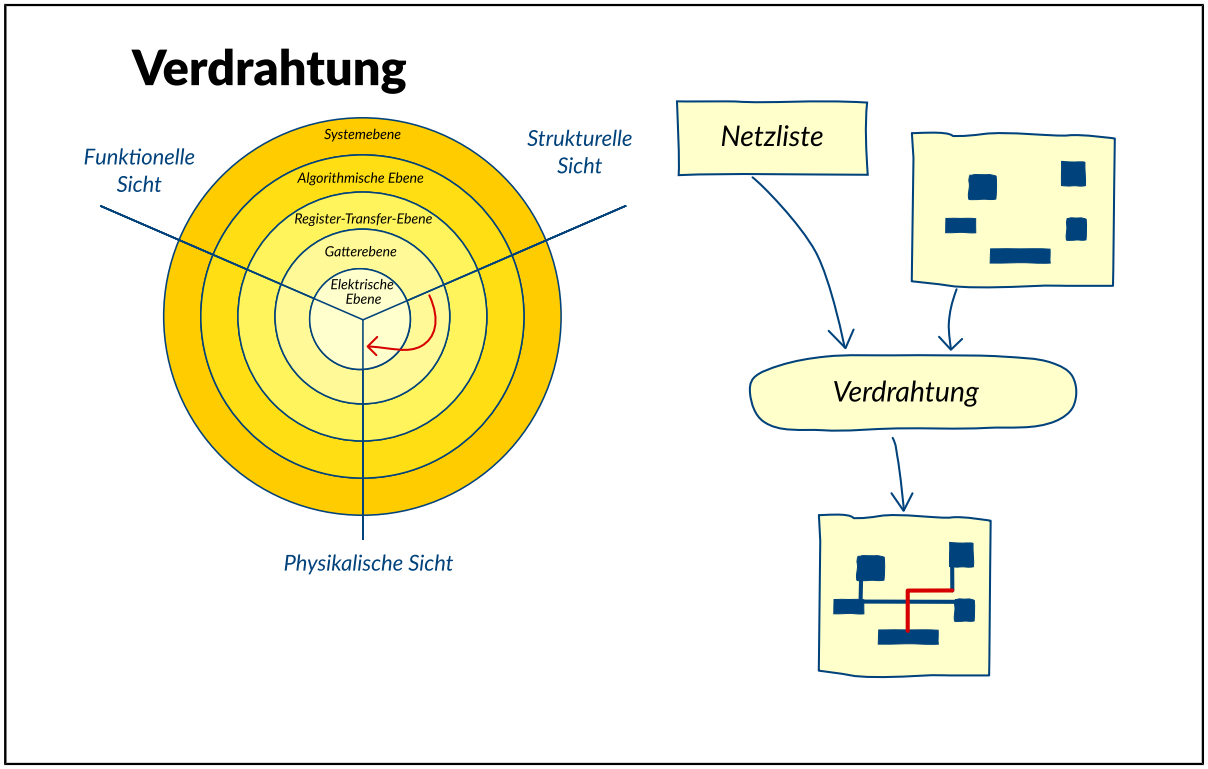
Electronic Design Automation (EDA)

Verdrahtung

Verdrahtung
Randbedingungen
Verwandte Probleme
Verdrahtungsverfahren
Verdrahtungsreihenfolge
Globalverdrahter
Modellierung
Regionszuweisung
Detailverdrahtung
Kanalverdrahter: Kanalmodell
Left-Edge-Algorithmus
Beispiel Left-Edge-Algorihmus
Switchboxverdrahtung: Beispiel
Wellenfrontverdrahter
Ausbreitung einer Welle
Verbesserung des Speicher-/Laufzeitbedarfs
Bewertung: Wellenfrontverfahren
Liniensuchverfahren
Hightower- und Mikami-Verfahren
Bewertung: Liniensuchverfahren
Linienexpansionsverfahren
Bewertung: Linienexpansionsverfahren

Date of generation: 26.10.2026

Verdrahtung: Verdrahtung



Nach der Platzierung erfolgt die Verdrahtung. Für die Verdrahtung ist es wichtig zu wissen, an welchen Stellen die genauen Orte der zu verbindenden Terminals liegen. Sie liegen nach der Platzierungsphase fest und sind nicht mehr verschiebbar.

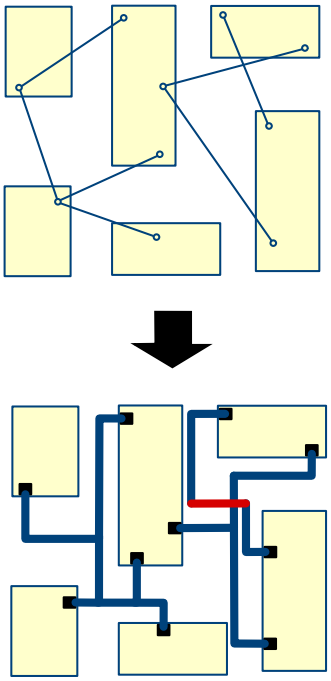
Ziel der Verdrahtung ist ein vollständiges Layout, das neben den in der Platzierungsphase festgelegten Positionen der Zellen die Geometrie aller elektrischen Verbindungen enthält. Auf der Basis dieses Layouts werden später die Masken für die Chipherstellung erstellt.

