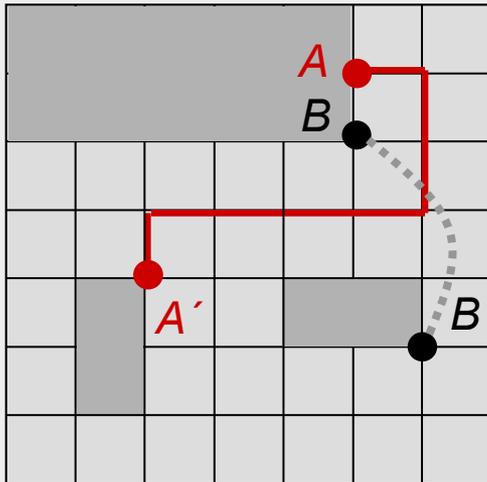
7.8 Quasiparallele Verdrahtung

7.9 Dreidimensionale Verdrahtung

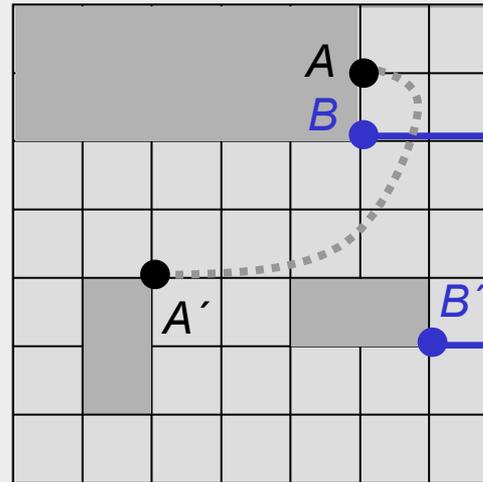
7.10 X-Verdrahtung

- 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

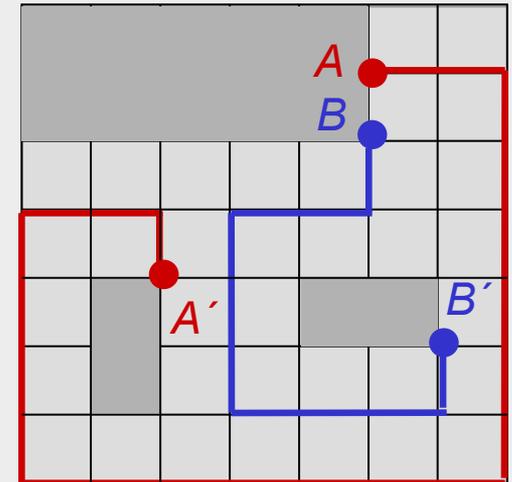
Verdrahtungserfolg



Vorrangige Verdrahtung
von Netz **A**

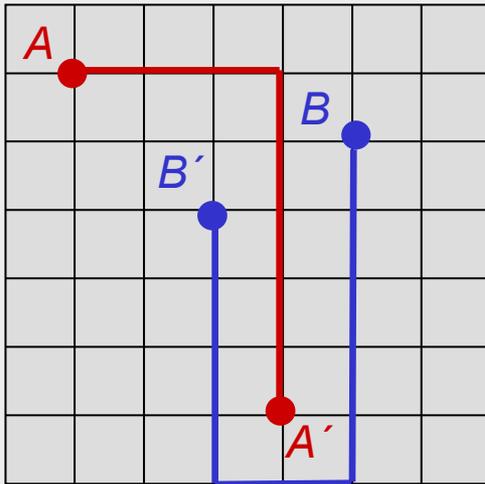


Vorrangige Verdrahtung
von Netz **B**

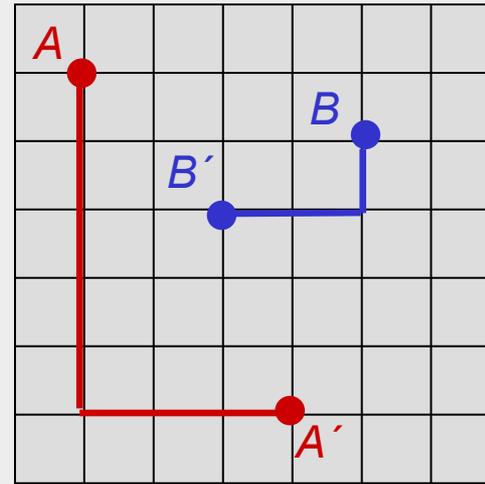


Nicht-optimale
Verdrahtung beider
Netze ermöglicht
Verbindungsrealisierung

Verdrahtungsqualität



Vorrangige Verdrahtung
von Netz *A*

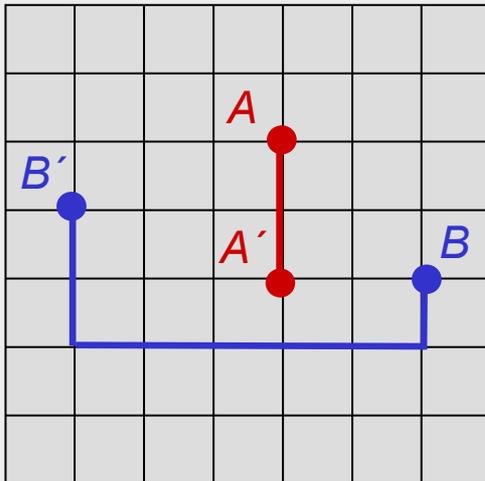


Vorrangige Verdrahtung
von Netz *B*

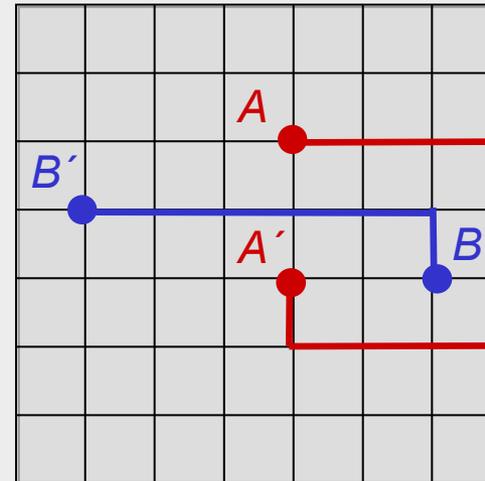
- Für n Netze ist die Suche nach der optimalen Reihenfolge von der Rechenkomplexität $O(n!)$, so dass sich diese Aufgabe einer optimalen algorithmischen Lösung entzieht
- ⇒ Bestimmung der Netzreihenfolge oft nach zuvor festgelegten **Regeln**

7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

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



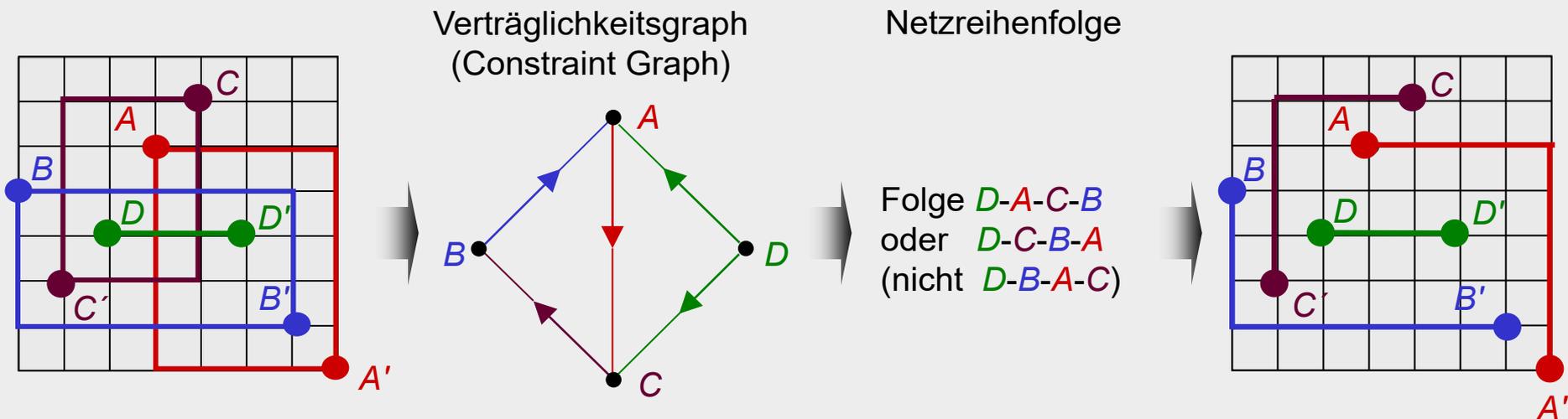
Vorrangige Verdrahtung
kürzerer Netze



Vorrangige Verdrahtung
längerer Netze

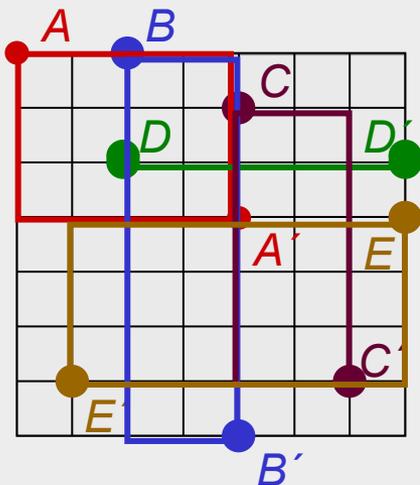
7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

- Variante 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

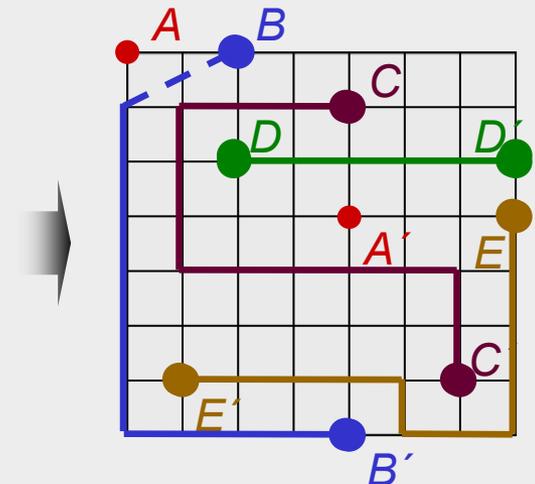


7.3 Festlegung der Netzreihenfolge

- Variante 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

7.4 Manhattan- und euklidische Metrik

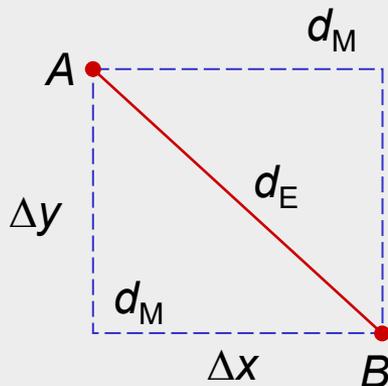
Die Abstandsfunktion in der Ebene für zwei Punkte (x_1, y_1) und (x_2, y_2) ist definiert mit

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

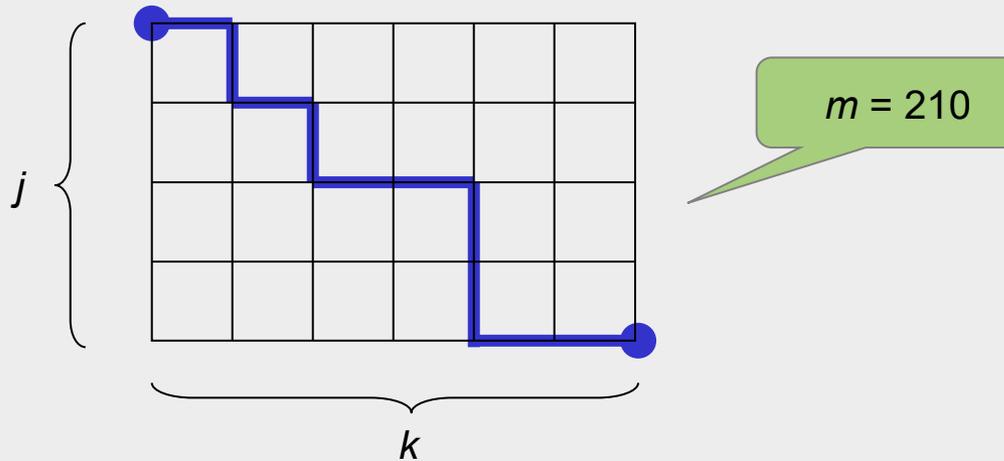
$$n \begin{cases} = 1 & \text{Manhattan-Metrik} \\ & \text{(Rectilinear/Manhattan metric)} \\ = 2 & \text{Euklidische Metrik} \\ & \text{(Euclidian/Boston metric)}. \end{cases}$$

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

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



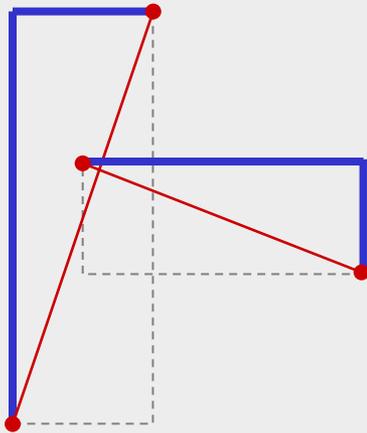
- Zwischen zwei Punkten existieren i.d.R. mehrere kürzeste Manhattan-Pfade, die alle innerhalb des kleinsten umschreibenden Rechtecks liegen.



Hinweis: Anzahl m der kürzesten Manhattan-Pfade auf hindernisfreien Gitterlinien:

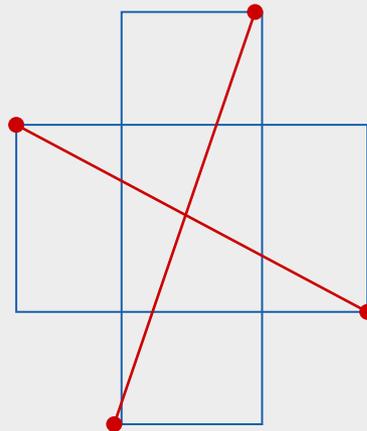
$$m = \binom{j+k-2}{j-1} = \frac{(j+k-2)!}{(j-1)! \cdot (k-1)!}$$

- Zwei Punktepaare können kreuzungsfreie kürzeste **Manhattan-Pfade** besitzen, ohne dass sie kreuzungsfreie kürzeste **euklidische Pfade** besitzen, aber nicht umgekehrt.



⇒ Schnittpunktbewertung von Flylines zur Verdrahtungs-/Ebenenabschätzung problematisch

- Wenn zwischen zwei Punktepaaren keine kreuzungsfreien kürzesten **Manhattan-Pfade** existieren, dann gilt das Gleiche auch für kürzeste **euklidische Pfade**.



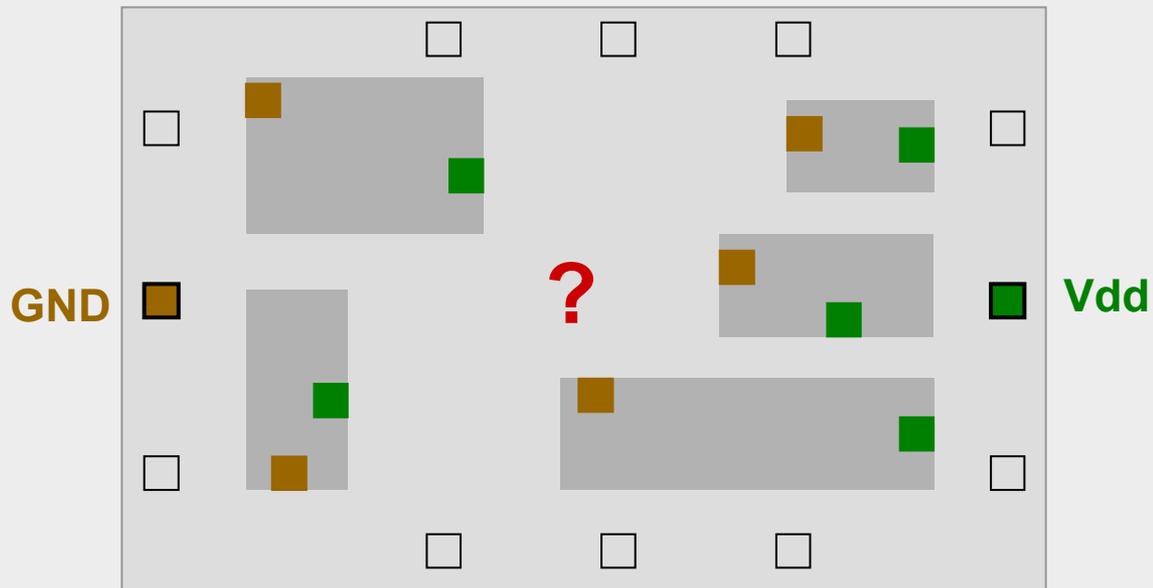
- ⇒ Bei einer nicht-realizierbaren kreuzungsfreien kürzesten **Manhattan-Verbindung** gibt es auch keine kreuzungsfreie kürzeste **euklidische Verbindung**
- ⇒ Schnittpunktbewertung von umschließenden Rechteck zur Verdrahtungs- bzw. Ebenenabschätzung sinnvoll

- Der **Manhattan-Abstand** d_M ist oft kaum größer als der **euklidische Abstand** d_E :

$$\frac{d_M}{d_E} = \begin{cases} 1.41 & \text{im ungünstigsten Fall, d.h. quadratische Anordnung } (\Delta x = \Delta y) \\ 1.27 & \text{im statistischen Mittel ohne Hindernisse} \\ 1.15 & \text{im statistischen Mittel mit Hindernissen} \end{cases}$$

⇒ Manhattan-Verdrahtung weit verbreitet

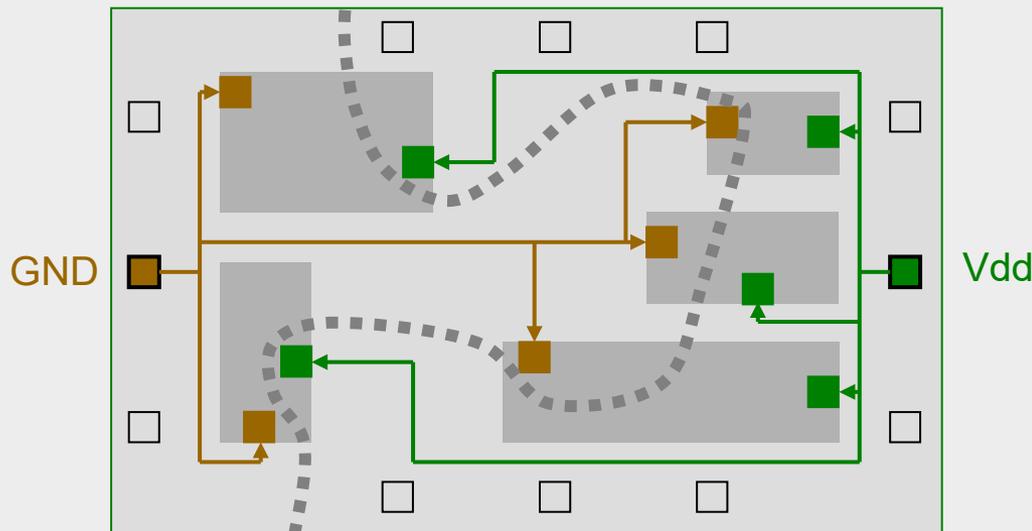
- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
-  **7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze**
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
 - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
 - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit 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