Verdrahtung: Randbedingungen

Randbedingungen

Die Verdrahtung erzeugt aus der platzierten Zellen und der Verbindungsinformationen der Netzliste ein vollständiges Layout, indem alle entsprechenden Anschlüsse gemäß den Randbedingungen miteinander verbunden werden.

- **Randbedingungen**
  - Einhaltung aller Entwurfsregeln
    - Leitungsbreiten und -abstände
    - Kontaktüberlappungen
    - Kontaktabstände
- **Ziele**
  - Minimierung der Verdrahtungslängen
  - Minimierung der Delays kritischer Netze
  - Minimierung der Verdrahtungsfläche
  - Minimierung von Durchkontaktierungen
  - Minimierung von Leitungsknicken



Das Verdrahtungsprogramm hat durch die Technologie vorgegebene Regeln, so genannte Entwurfsregeln, zu beachten. Diese Entwurfsregeln (Design Rules) definieren u.a., minimale Leitungsbreiten, minimale Abstände von Leitungen, Knicken, Vias, usw. Die Funktion der Schaltung ist nur gewährleistet, wenn die Entwurfsregeln eingehalten werden.

Die Länge aller Leitungen (Gesamtverdrahtungslänge) ist das Hauptmaß für die Bewertung der Verdrahtung. Je größer die Verdrahtungslängen sind, desto größer sind parasitäre Effekte wie Leitungslaufzeiten und desto größer ist der Platzbedarf für die Verdrahtung. Außerdem wird der Einfluss der Leitungslängen auf das Delay, das die maximale Taktfrequenz der Schaltung bestimmt, immer bedeutender.

Um den Einfluss auf das Leitungsdelay modellieren zu können, gibt es verschiedene Leitungsmodelle (C, RC, mehrfach RC, RCL, Leitung), die entsprechend der gewünschten Genauigkeit des Ergebnisses und des zulässigen Berechnungsaufwands unterschieden werden.

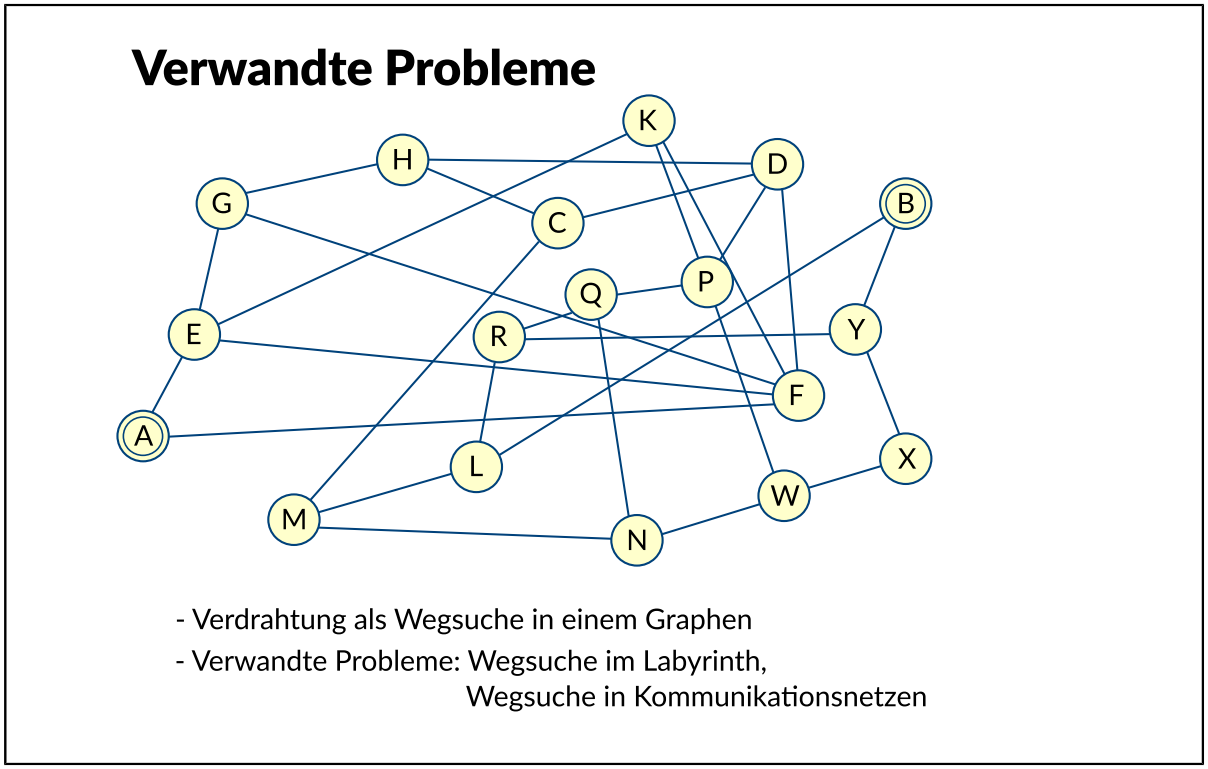
Das einfachste aber ungenaueste Leitungsmodell ist eine Kapazität zwischen der Leitung und dem Substrat (Massepotential), welche multipliziert mit dem Ausgangswiderstand des Treibers (Zeitkonstante) das Delay für eine Leitung repräsentiert.