Schritt 1: Planar-topologische Darstellung der Netze

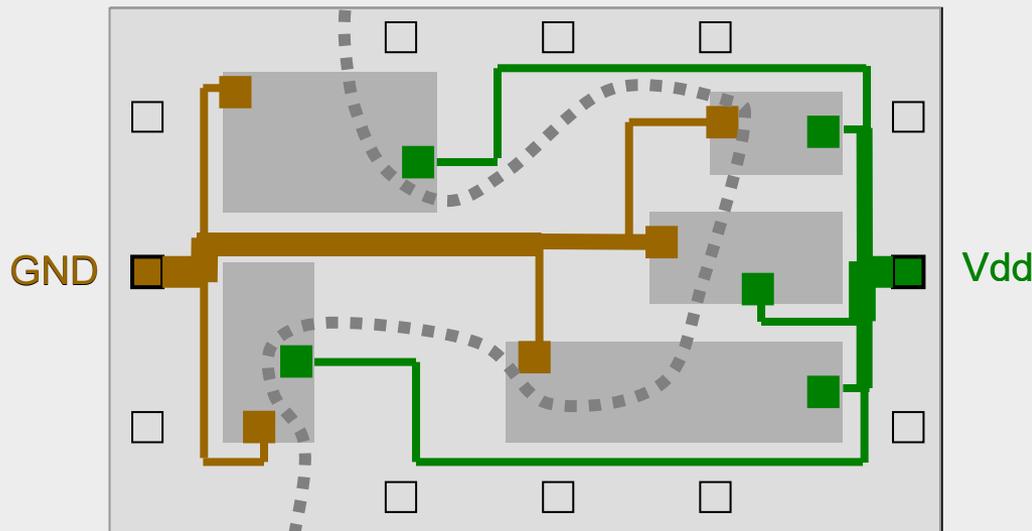
- Unter Beachtung der Hamiltonschen Linie sind zwei Bäume zu generieren, einer vom linken und der andere vom rechten Schaltungsrand
- Die Verdrahtungswege richten sich nach den Pinanschlüssen, wobei diese, vom Abstand zum linken bzw. rechten Schaltungsrand ausgehend, streng nacheinander angeschlossen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



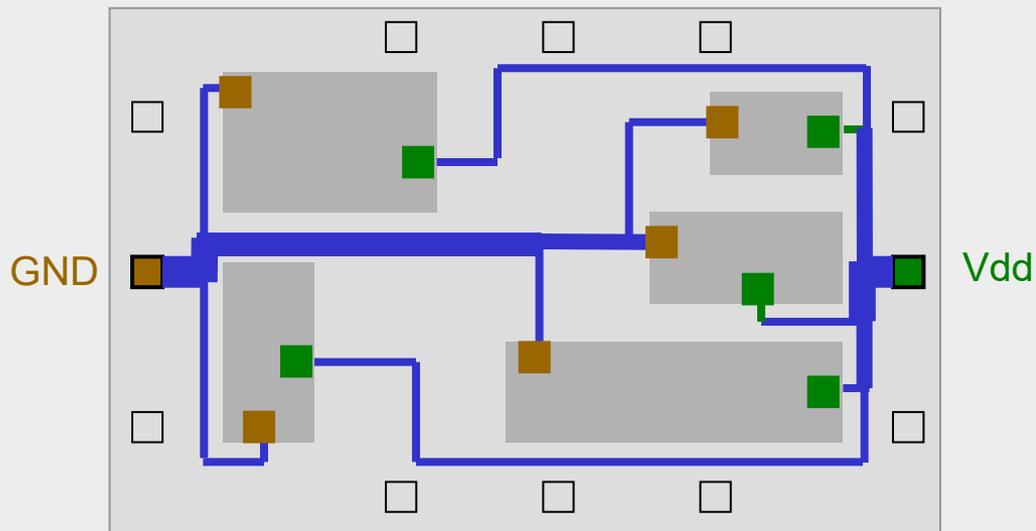
Schritt 1: Planar-topologische Darstellung der Netze

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

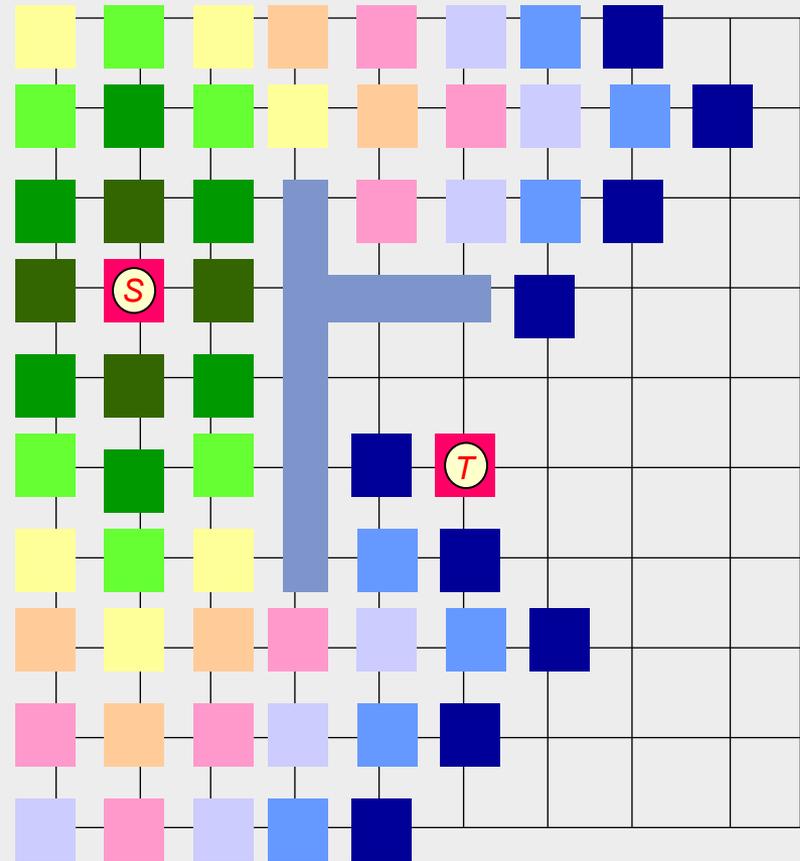
	<i>Lee</i> (1961)	<i>Müller</i> (1990)	<i>Hightower</i> (1969)
Methode	Rasterverdrahter	Rasterverdrahter	Linienverdrahter
Algorithmus	Breadth-First-Search im Gitter	Best-First-Search im Gitter	Depth-First-Search in der Ebene
Vorteile	Lösungsgarantie	Optimaler Weg bzgl. mehrerer Kriterien	Schnell, wenig 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

- 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

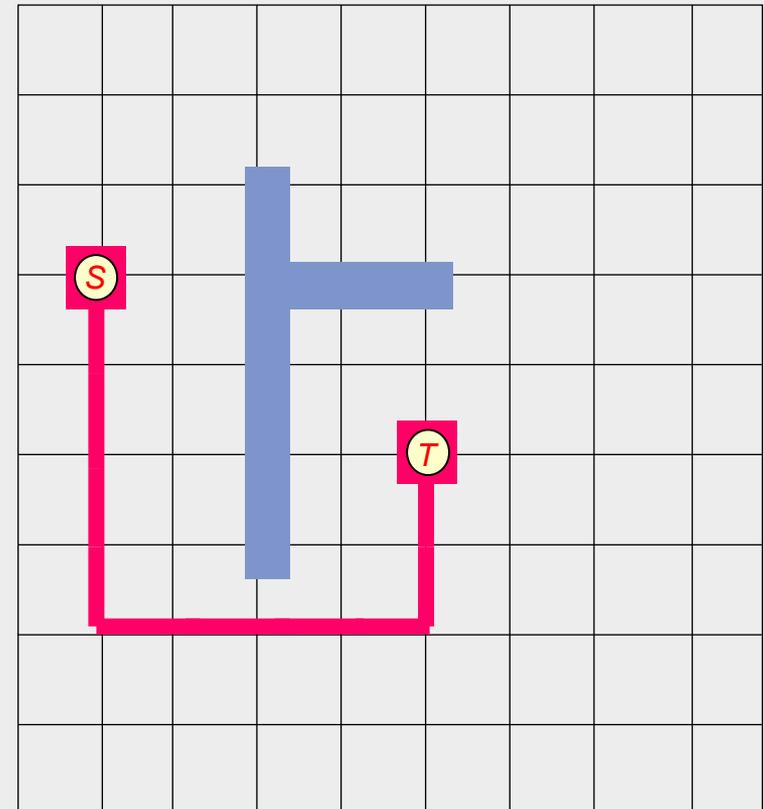
Ablauf:

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).

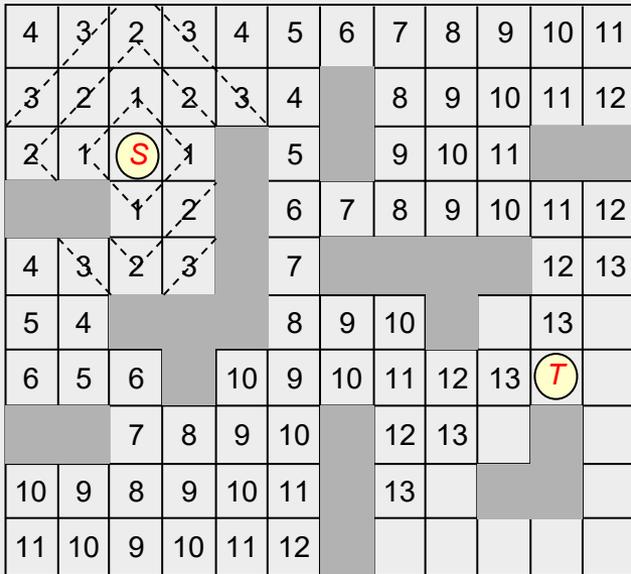
1. Ausbreitungsphase von S nach T .
Indizieren aller freien Nachbarpunkte des Rasterpunktes i mit $i+1$, beginnend bei S mit Index 0 und so lange fortfahrend, bis T indiziert ist oder keine Indizierungen mehr möglich sind. Im letzteren Fall ABBRUCH.
2. Rückverfolgungsphase von T nach S .
Iteratives Rückverfolgen 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.

7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee: Beispiel

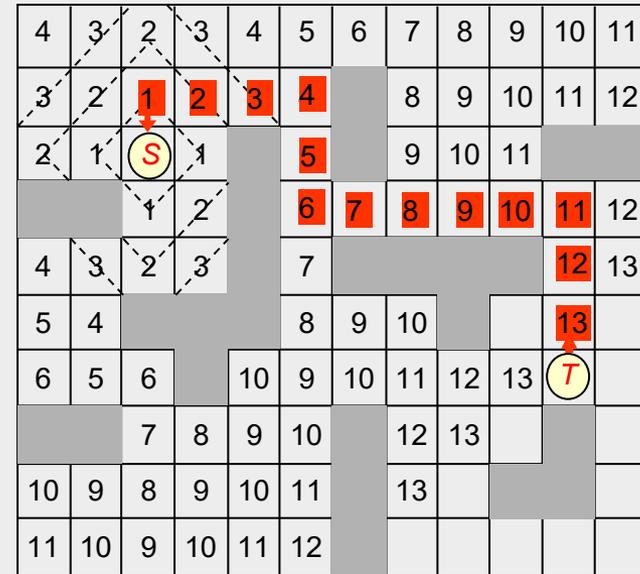
4	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	2	1	2	3	4		8	9	10	11	12
2	1	S	1		5		9	10	11		
		1	2		6	7	8	9	10	11	12
4	3	2	3		7					12	13
5	4				8	9	10			13	
6	5	6		10	9	10	11	12	13	T	
		7	8	9	10		12	13			
10	9	8	9	10	11		13				
11	10	9	10	11	12						

a) Ausbreitungsphase

7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee: Beispiel

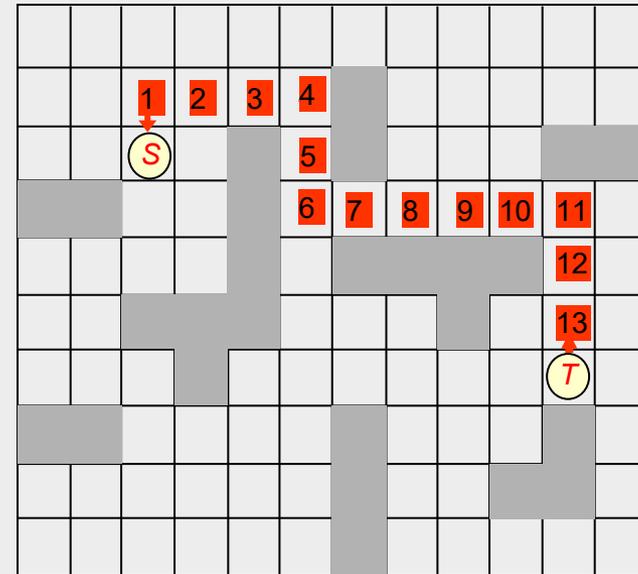


a) Ausbreitungsphase



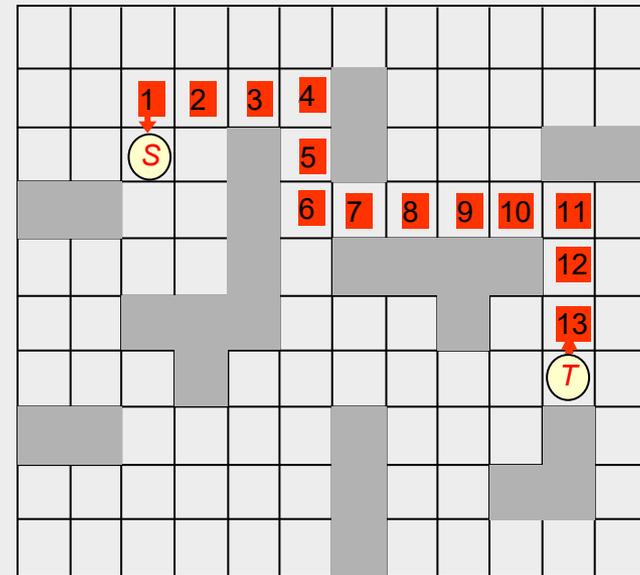
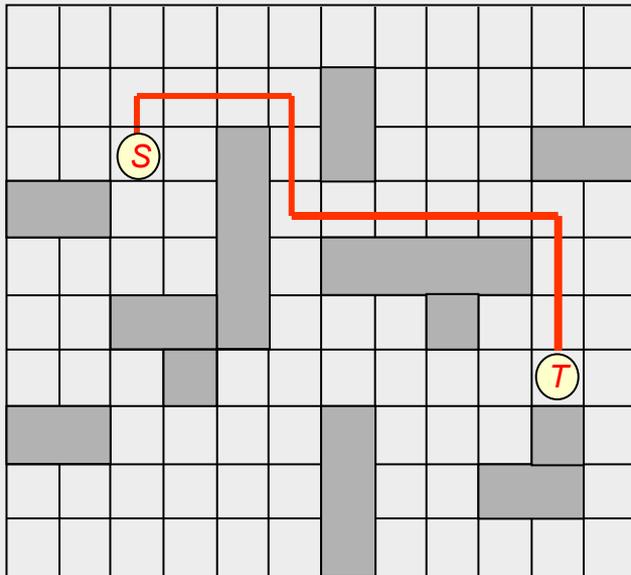
b) Rückverfolgungsphase

7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee: Beispiel



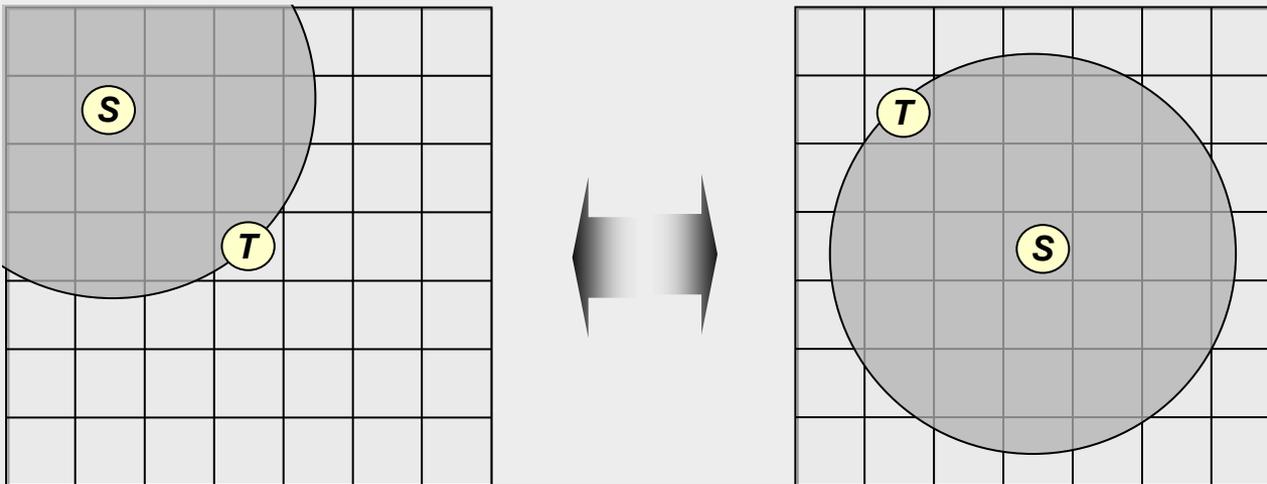
c) Aufräumphase

7.7.1 Rasterverdrahtung nach Lee: Beispiel



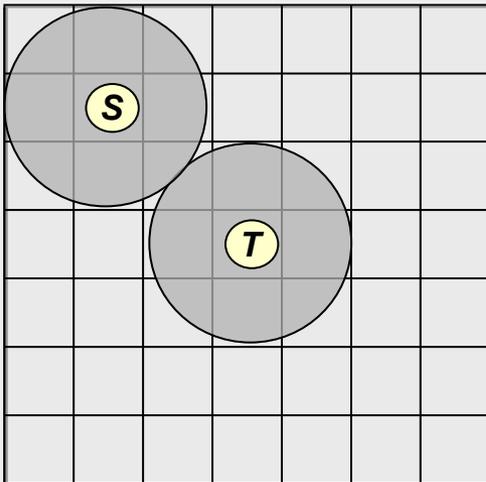
c) Aufräumphase

Einsparung von Rechenzeit



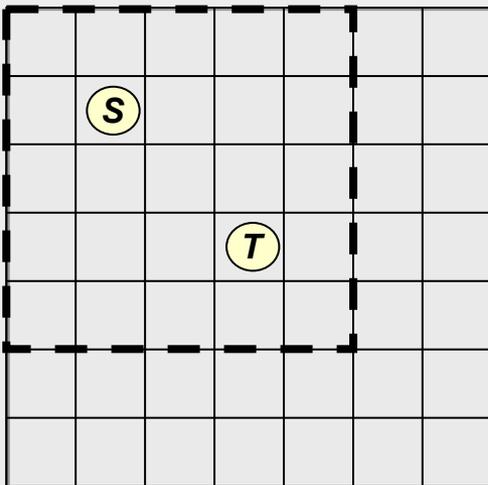
Geeignete Auswahl des Startpunktes

Einsparung von Rechenzeit



Gleichzeitige Ausbreitung (Double fan-out)

Einsparung von Rechenzeit



Suchraum-Begrenzung (Framing)

Einsparung von Speicherplatz

2	1	2	3			
1	S	1	2			
2	1	2	3			
		3	1	2	3	
		1	2	3		
		2	3	T		
		3				

1,2,3-Sequenz

⇒ drei Bit pro Rasterpunkt

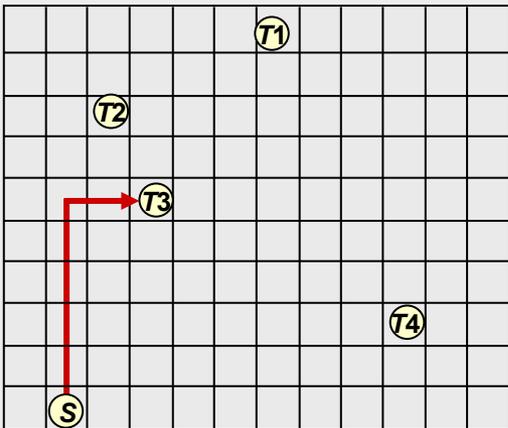
Einsparung von Speicherplatz

1	1	1	2			
1	S	1	1			
1	1	1	2			
		2	2	1	1	
		2	1	1		
		1	1	T		
		1				

1,1,2,2-Sequenz

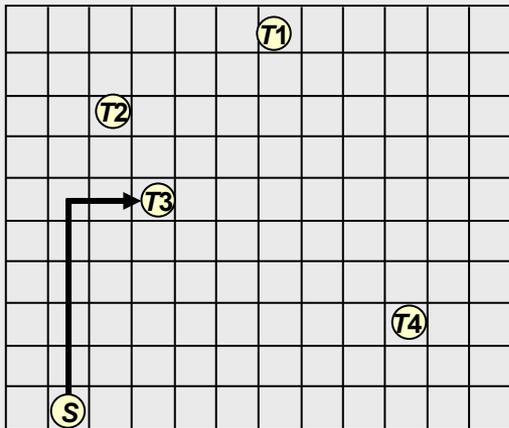
⇒ zwei Bit pro Rasterpunkt

Verbindung von Multi-Pin-Netzen

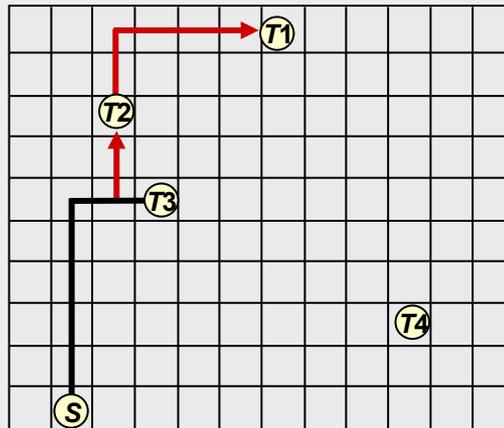


Verbindung S-T3

Verbindung von Multi-Pin-Netzen

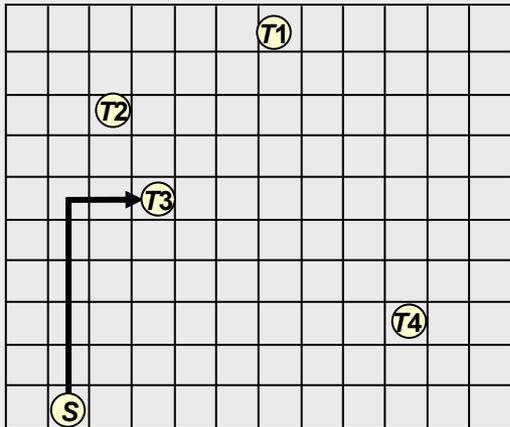


Verbindung S-T3

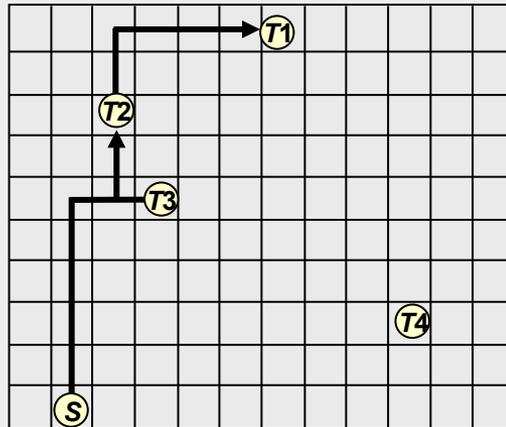


Anschluss T2, T1

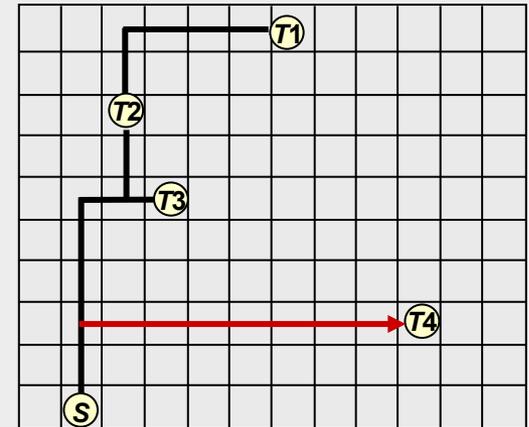
Verbindung von Multi-Pin-Netzen



Verbindung S-T3

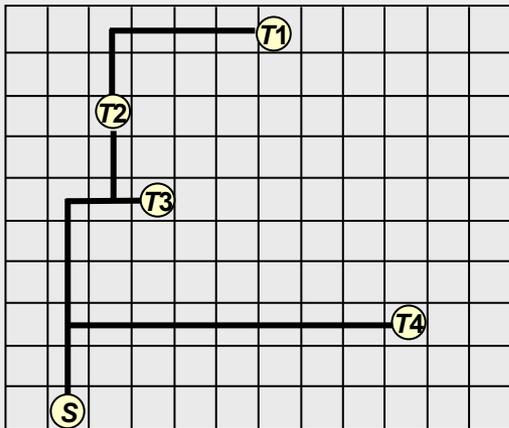


Anschluss T2, T1



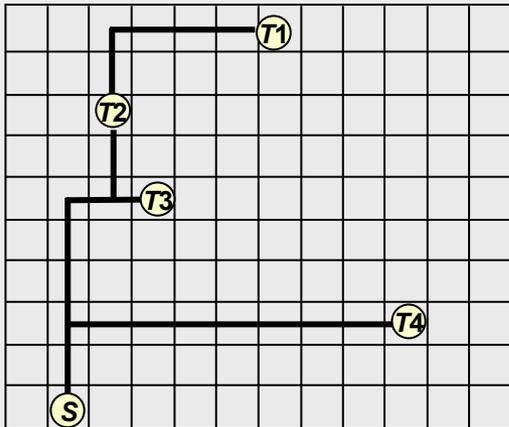
Anschluss T4

Verbindungsoptimierung

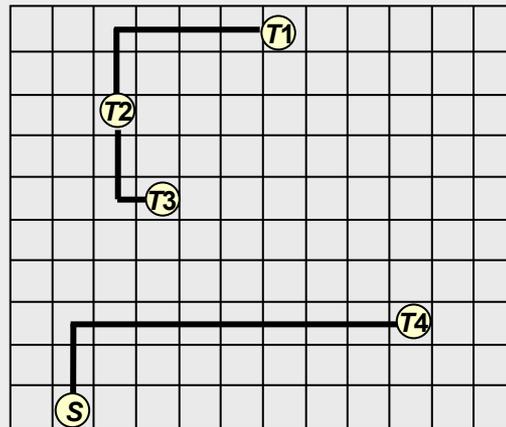


Originale Netzverbindung

Verbindungsoptimierung

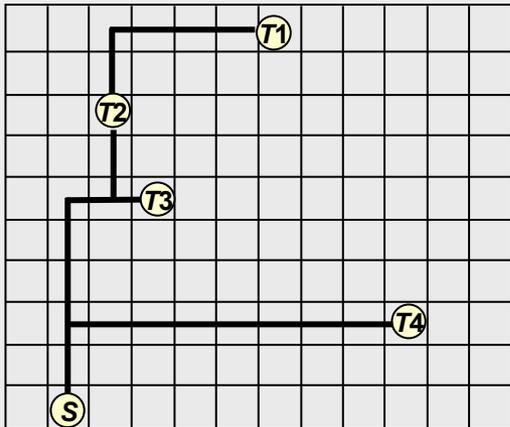


Originale Netzverbindung

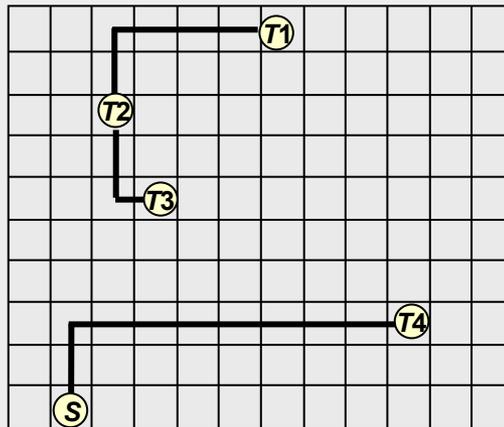


Auftrennung in Teilnetze

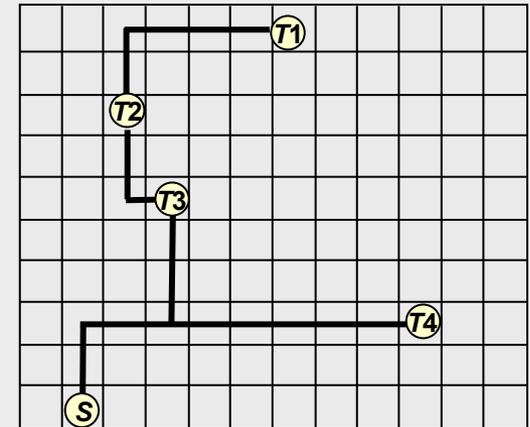
Verbindungsoptimierung



Originale Netzverbindung

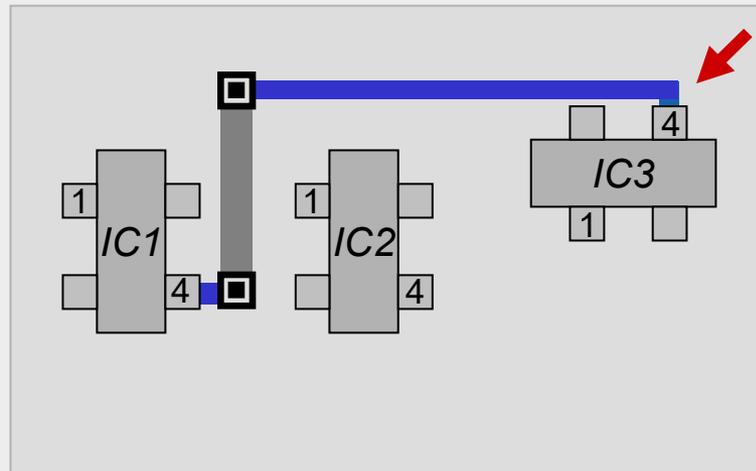


Auftrennung in Teilnetze



Netz nach Neuverdrahtung

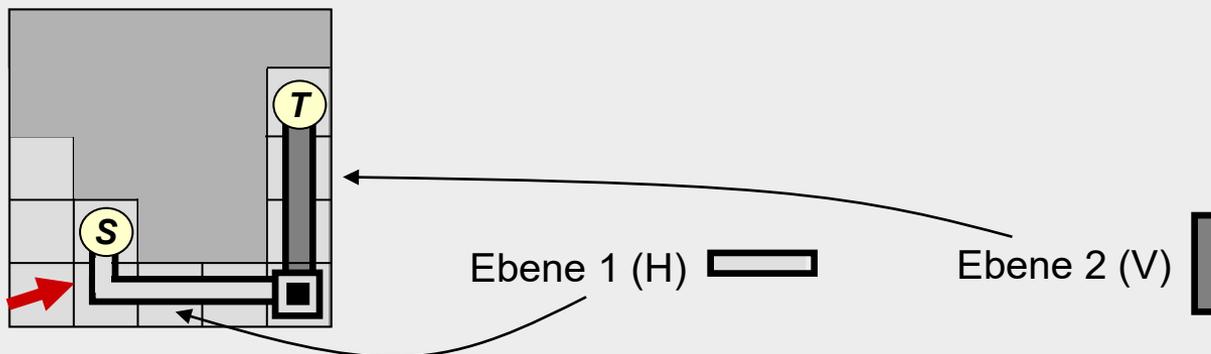
7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung



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

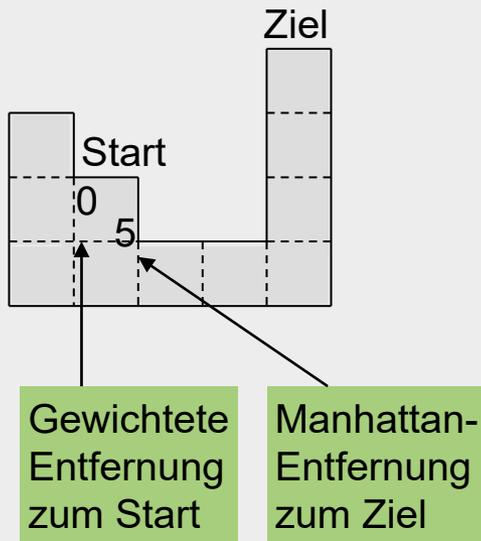


7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung

- Während der Wegsuche werden jedem Rasterpunkt α zwei Bewertungskriterien $d_w(\alpha)$ und $d_m(\alpha)$ zugeordnet:
 - Die **Wegkosten** $d_w(\alpha)$ des Rasterpunktes α , 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 α zum Ziel angibt.
- Der Rasterpunkt α_i mit minimaler Summe $d_w(\alpha_i) + d_m(\alpha_i)$ indiziert jeweils seine Nachbarn. Gibt es hier mehrere Rasterpunkte α_i , so ist der Punkt mit minimaler Manhattan-Entfernung zum Ziel zu nehmen.
- Rückverfolgung nach Zielerreichung

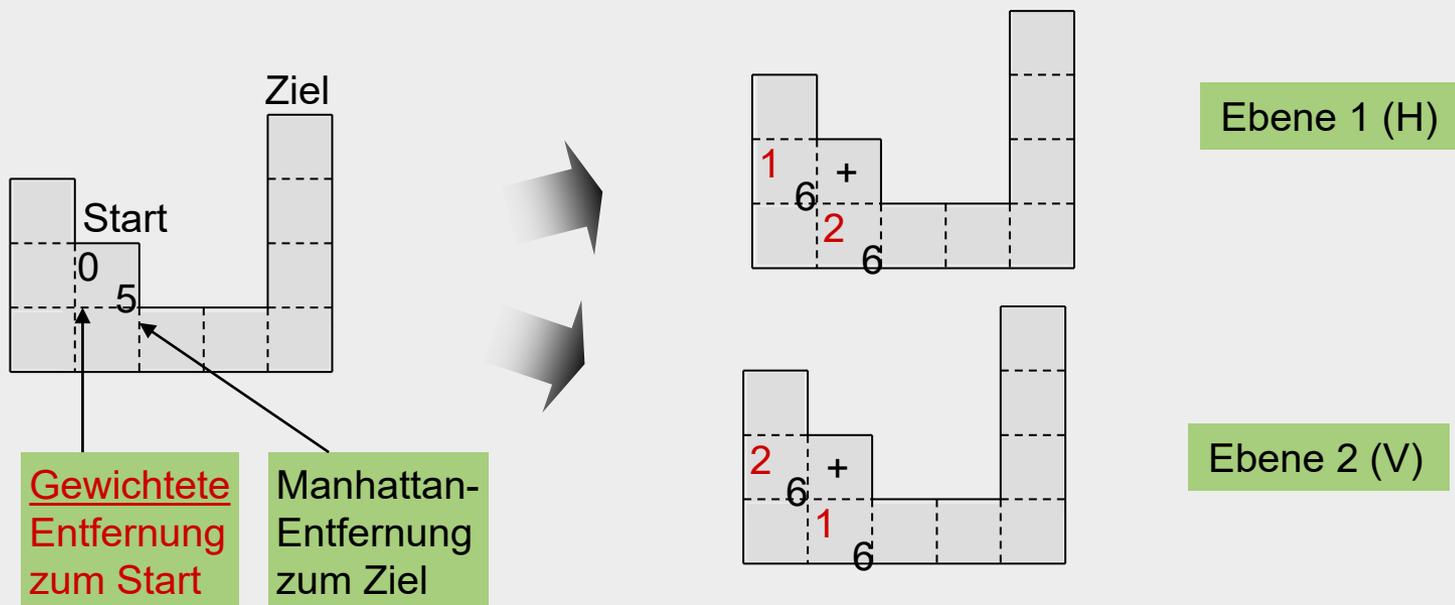
7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

- 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

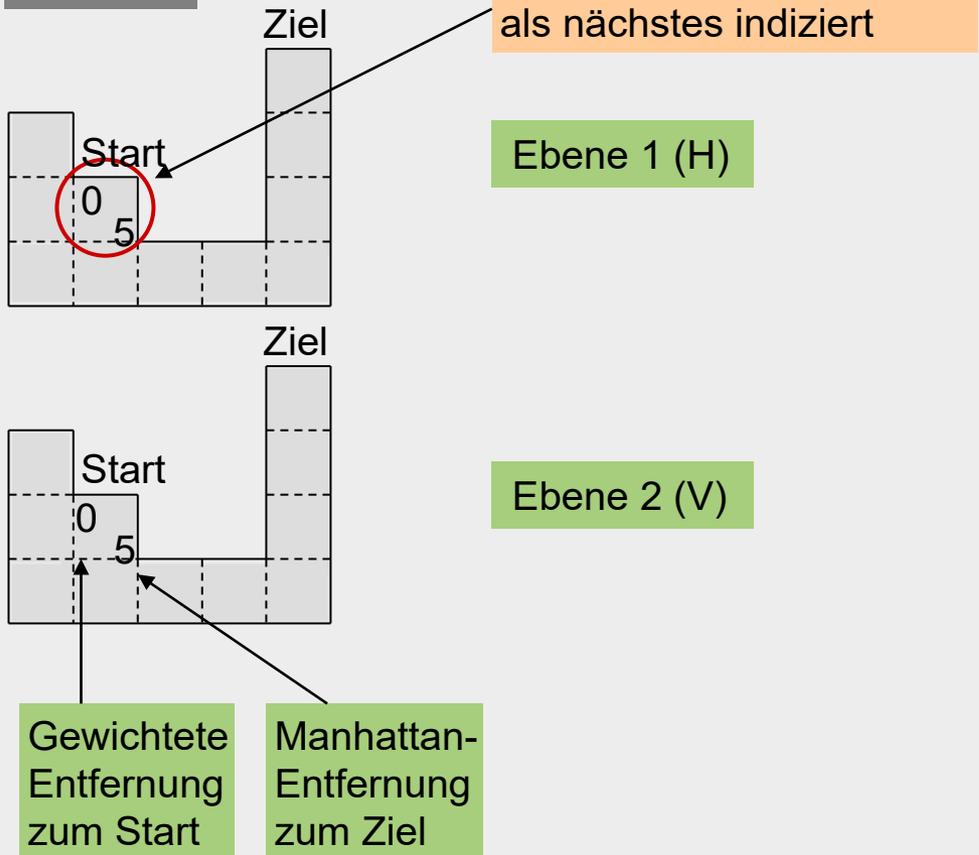


7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

- 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



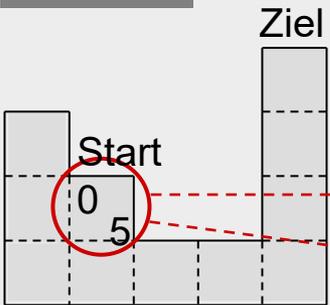
Schritt 1:



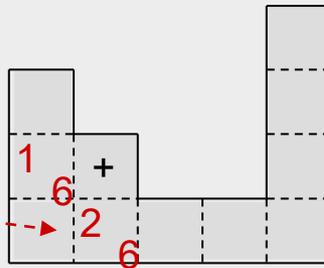
Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