Eine Verbesserung bringt ein RC-Modell, welches auch die Leitung mit einem Widerstand versieht. Dieses Modell ist genauer als das C-Modell und wird oft in Abschätzungen der Kosten für eine Verdrahtung verwendet.

Zusätzlich zur Substratkapazität werden bei modernen Verdrahtern auch noch Kopplungskapazitäten zu anderen Leitungen betrachtet, da auch diese einen erheblichen Einfluss auf das Delay haben können.

Die Abschätzung der Leitungseigenschaften bei der Verdrahtung muss sehr einfach sein, da aufwendige Verfahren sie stark verlangsamen würden. Genauere Verfahren und Leitungsmodelle werden in der Extraktion eingesetzt und im Kapitel "Extraktion" beschrieben.

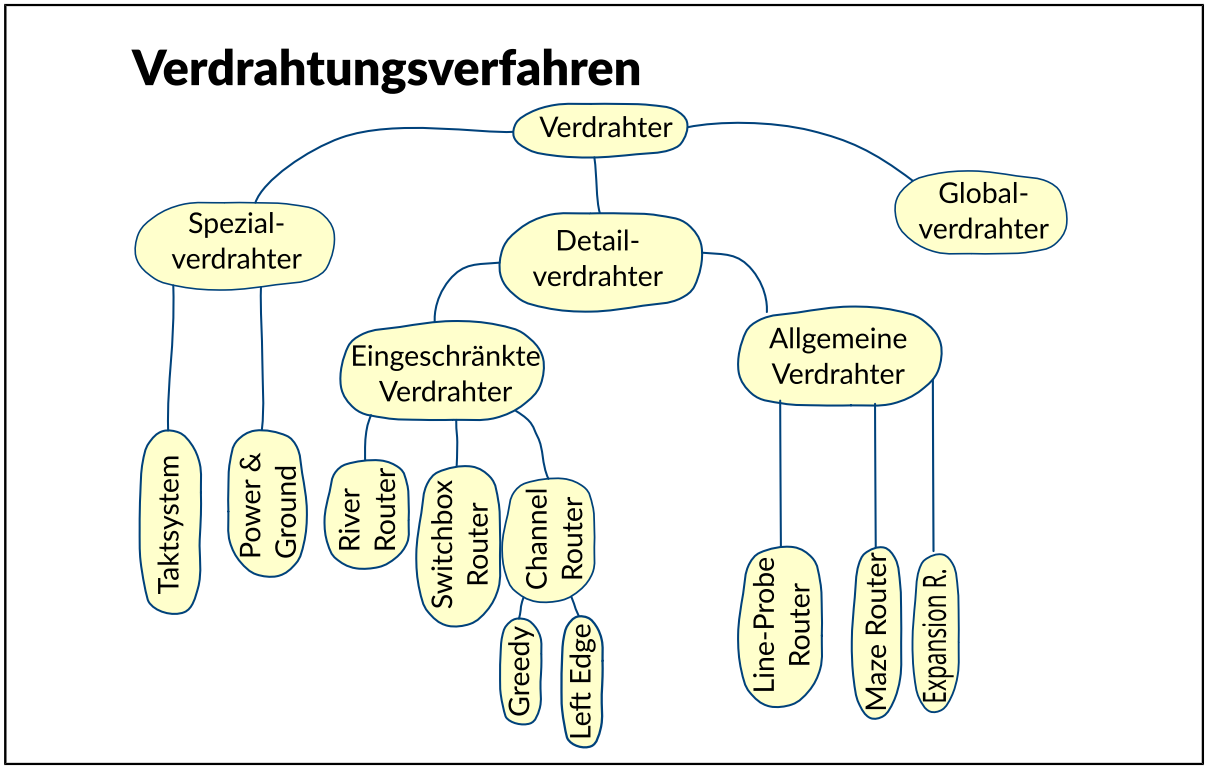
Verdrahtung: Verwandte Probleme



Der Ursprung der Wegesuche auf dem Computer geht auf das Problem zurück, einen Weg durch einen Graphen zu finden. Dieser gewichtete oder ungewichtete Graph kann z.B. ein Labyrinth oder Kommunikationsnetz darstellen.

In einer Veröffentlichung von Moore von 1959 wurde zum ersten Mal wissenschaftlich untersucht, wie algorithmisch ein Weg durch einen Graphen mit einem Rechner gefunden werden kann.