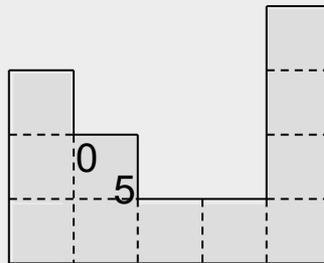
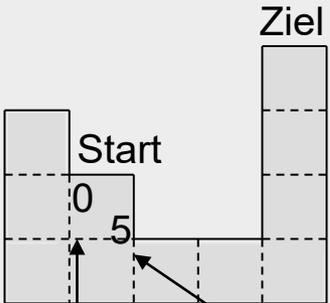
Schritt 1:



Schritt 2:



Ebene 1 (H)



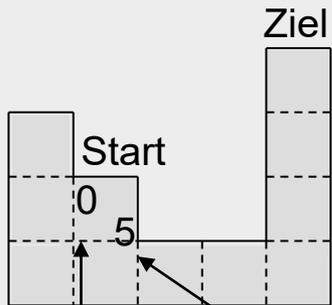
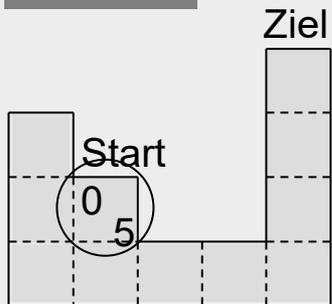
Ebene 2 (V)

Gewichtete Entfernung zum Start

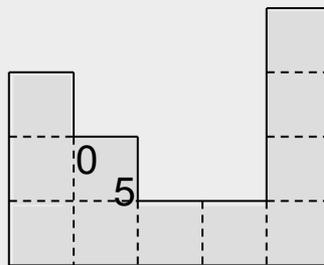
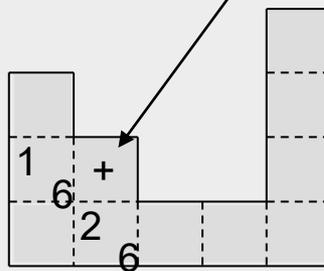
Manhattan-Entfernung zum Ziel

Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

Schritt 1:



Schritt 2:

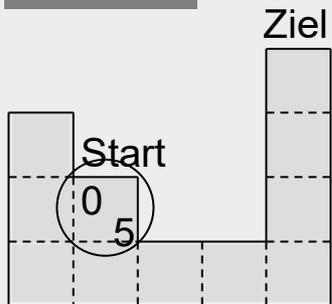
Ehemaliger Punkt mit minimaler Summe
(möglicher Rückverfolgungsweg)

Ebene 1 (H)

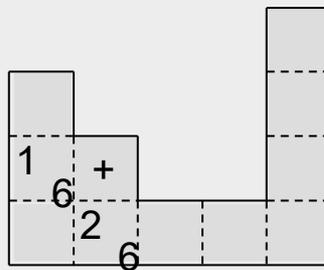
Ebene 2 (V)

Gewichtete
Entfernung
zum StartManhattan-
Entfernung
zum Ziel

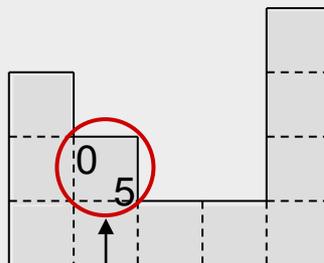
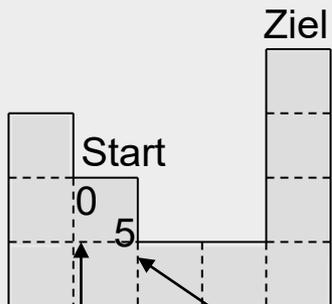
Schritt 1:



Schritt 2:



Ebene 1 (H)

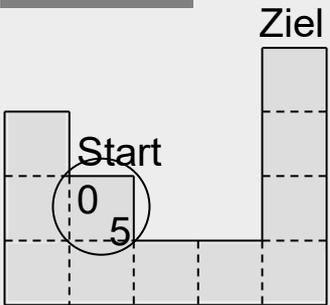


Ebene 2 (V)

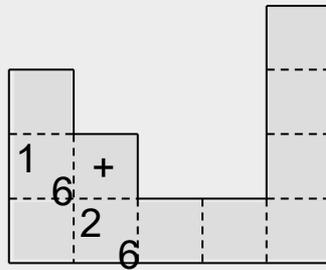
Gewichtete
Entfernung
zum StartManhattan-
Entfernung
zum ZielAktueller Punkt mit minimaler Summe, der
seine Nachbarn als nächstes indiziert ?

7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

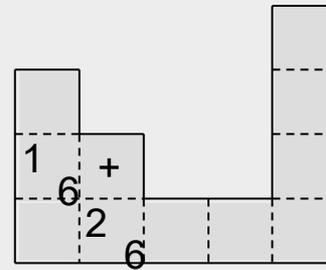
Schritt 1:



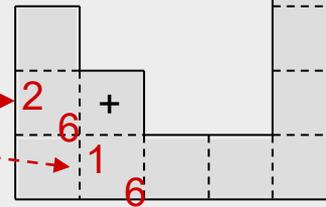
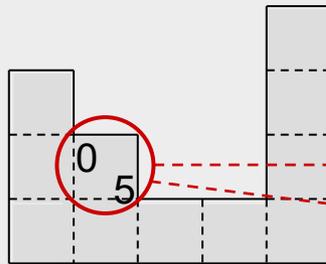
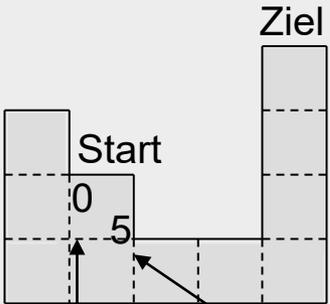
Schritt 2:



Schritt 3:



Ebene 1 (H)



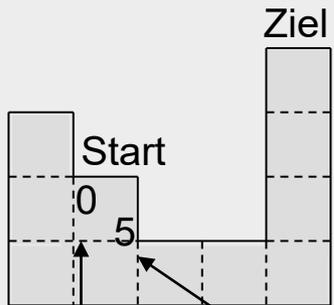
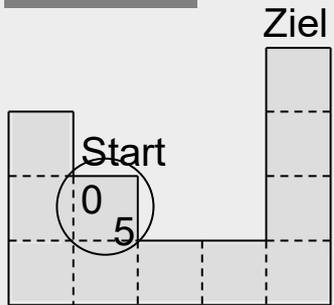
Ebene 2 (V)

Gewichtete Entfernung zum Start

Manhattan-Entfernung zum Ziel

Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

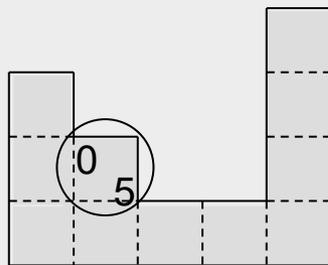
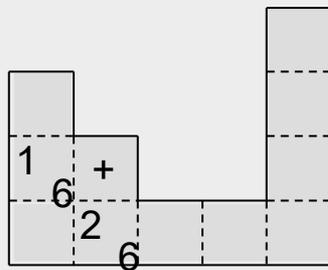
Schritt 1:



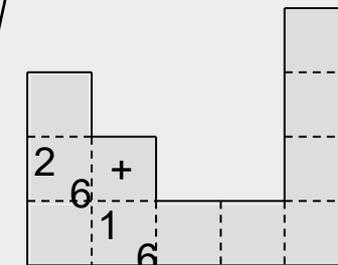
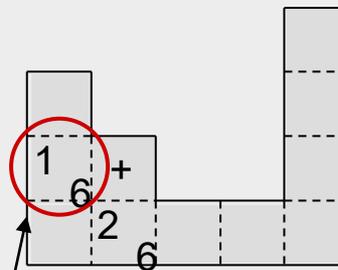
Gewichtete Entfernung zum Start

Manhattan-Entfernung zum Ziel

Schritt 2:



Schritt 3:



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

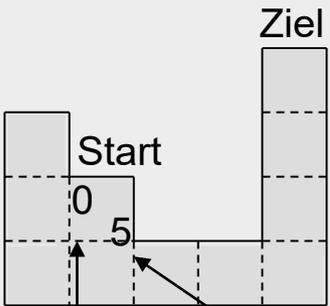
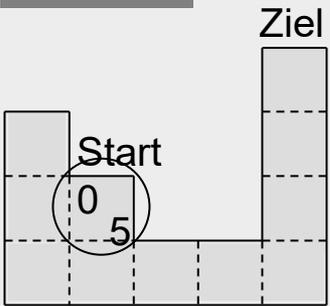
Ebene 1 (H)

Ebene 2 (V)

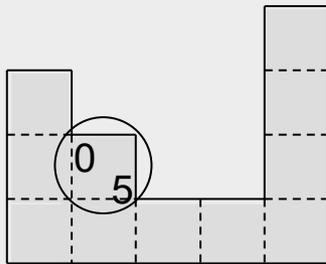
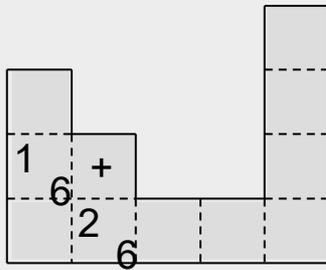
Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

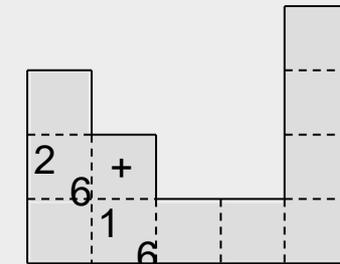
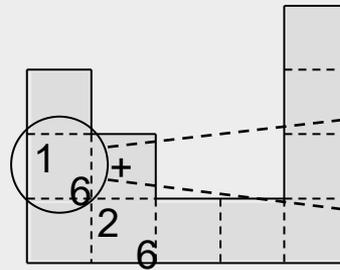
Schritt 1:



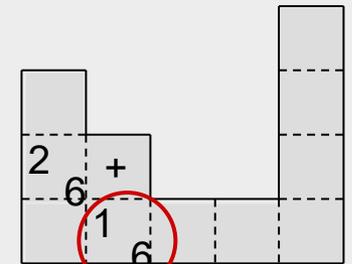
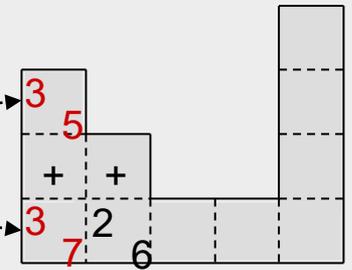
Schritt 2:



Schritt 3:



Schritt 4:



Ebene 1 (H)

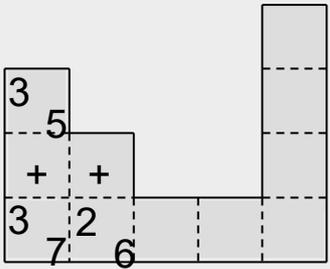
Ebene 2 (V)

Gewichtete Entfernung zum Start

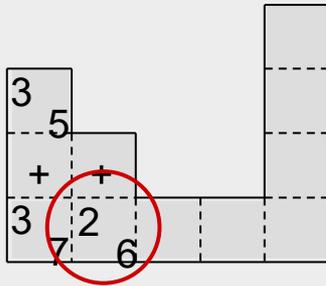
Manhattan-Entfernung zum Ziel

Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

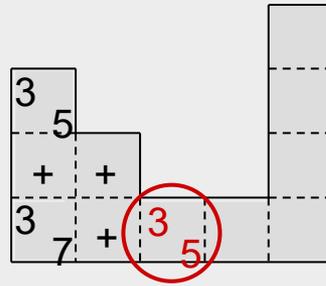
Schritt 5:



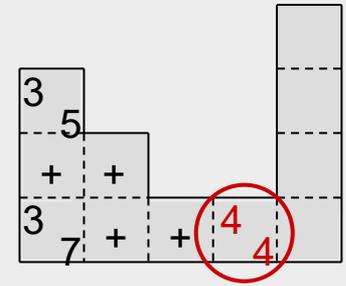
Schritt 6:



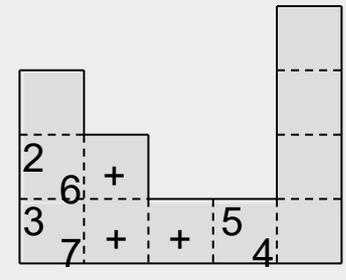
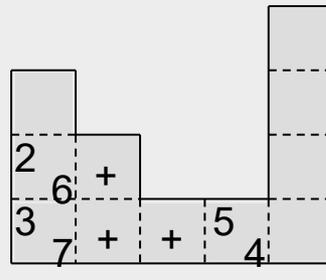
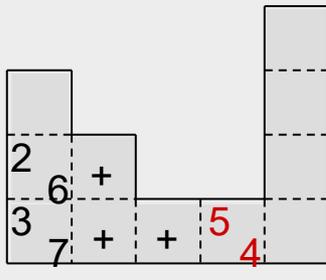
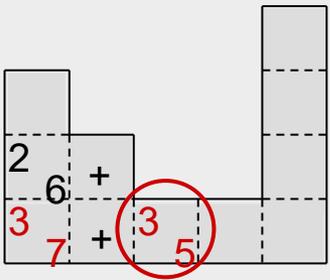
Schritt 7:



Schritt 8:

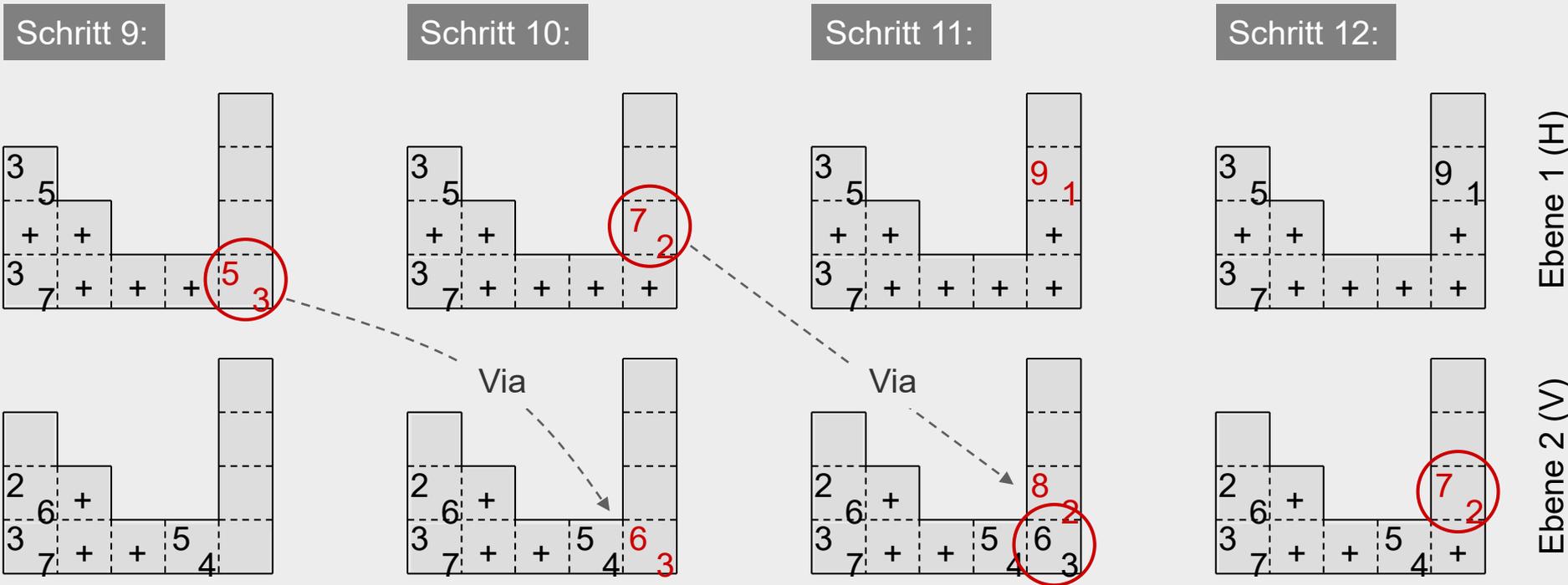


Ebene 1 (H)



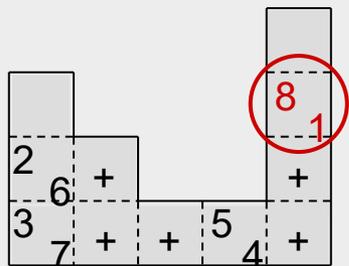
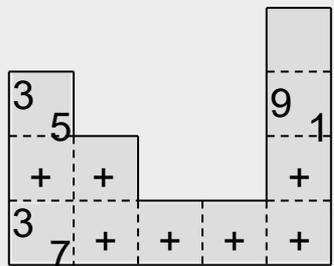
Ebene 2 (V)

7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Beispiel

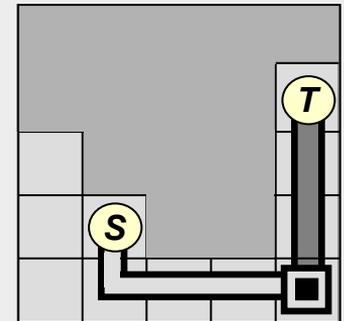
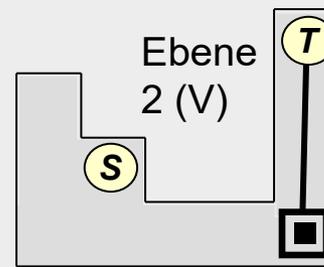
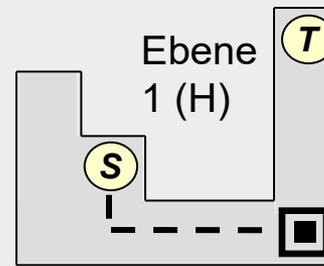
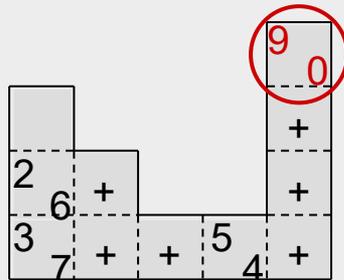
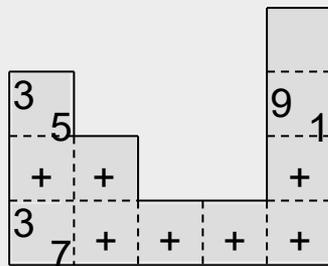


Nach Müller, H.: Algorithmen zur Mehrlagenverdrahtung

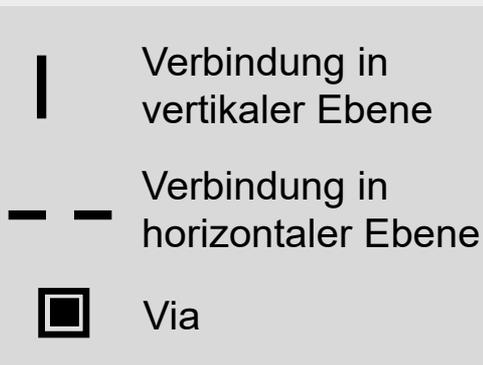
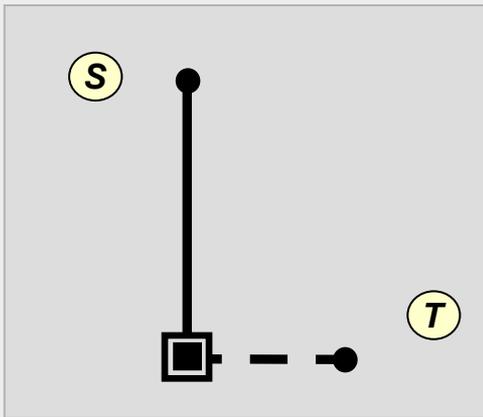
Schritt 13:



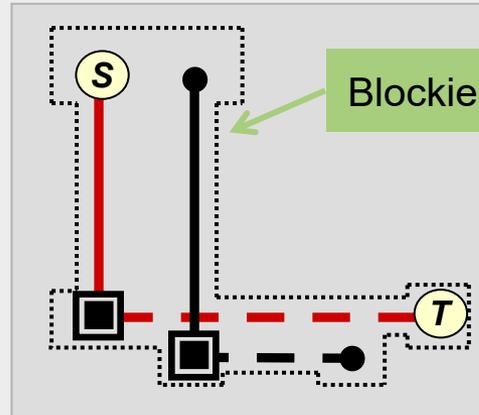
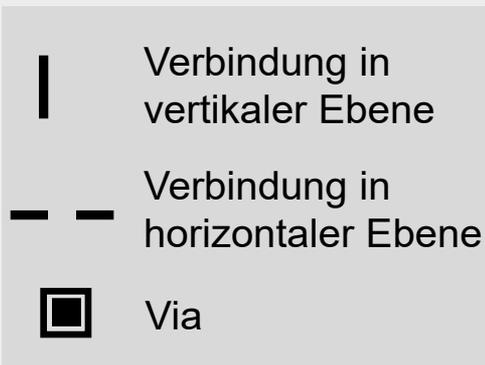
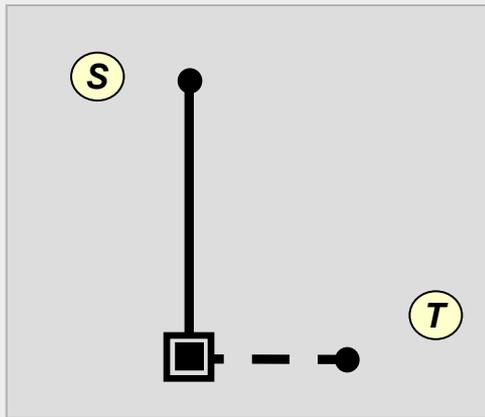
Schritt 14:



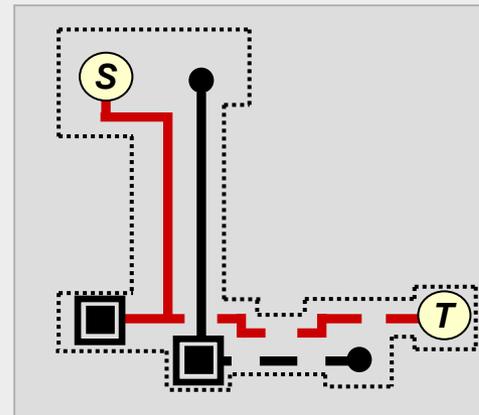
7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Adaptive Optimierung



7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung: Adaptive Optimierung



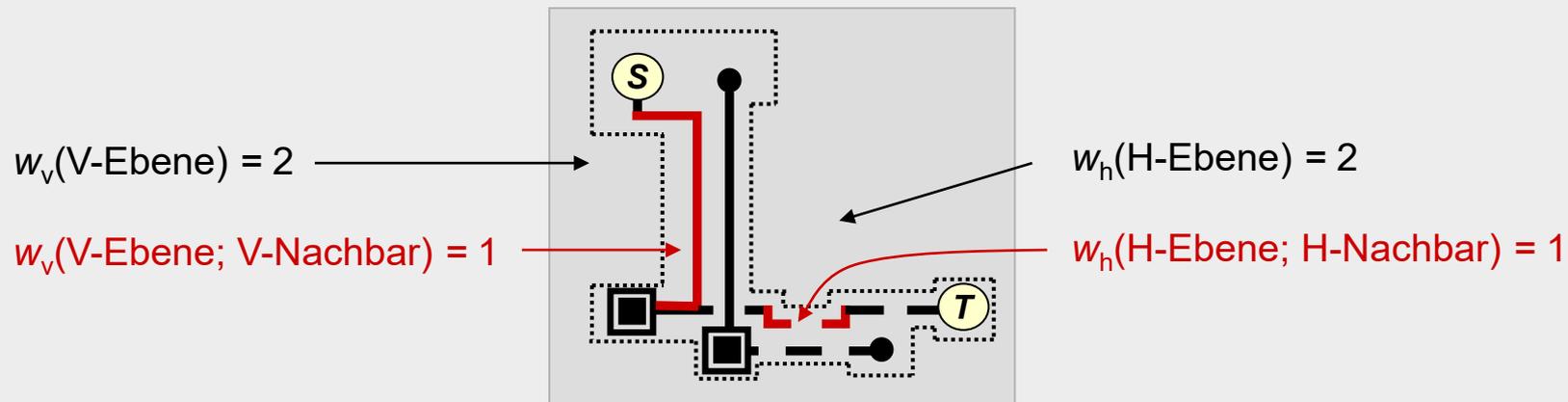
Kürzeste Verbindung S-T



Minimierung der blockierten Fläche

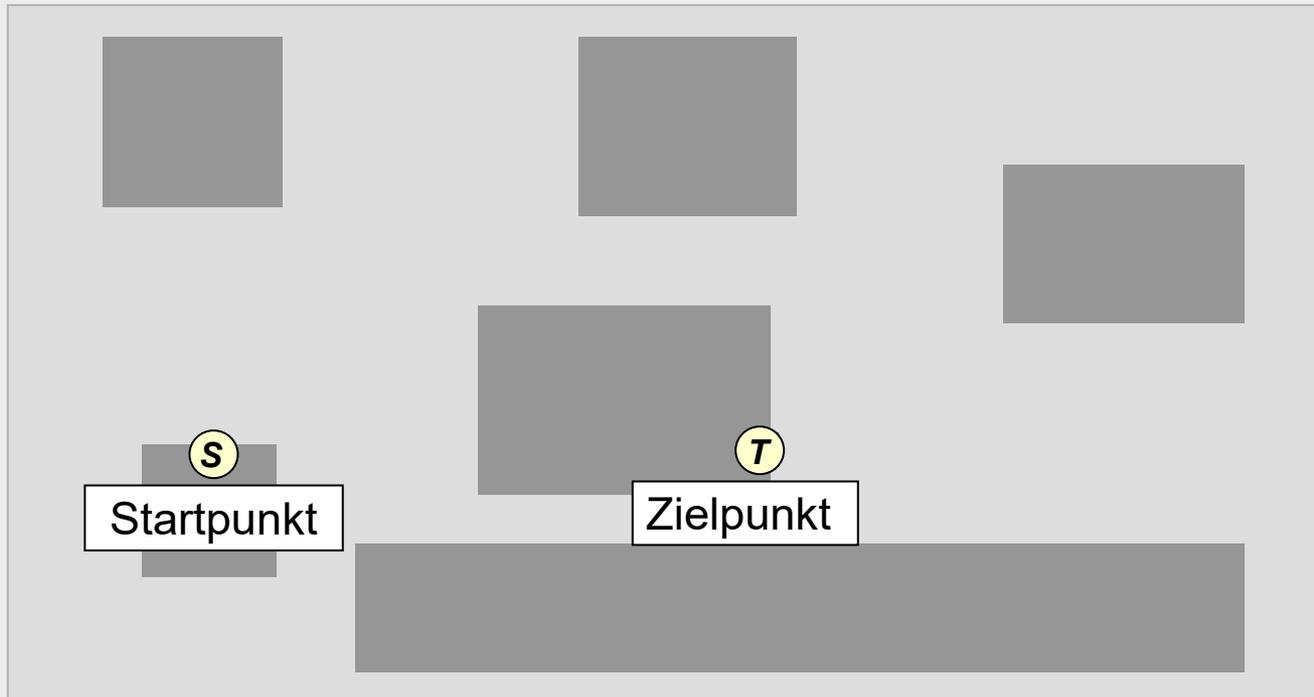
Vorgehensweise

- 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

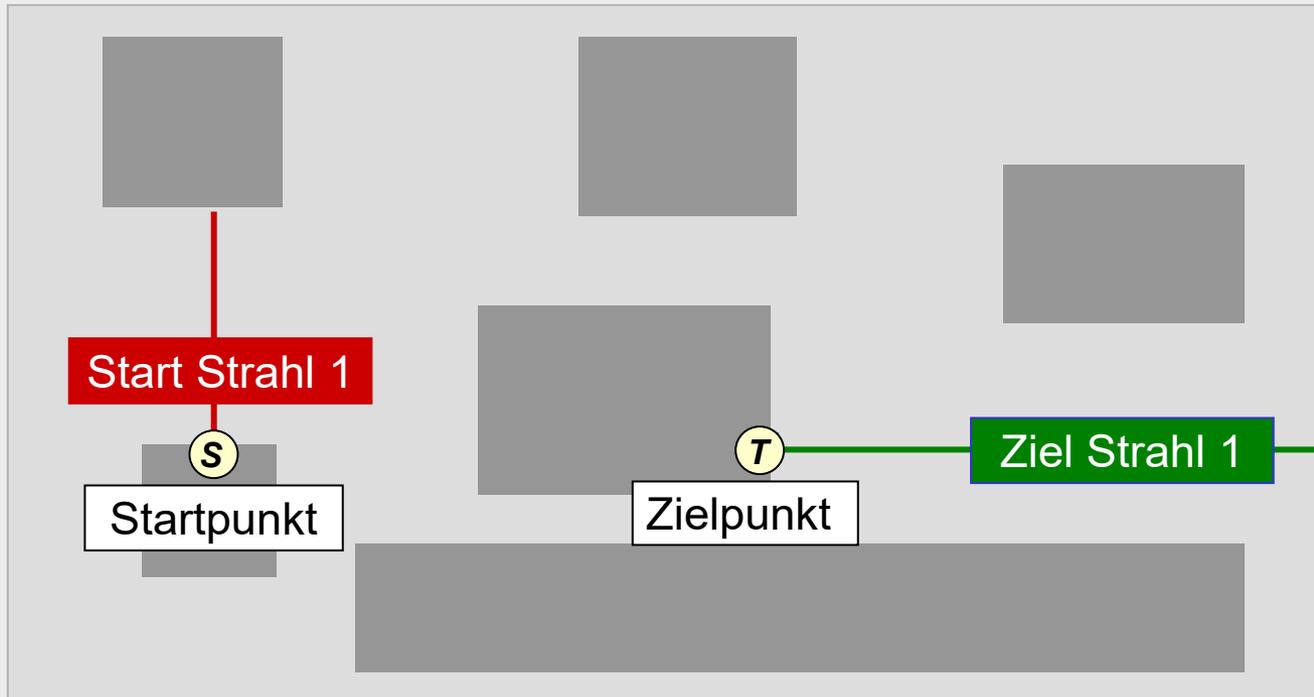


- Nachteile der Rasterverdrahtung (Zeit- und Speicherbedarf) führten zur Entwicklung von Linienverdrahtern
- Aussendung von (Such-)Strahlen vom Start- und vom Zielpunkt bis zu deren Überschneidung
- Vorteil: schnelle Wegfindung
- Nachteile:
 - Nicht immer wird Weg gefunden, auch wenn einer existiert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