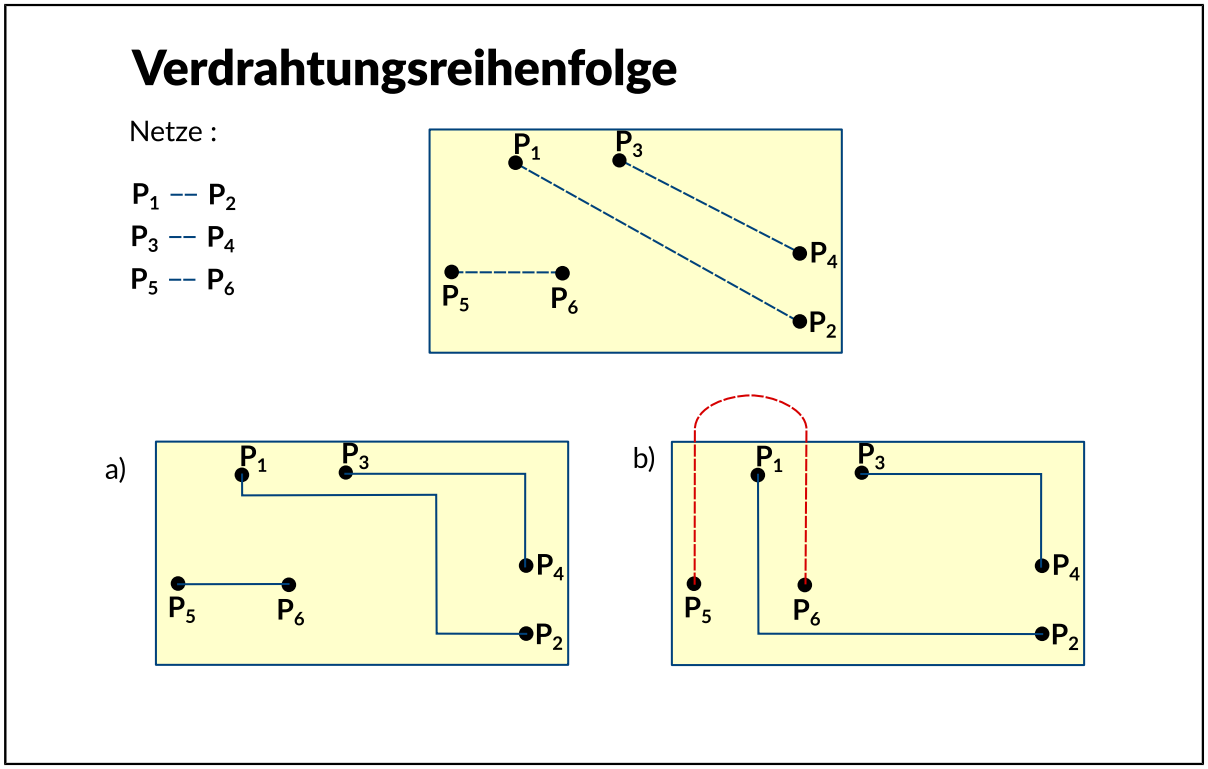
Verdrahtung: Verdrahtungsverfahren



Eine Einteilung der Verdrahtungsverfahren kann auf verschiedene Weise geschehen. Häufig werden die Verfahren in Global-, Detail- und Spezialverdrahter eingeteilt. Hier soll hauptsächlich auf die Detailverdrahter eingegangen werden.

Die detaillierten Verdrahter werden wiederum unterteilt in allgemeine Verdrahter und eingeschränkte Verdrahter. Die allgemeinen Verdrahter können beliebige Verbindungen erstellen, während die eingeschränkten Verdrahter nur spezielle Anordnungen behandeln, z.B. so genannte Kanäle oder Switchboxen. Hierauf wird in den Kapiteln Global- und Detailverdrahter eingegangen.