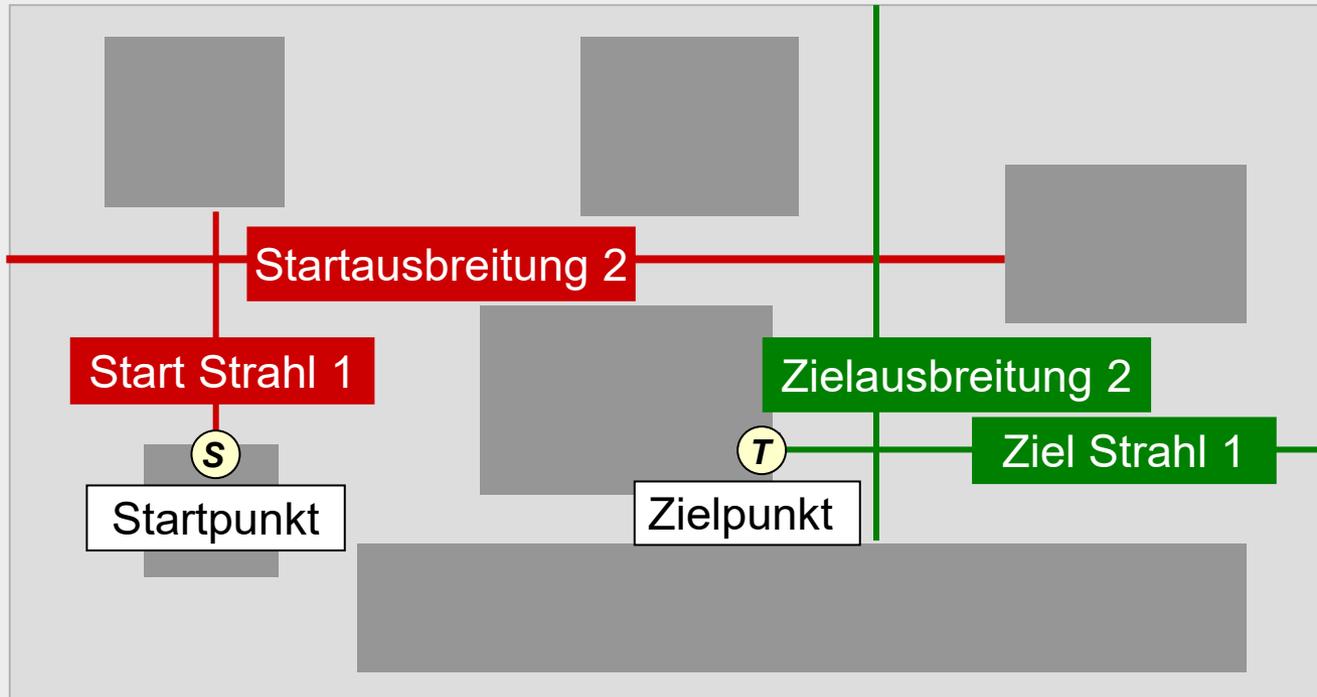
7.7.3 Linienverdrahtung



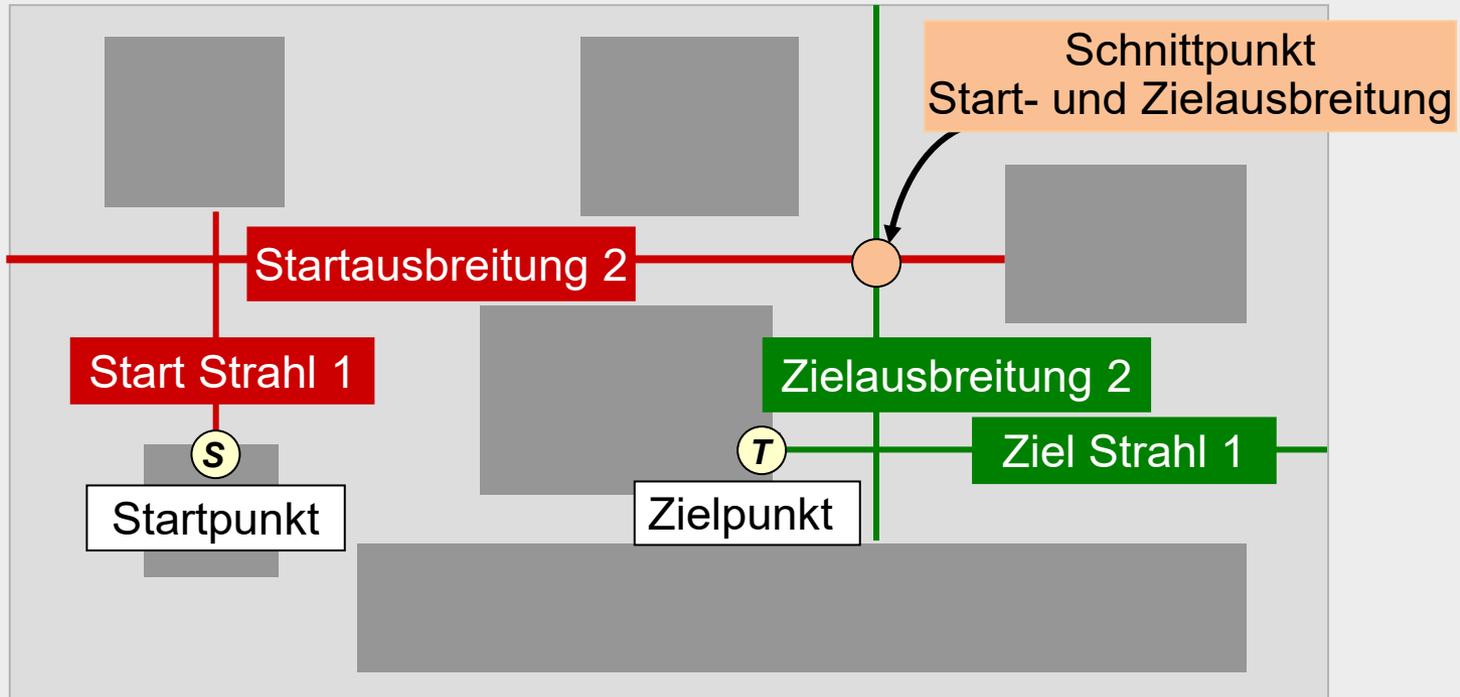
7.7.3 Linienverdrahtung



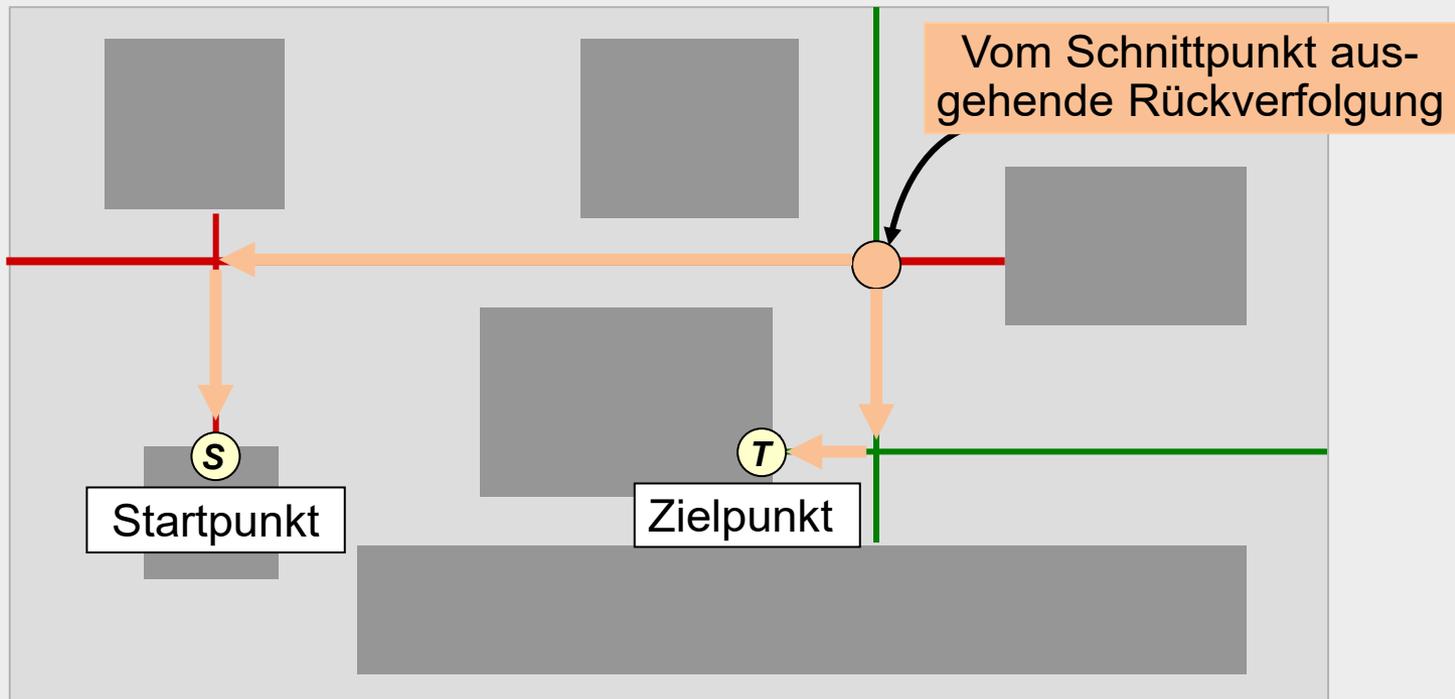
7.7.3 Linienverdrahtung



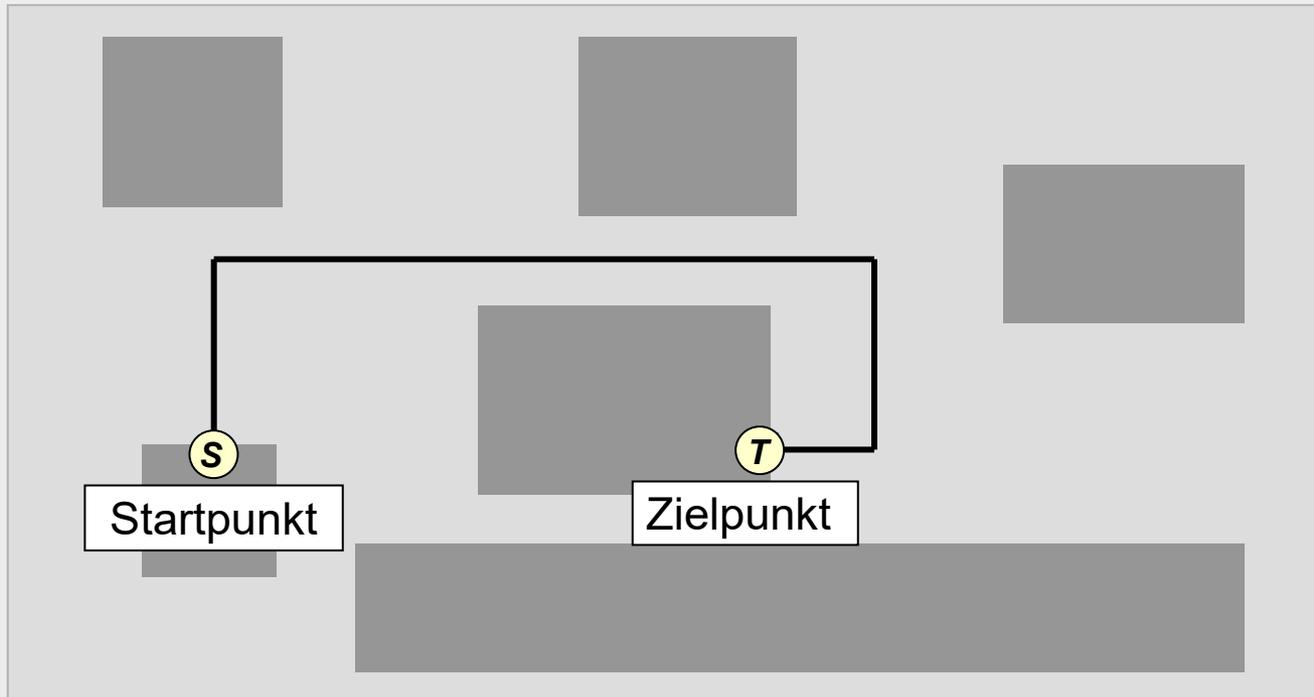
7.7.3 Linienverdrahtung



7.7.3 Linienverdrahtung



7.7.3 Linienverdrahtung



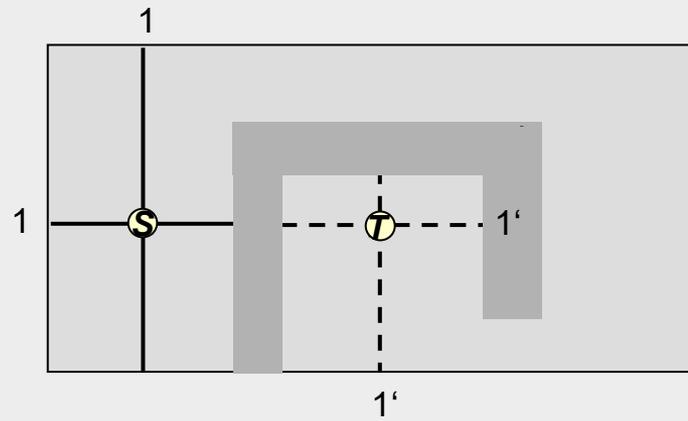
7.7.3 Linienverdrahtung: Mikami-Tabuchi-Algorithmus

- 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

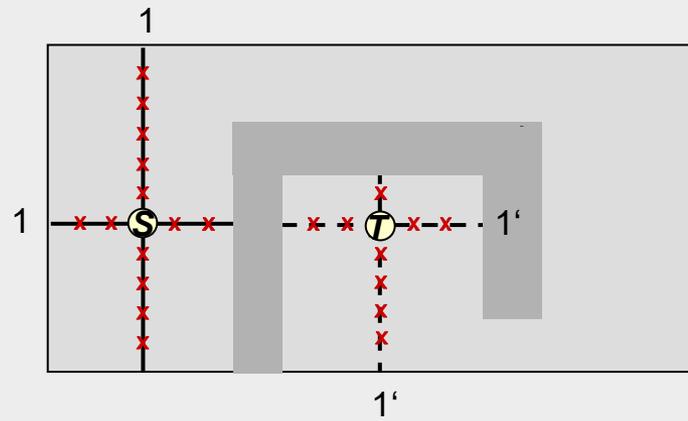
1. Erzeugen zweier Expansionslinien 1 bzw. $1'$, die an den beiden zu verbindenden Pins S bzw. T starten und bis zum nächsten Hindernis oder Chiprand gehen.
2. Falls Geraden j und j' oder j und $(j-1)'$ oder $(j-1)$ und j' sich schneiden, Rückverfolgung auf den Geraden j und j' , $(j-1)$ und $(j-1)'$, $(j-2)$ 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



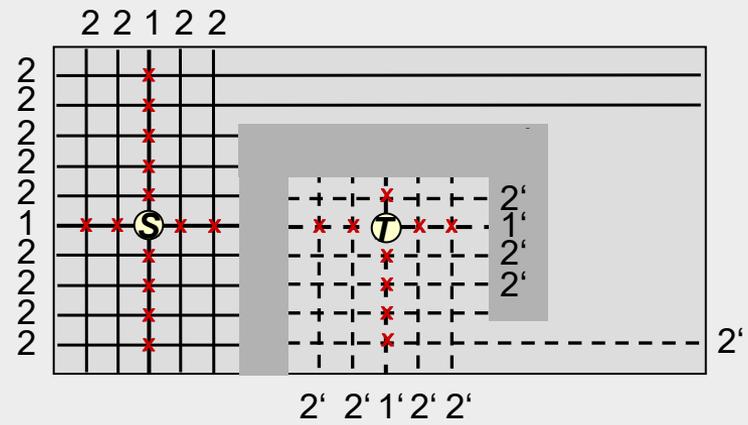
— Versuchslinien vom Startpunkt
- - - Versuchslinien vom Zielpunkt

1. Ausbreitung Versuchslinien Grad 1 und 2



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

1. Ausbreitung Versuchslinien Grad 1 und 2

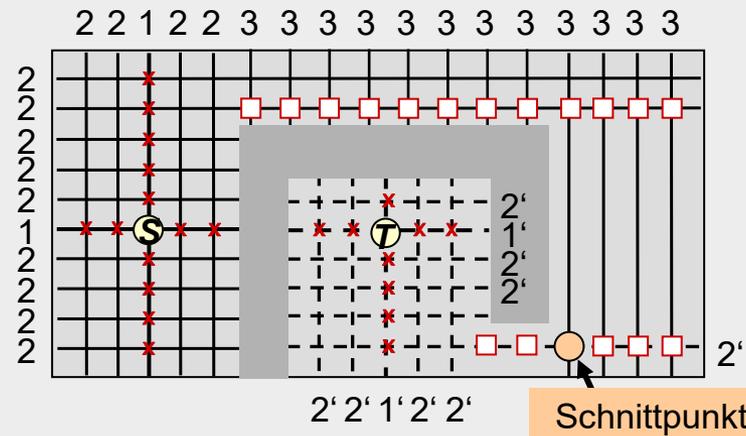
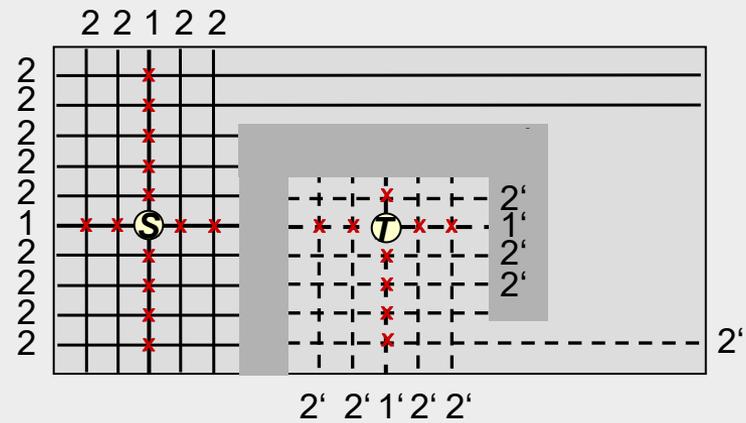


- Versuchslinien vom Startpunkt
- - - - Versuchslinien vom Zielpunkt
- x Ausgangspunkte, Grad 1

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

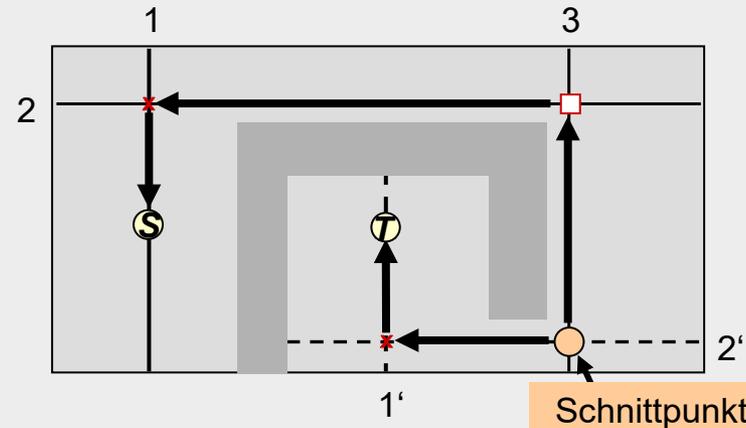
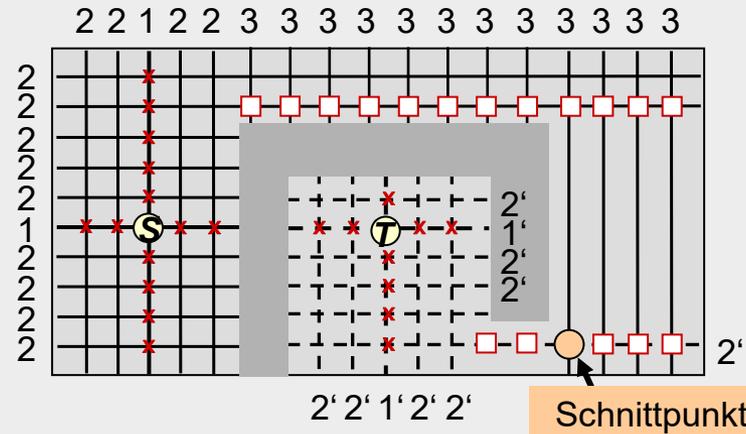
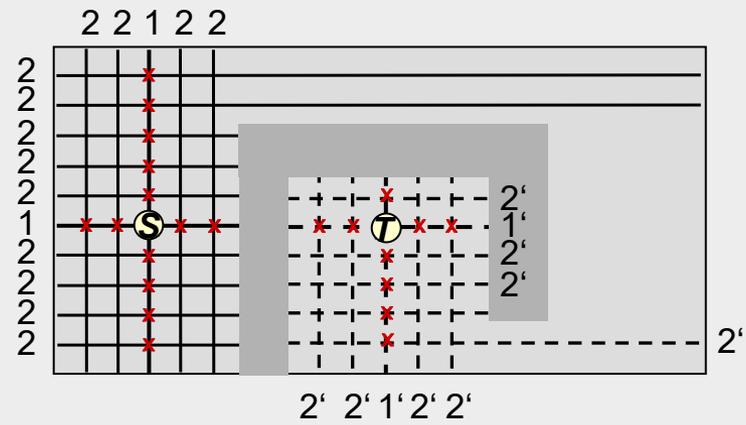


2. Ausbreitung Versuchslinien
Grad 3 mit Schnittpunkt



3. Rückverfolgung

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



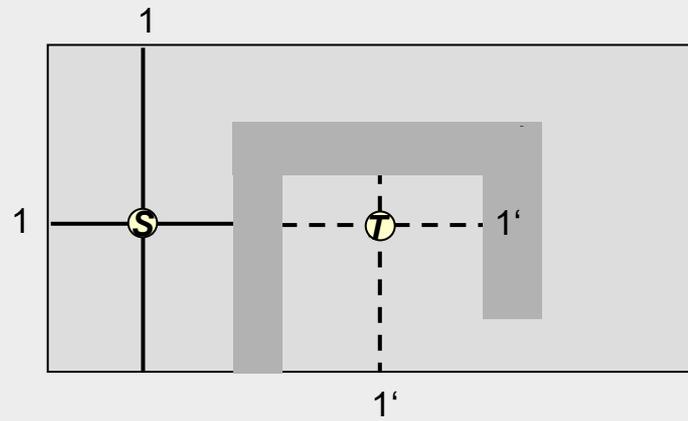
- 1969 veröffentlicht
- Unterschied zu Mikami-Tabuchi-Algorithmus: nur jeweils eine Gerade aussendend
- **Aktuelles Hindernis**: von diesem ausgehende vertikale oder horizontale Linie schneidet den aktuell betrachteten Ausbreitungspunkt
- **Fluchtpunkte**: mindestens eine der von diesen ausgehende Linien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

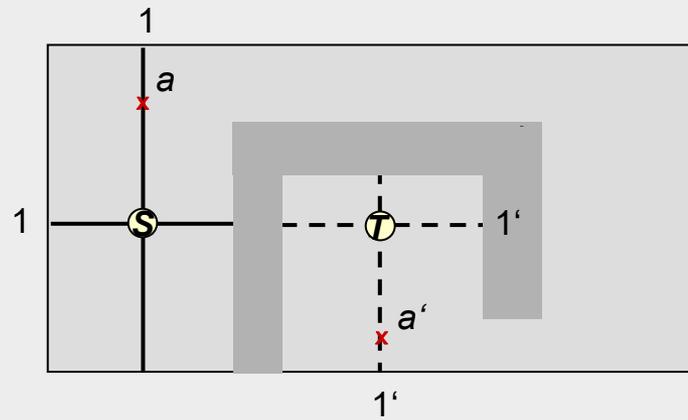
Weiter mit Schritt 2.

1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1



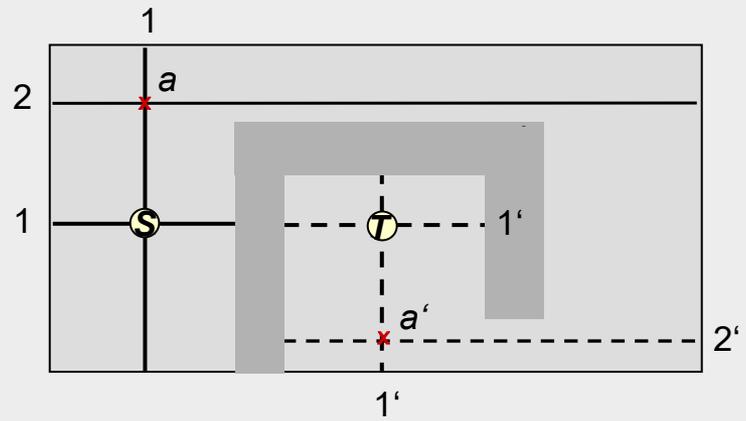
— Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - Fluchtlinien vom Zielpunkt

1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1 und 2



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

1. Ausbreitung Fluchtlinien Grad 1 und 2

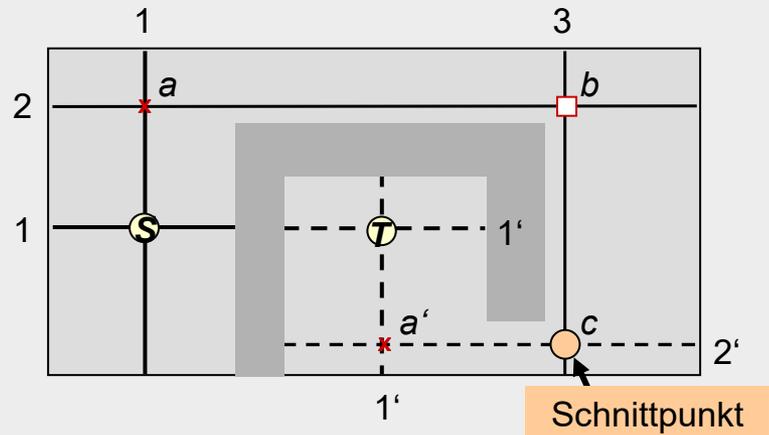
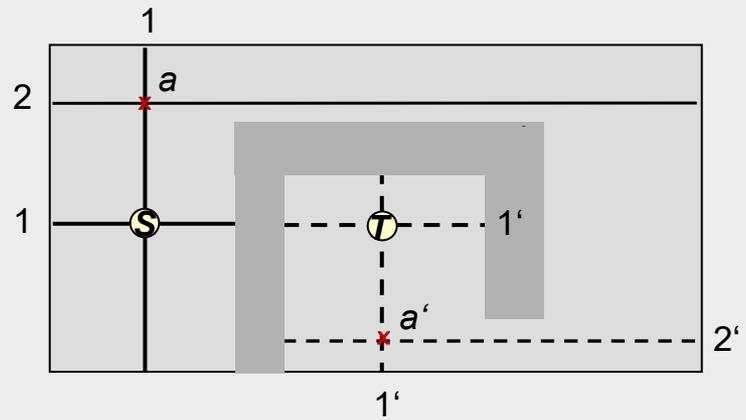


- Fluchtlinien vom Startpunkt
- - - - Fluchtlinien vom Zielpunkt
- x Fluchtpunkte, Grad 1