Verdrahtung: Verdrahtungsreihenfolge

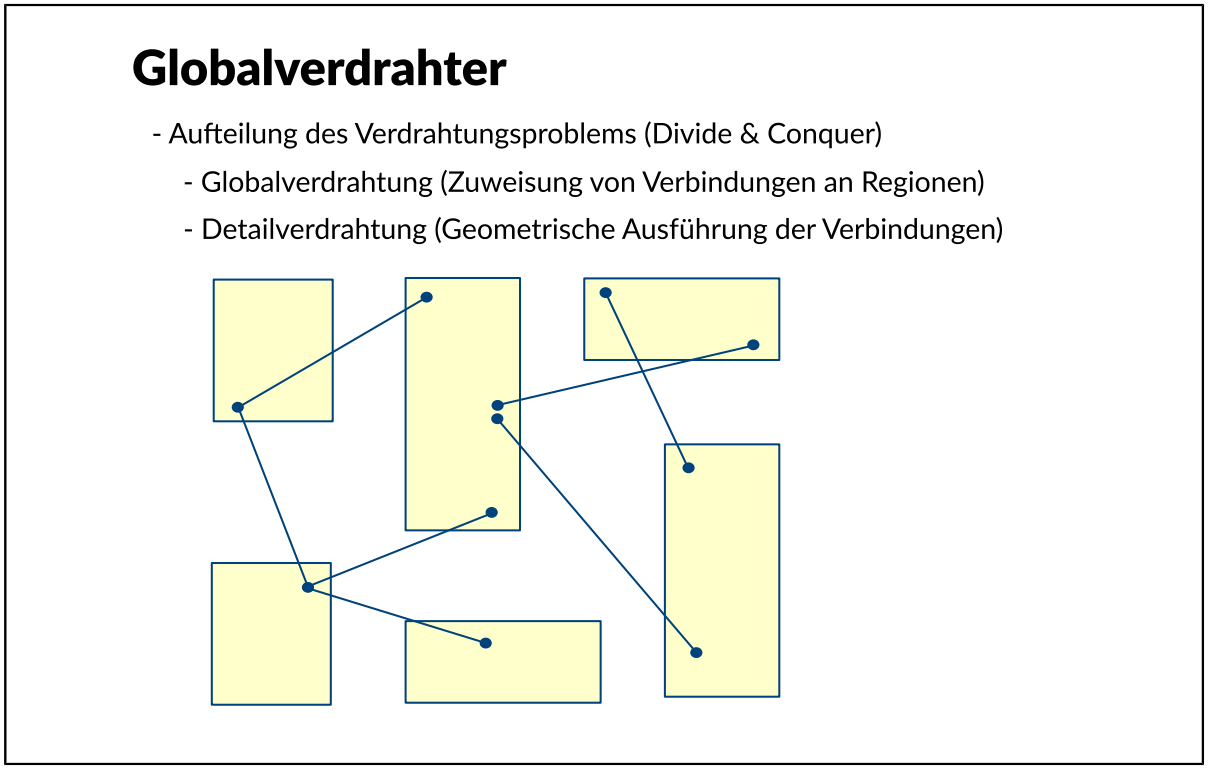


Die Verdrahtungsreihenfolge hat einen großen Einfluss auf die Verdrahtbarkeit einer Schaltung.

Mit einer schlecht gewählten Reihenfolge der zu verdrahtenden Netze kann eine Schaltung nicht mehr verdrahtbar sein. Aus diesem Grund gibt es Ordnungsstrategien für die Reihenfolge der Netze. So werden die Netze häufig nach ihren Funktionen sortiert, z.B. werden erst die Power- und Ground-Netze, dann die Clock-Netze und anschließend der Rest verdrahtet. Der Rest wiederum kann auch sortiert werden, z.B. nach der Länge der Leitungen.

Es ist jedoch nicht möglich, eine allgemeine Ordnungsstrategie zu formulieren, die die Verdrahtbarkeit und eine minimale Verdrahtungslänge sichern kann.

Verdrahtung: Globalverdrahter



Um das Verdrahtungsproblem zu vereinfachen, wird es in Global- und Detailverdrahtung aufgeteilt. Die Globalverdrahtung ist der erste Schritt bei der Verdrahtung. Sie wird für die grobe Steuerung der späteren detaillierten Verdrahtung genutzt.

Die Globalverdrahtung selbst kann in zwei Abschnitte unterteilt werden:

- Modellierung
- Regionszuweisung

Begonnen wird mit der Modellierung der Fläche für die Globalverdrahtung. Die gesamte freie Fläche wird in kleine Bereiche, so genannte Regionen, geteilt und in einem Graphen abgebildet.

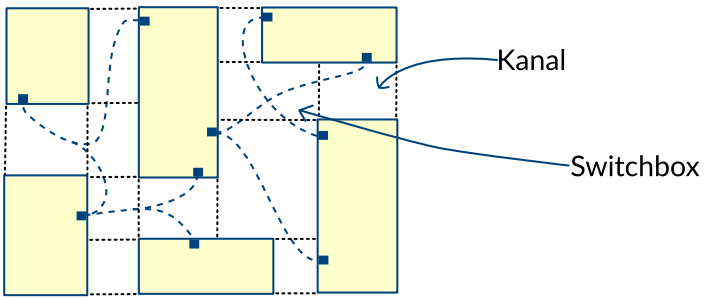
Im zweiten Schritt werden jedem Netz Regionen zugewiesen. Ausschließlich in diesen Regionen wird das Netz vom Detailverdrahter verdrahtet. Gleichzeitig mit der Zuweisung wird die Congestion (Anhäufung) der Regionen überprüft.

Das Problem der Globalverdrahtung ist mit dem Problem der Verbindungssuche in Kommunikationsnetzen verwandt.

Verdrahtung: Modellierung

Modellierung

- Aufteilung der gegebenen Verdrahtungsfläche in Teilflächen, die den Restriktionen des verwendeten Verdrahtungsalgorithmus genügen.
- Zuweisung von Verdrahtungsflächen zu jedem zu verdrahtenden Netz.
- Eine solche Teilmenge beinhaltet die Information über die grobe Netztopologie, nicht jedoch über den genauen Verlauf.