1. Ausbreitung Fluchtlinien
Grad 1 und 2



2. Ausbreitung Fluchtlinien
Grad 3 mit Schnittpunkt



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

1. Ausbreitung Fluchtlinien
Grad 1 und 2

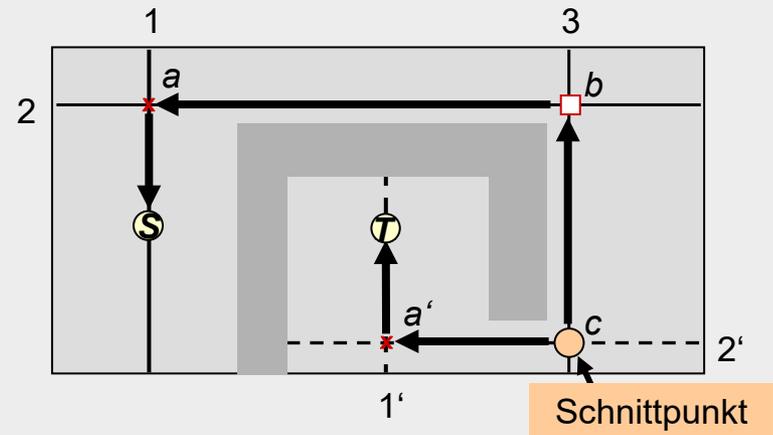
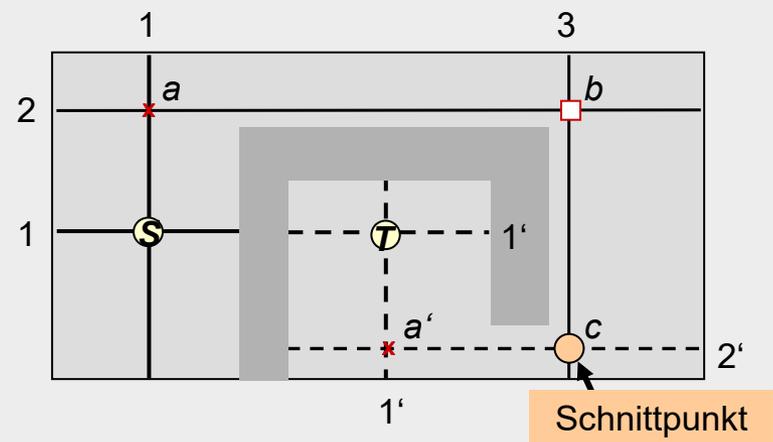
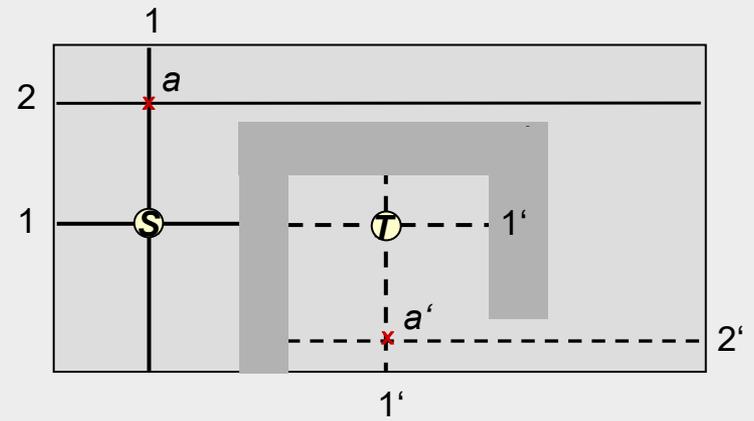


2. Ausbreitung Fluchtlinien
Grad 3 mit Schnittpunkt



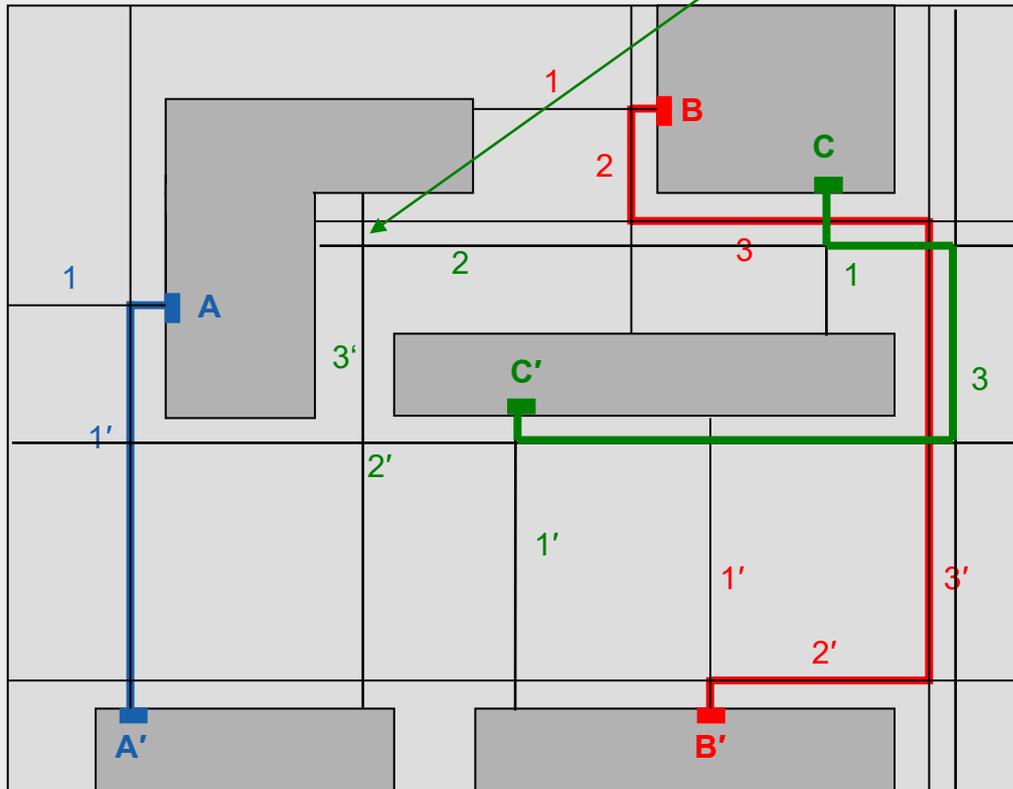
3. Rückverfolgung

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



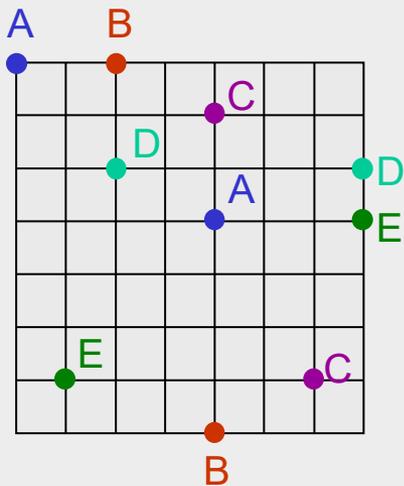
Alternative Illustration des Ablaufs

Schnittpunkt mit längerem Weg

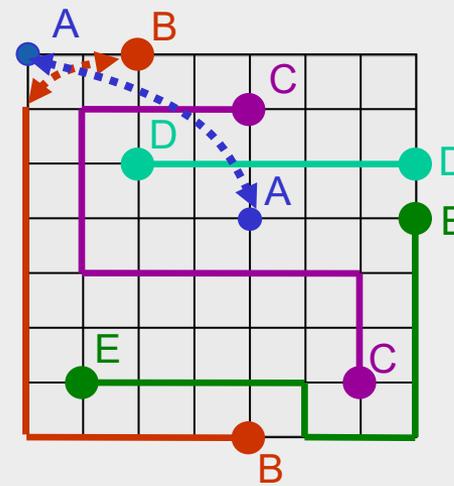


- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
 - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
 - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung
 - 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:

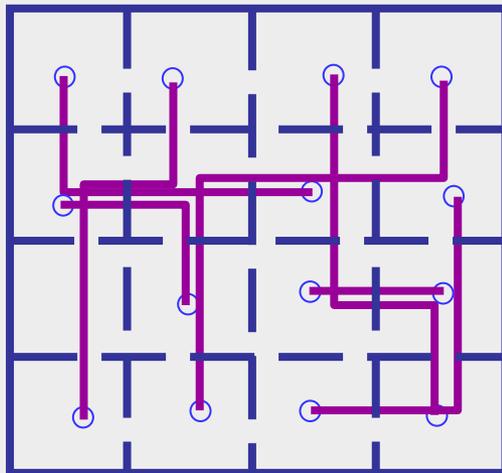


-> seriell in Manhattan-Geometrie
nicht verdrahtbar

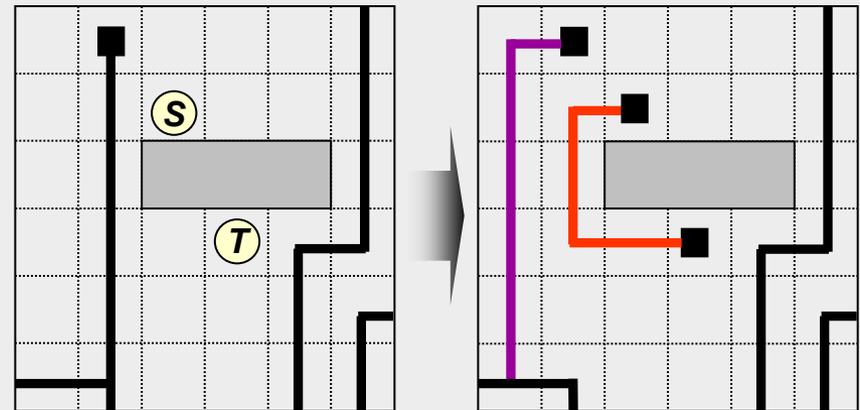
7.8 Quasiparallele Verdrahtung

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

Hierarchische Verdrahtung



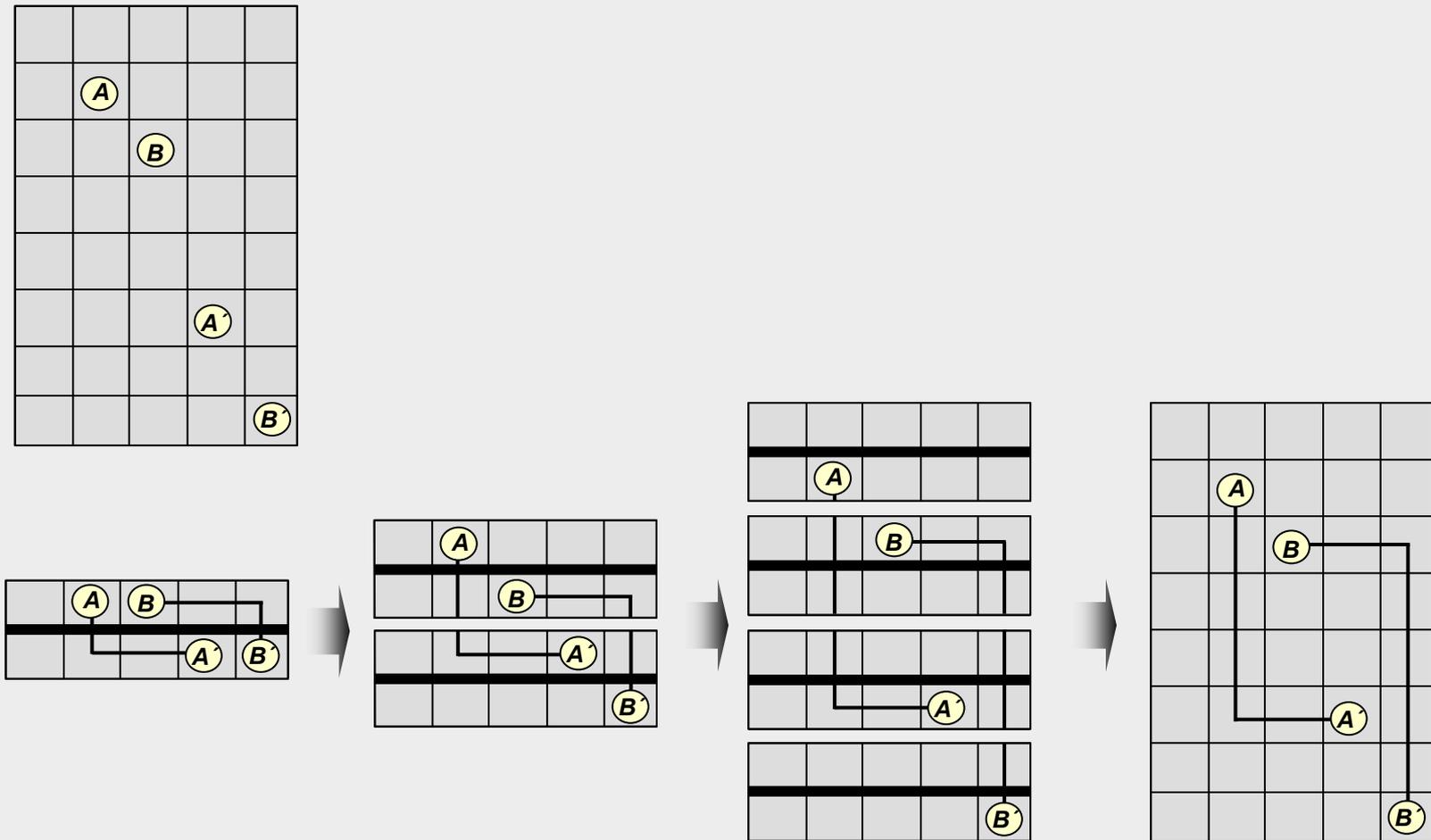
Rip-Up and Reroute



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



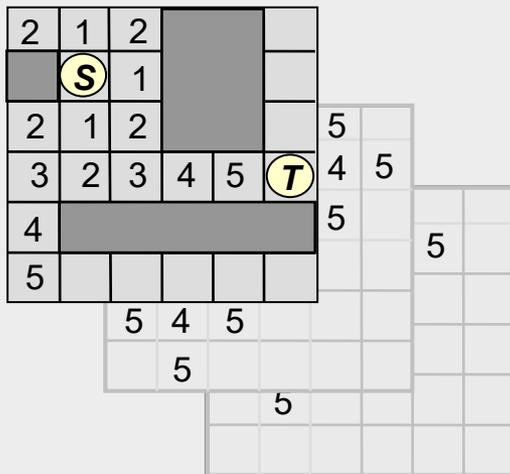
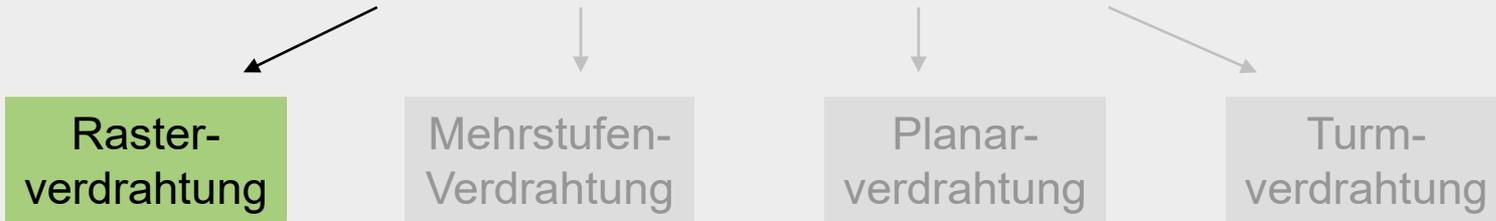
7.8.2 Rip-Up and Reroute

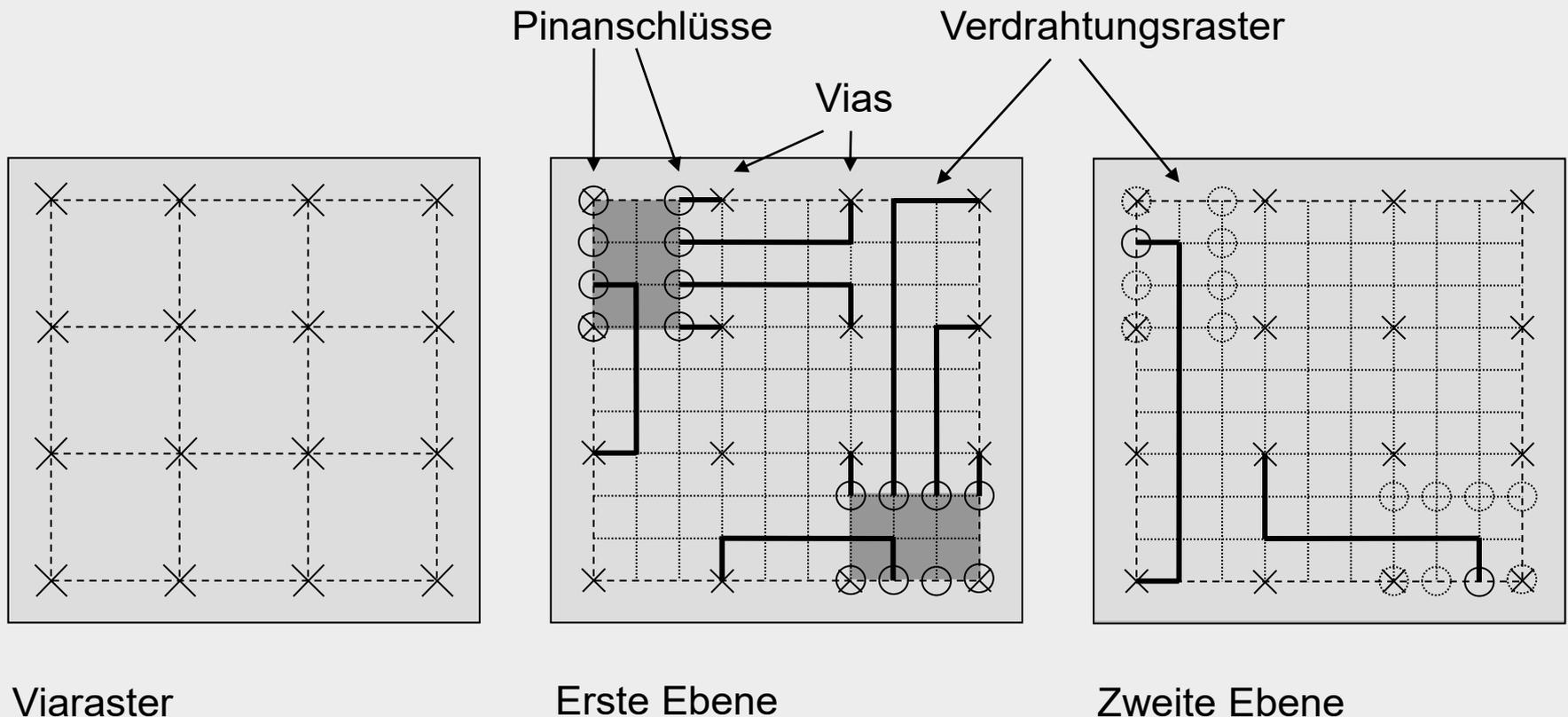
- Bei einer hohen Anzahl von bereits verdrahteten Netzen steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass diese die noch zu verlegenden Verbindungen blockieren.
- **Rip-up and reroute:** bereits verlegte werden Netze wieder aufgetrennt (Rip-up) und nach Verlegen des bisher blockierten Netzes neu verdrahtet (Reroute).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

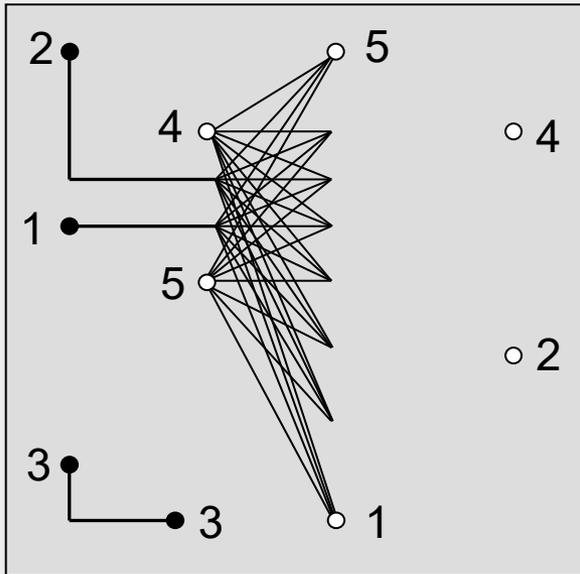
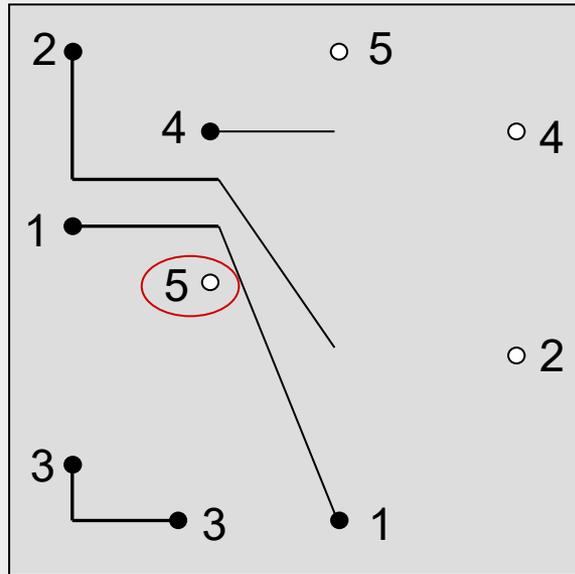
- 7.1 Einführung
- 7.2 Begriffsbestimmungen
- 7.3 Festlegung der Netzreihenfolge
- 7.4 Manhattan- und euklidische Metrik
- 7.5 Verdrahtung der Versorgungsnetze
- 7.6 Optimierungsziele
- 7.7 Sequentielle Verdrahtungsalgorithmen
 - 7.7.1 Rasterverdrahtung nach *Lee*
 - 7.7.2 Rasterverdrahtung mit Wegwichtung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



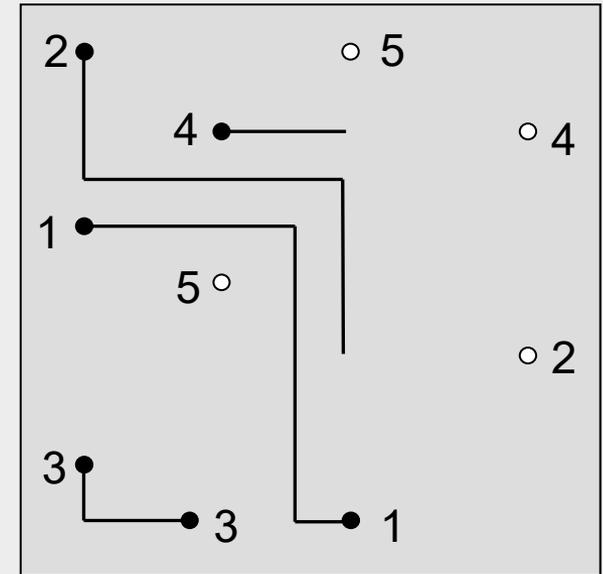
7.9 Dreidimensionale Verdrahtung



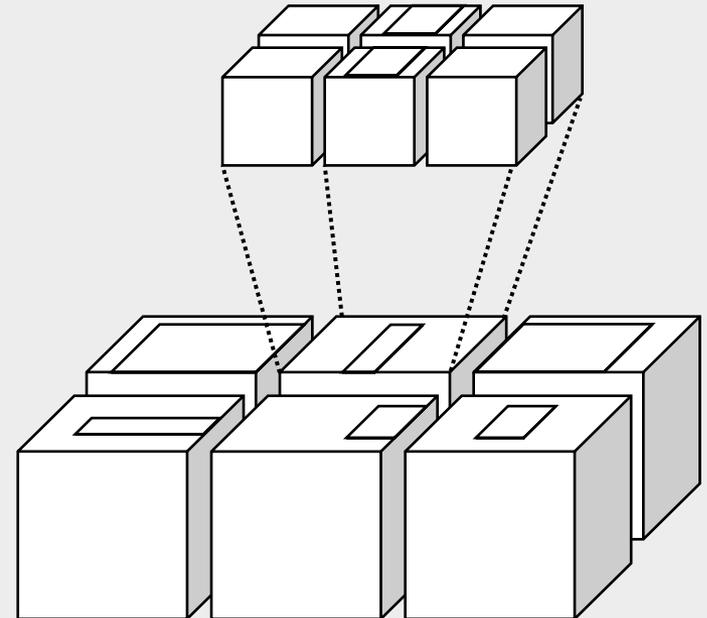
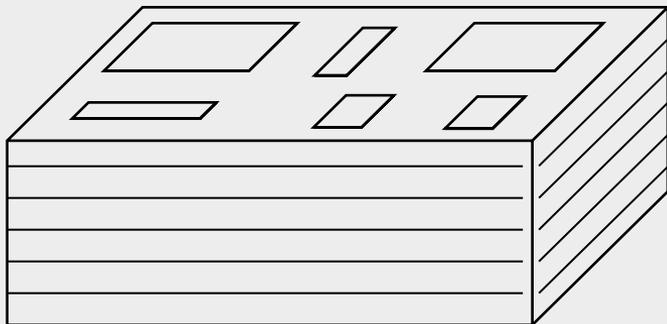
Raster-
verdrahtungMehrstufen-
VerdrahtungPlanar-
verdrahtungTurm-
verdrahtung

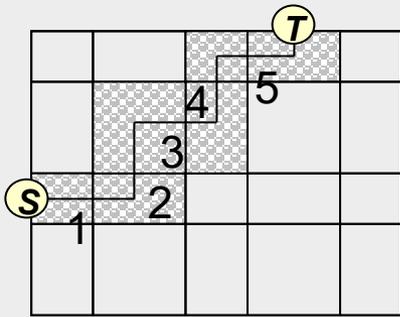
Raster-
verdrahtungMehrstufen-
VerdrahtungPlanar-
verdrahtungTurm-
verdrahtunga) Mögliche Verbindungs-
punkte

b) Auswahl

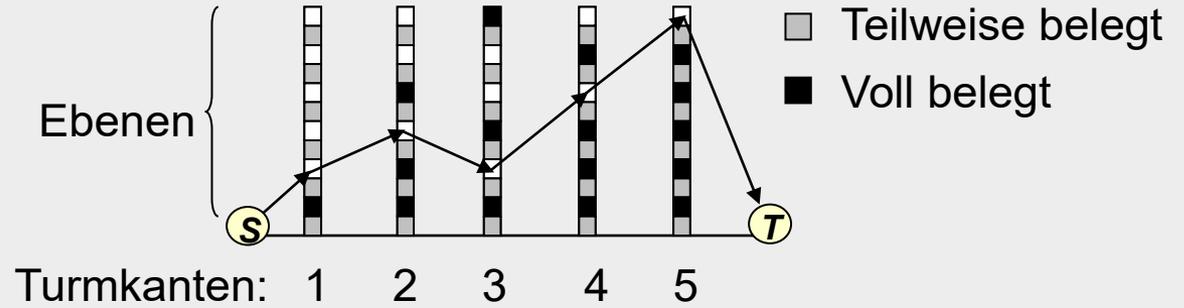


c) Rektilinearer Anschluss

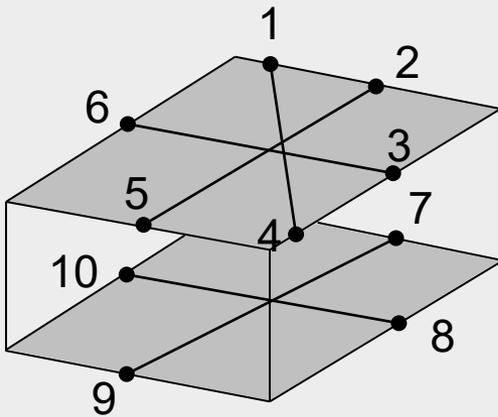
Raster-
verdrahtungMehrstu-
fen-
VerdrahtungPlanar-
verdrahtungTurm-
verdrahtung



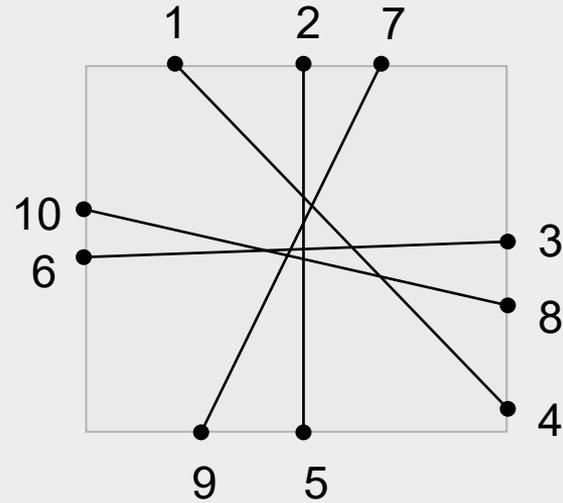
a) Turmzuordnung



b) Ebenenzuordnung



c) Feinverdrahtung



- 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**

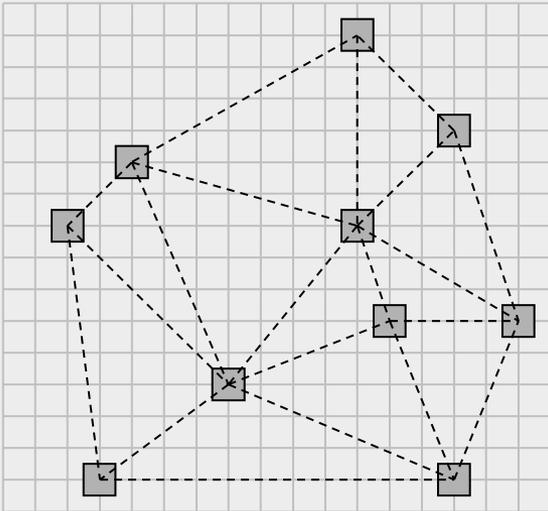
- Nicht-orthogonaler Verdrahtungsstil auch bei digitalen Schaltungen
- Terminologie beruht auf der sog. λ -Geometrie. Der Wert λ repräsentiert hierbei die Anzahl möglicher Verdrahtungsrichtungen in der Ebene in aufeinander folgenden Winkeln von π/λ :
 - $\lambda = 2$ (90 Grad): **Manhattan-Verdrahtung** (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.

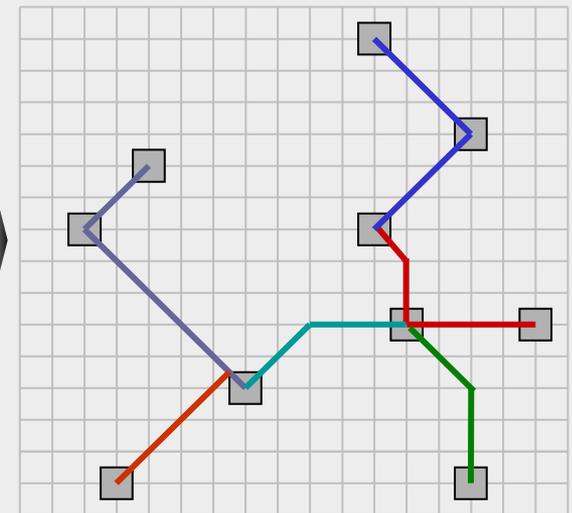
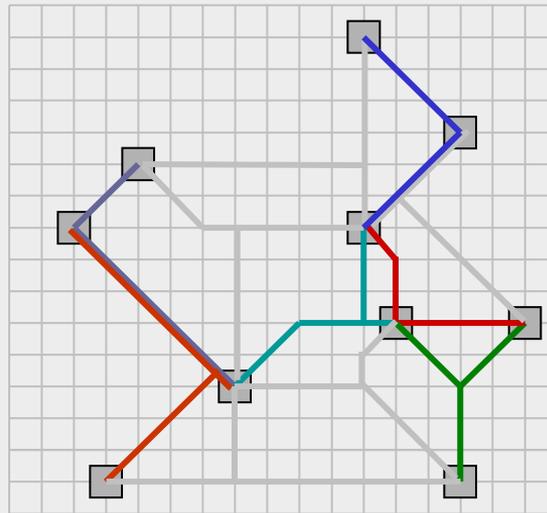
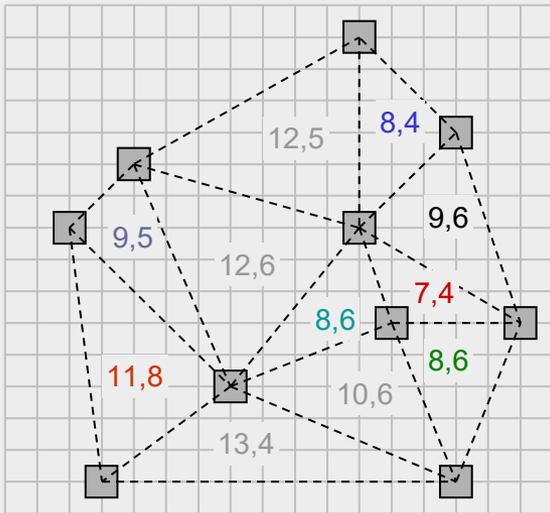
* Mit dem Verfahren der **Delaunay-Triangulation** werden Punkte so zu Dreiecken vernetzt, dass innerhalb des Kreises, auf dem die drei Dreieckspunkte liegen, keine anderen Punkte enthalten sind.

(1) Triangulation



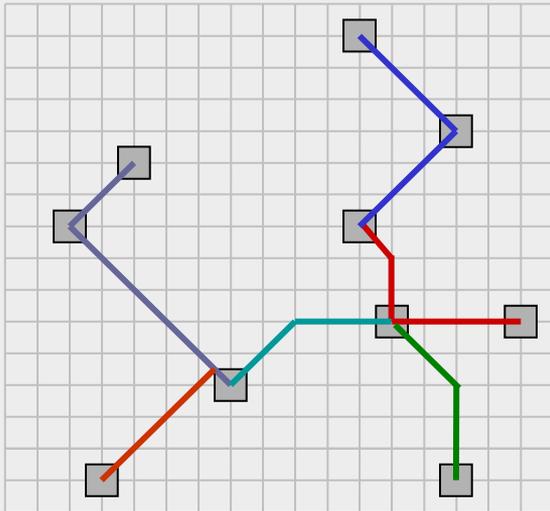
7.10.1 Oktilineare Steinerbäume: Beispiel

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

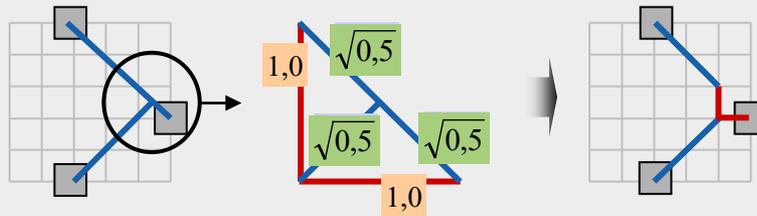
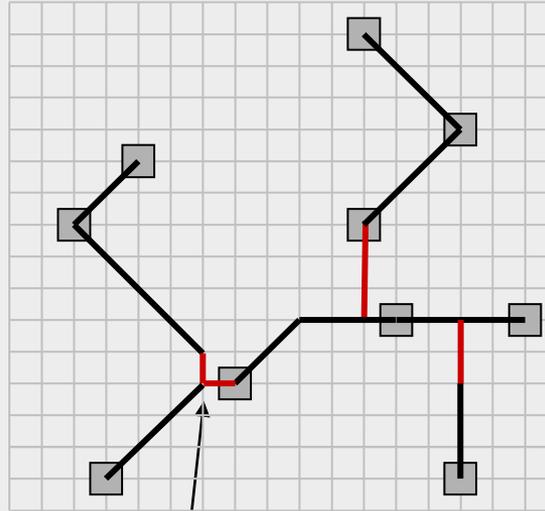


7.10.1 Oktilineare Steinerbäume: Beispiel

(4 b) Einfügen der Subgraphen

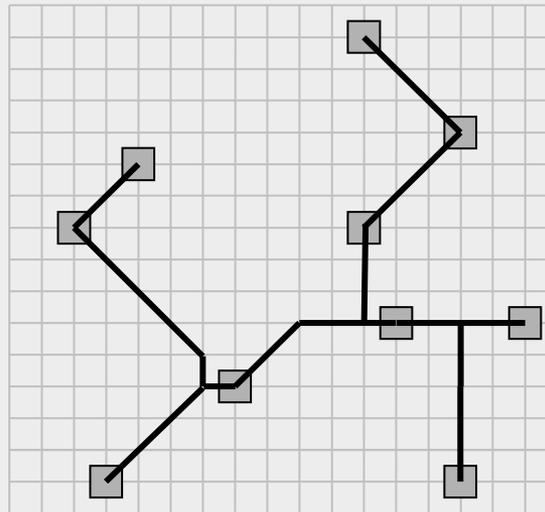


(4 c) Optimieren des oktilinearen Steinerbaums

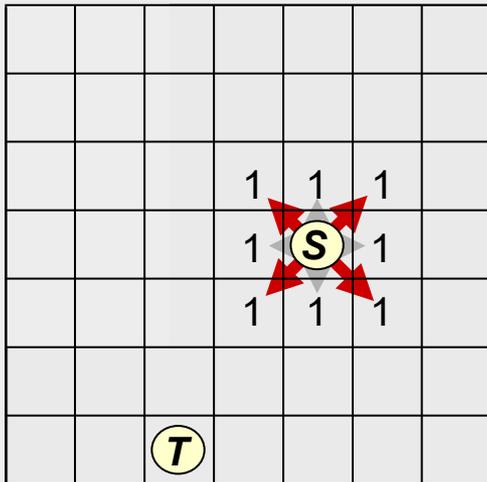


$$(1+1) < (\sqrt{0,5} + \sqrt{0,5} + \sqrt{0,5})$$

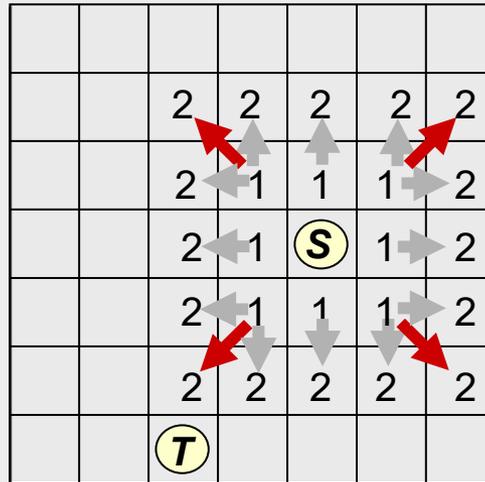
Oktilinearer Steinerbaum



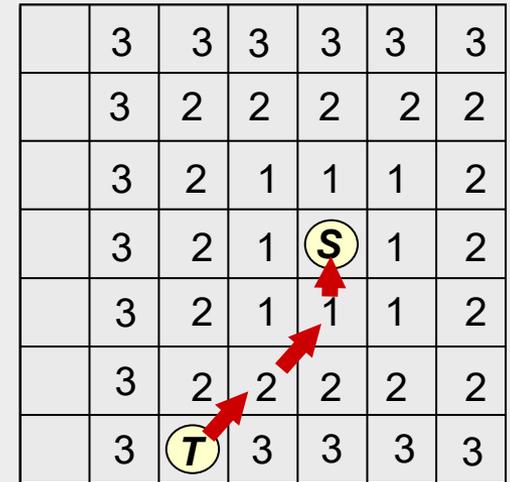
7.10.2 Oktilineare Wegsuche



Ausbreitung (1)

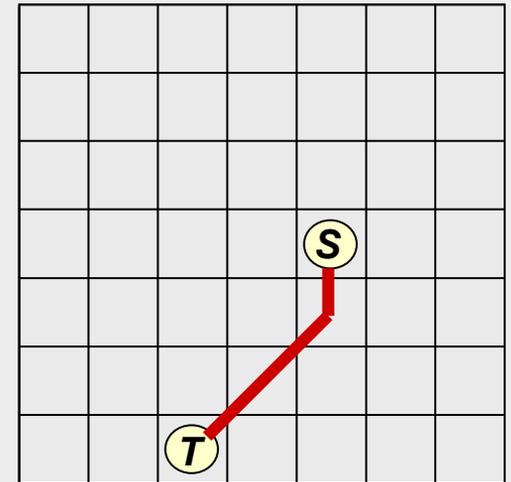


Ausbreitung (2)



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