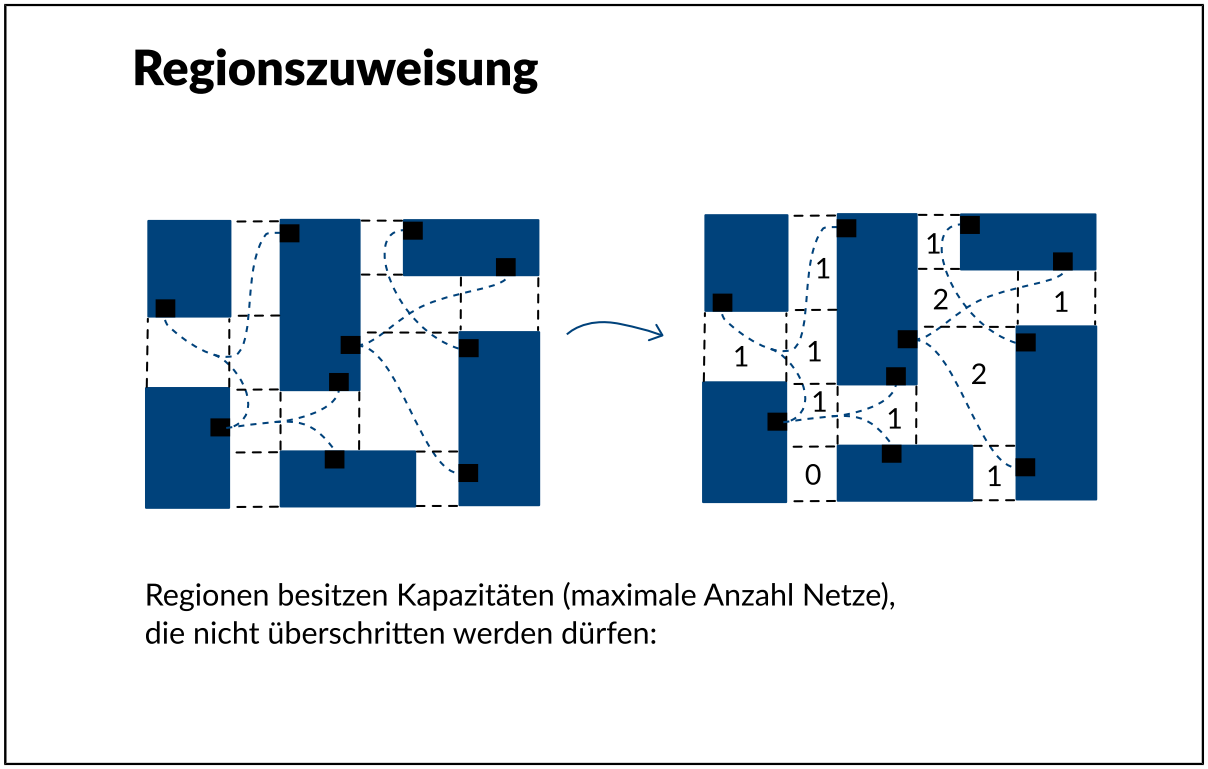


Vor Beginn der Globalverdrahtung sind die Positionen der Terminals bekannt, die verbunden werden sollen. Des weiteren ist für die Verdrahtung zwischen den Zellen Freiraum reserviert. Damit in dem anschließenden Detailverdrahtungsschritt die spezialisierten Verdrahter die Verdrahtung durchführen können, müssen die Freiflächen in kleine Rechtecke aufgeteilt werden, die später bei der Detailverdrahtung einzeln bearbeitet werden. Durch die Zerlegung entstehen Rechtecke zwischen jeweils zwei Zellen, die so genannten Kanäle. Dort liegen die Anschlussterminals der Zellen immer nur an gegenüberliegenden Seiten. Die Kanäle werden später von einem Kanalverdrahter bearbeitet.

Die Rechtecke, die mehrere Känale miteinander verbinden, werden als Switchboxen bezeichnet. Switchboxen können maximal vier Kanäle miteinander verbinden.

Der Vorteil einer Aufteilung in Kanäle und Switchboxen ist, dass die Kanäle in beliebiger Reihenfolge ohne späteres "rip-up-and-reroute" (Aufreißen und Wiederverdrahten) abgearbeitet werden können, um anschleißend die Switchboxen zu verdrahten. Würden keine Switchboxen sondern ausschließlich Kanäle verwendet, müssten diese Kanäle aufgrund ihrer Abhängigkeiten in bestimmten Reihenfolgen abgearbeitet werden, da sonst Widersprüche auftreten können. Diese Reihenfolge ist nur bei "Slicing Floorplans" einfach zu bestimmen und wird umgekehrt zur Schnittreihenfolge im Floorplan festgelegt.

Verdrahtung: Regionszuweisung



Die Verfahren, die bei der Regionszuweisung benutzt werden, unterscheiden sich nicht grundlegend von denen der Detailverdrahtung, sie werden nur in einer höheren Abstraktion verwendet. Somit wird während der Globalverdrahtung nur der grobe Verlauf der Verdrahtung bestimmt und dieser nicht bis ins Detail festgelegt.

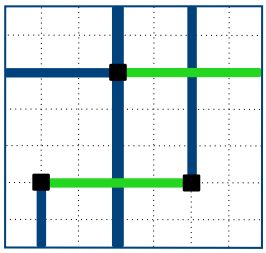
Bei der Regionszuweisung werden die Leitungen den Kanälen und Switchboxen zugeordnet. Ist die Kapazität eines Kanals erschöpft, kann keine weitere Leitung in diesen Kanal gelegt werden. Somit muss die Verdrahtung über einen anderen Weg durchgeführt werden.

Im Bild ist eine beispielhafte Zerlegung und Regionszuweisung dargestellt. Dabei wurde jeder Region eine Zahl zugewiesen, die die Zahl der im dieser Region zu verdrahtenden Netze angibt.

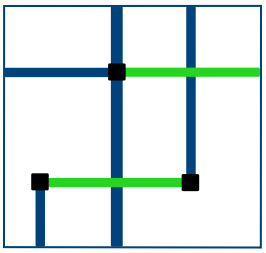
Verdrahtung: Detailverdrahtung

Detailverdrahtung

- Geometrische Ausführung der Verbindungen
- Problem ist Wegesuche
- Hier behandelt:
  - Kanalverdrahter
  - rasterfreie und rasterbasierte Punkt-zu-Punkt-Verdrahter



rasterbasiert



rasterfrei

Im Rahmen der Detailverdrahtung wird die geometrische Ausführung der Verbindungen festgelegt. Das zu lösende Problem ist das der Wegesuche, wie es in ähnlicher Form bei der Suche eines Weges im Labyrinth auftritt. Von der Vielzahl der möglichen Vorgehensweisen werden hier nur die Grundformen behandelt, die Kanalverdrahtung sowie die Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung, die den allgemeinen Fall darstellt.

Bei der Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung wird häufig zwischen rasterfreien und rasterbasierten Verfahren unterschieden.

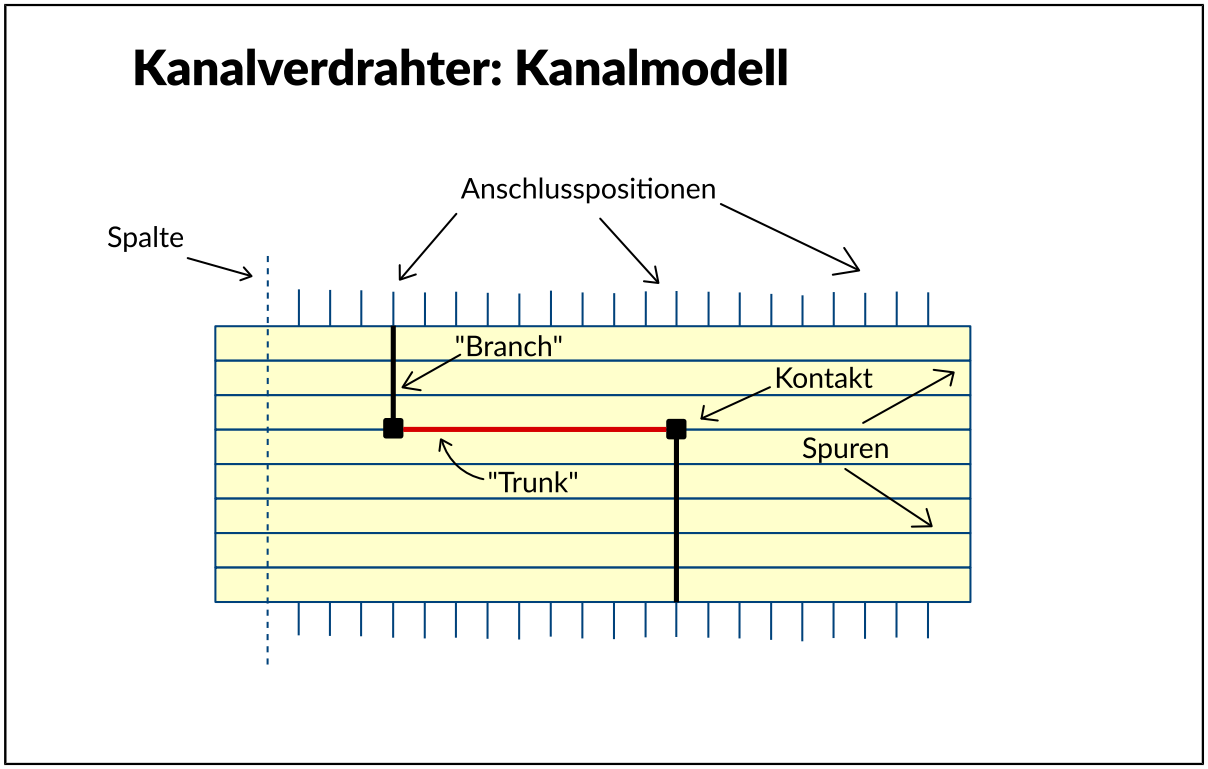
Bei den rasterbasierten Verfahren, wird ein Raster über die gesamte Layoutfläche gelegt. Die Rastergröße wird so gewählt, dass die von den Entwurfsregeln vorgegebenen Abstände eingehalten werden.

Die Rastergröße ergibt sich aus dem Abstand und der Breite der Leitungen. Bei einem Mehrlagenprozess werden die minimalen Abstände des ungünstigsten Layers gewählt, da die Raster für Durchkontaktierungen auf allen Ebenen gleich sein müssen.

Durch die Rasterung ergeben sich Einschränkungen. Der Abstand und die Breite der Leitungen werden immer vom ungünstigsten Layer bestimmt, somit wird Fläche in den anderen Layern nicht vollständig genutzt. Die Rasterung der Layoutfläche ist zudem nur für eine Leitungsbreite optimal. Wird mit einer anderen Leitungsbreite verdrahtet, müsste die Layoutfläche erneut gerastert werden.

Rasterfreie Modelle haben diese Einschränkungen nicht. Sie können die gesamte Layoutfläche nutzen und sind nicht an Wege gebunden, die durch ein Raster vorbestimmt werden.

Verdrahtung: Kanalverdrahter: Kanalmodell



Ein Kanal ist ein Rechteck, das an zwei gegenüberliegende Seiten Terminals aufweist. Diese Terminals gehören zu Netzen, die zu verdrahten sind.

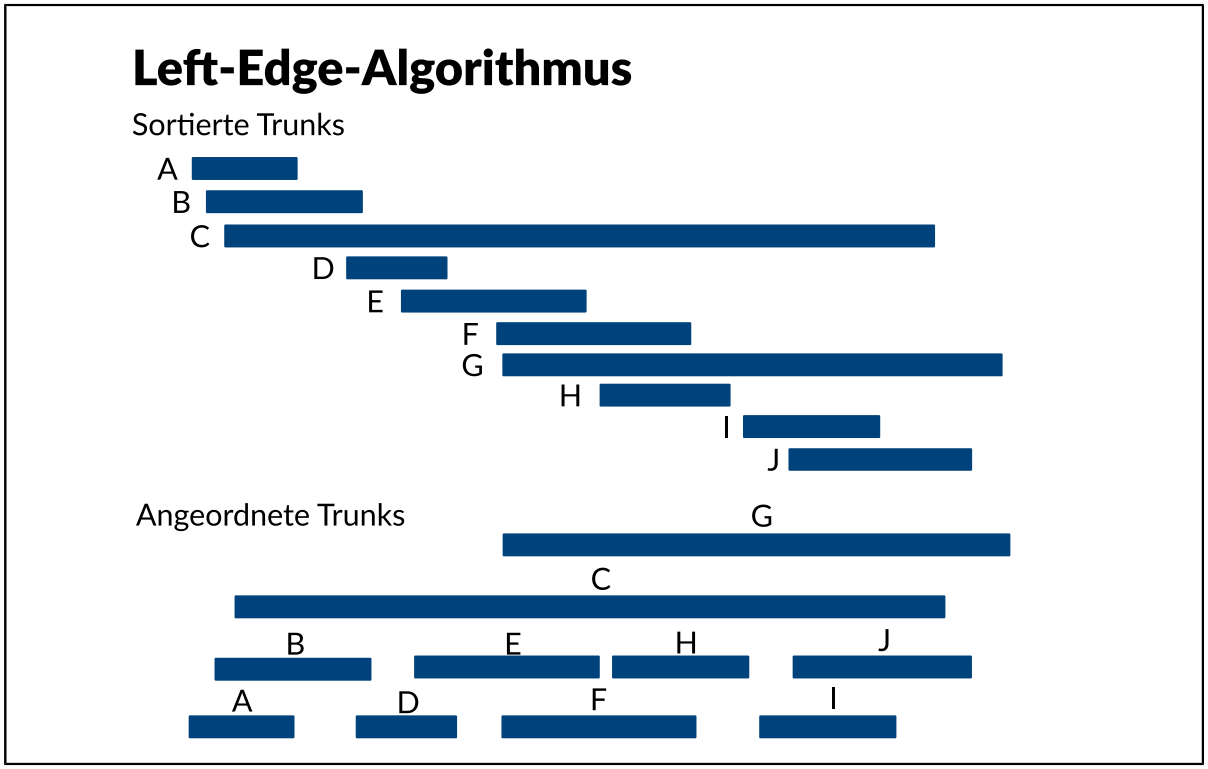
Es wird angenommen, dass die Seiten mit den Terminals oben und unten in dem Rechteck liegen. An den Seiten können Netze in den Kanal eintreten oder den Kanal verlassen. Sie werden dort dem Switchboxverdrahter übergeben.

Üblicherweise stehen in einem Kanal für die Verdrahtung vertikale Verbindungen (Branch) und horizontale Verbindungen (Trunk) zur Verfügung, die jeweils auf eigenen Metalllagen verdrahtet werden .

Die Kanalkapazität berechnet sich aus der Anzahl der Spuren, in die Trunks gelegt werden und die Anzahl an Metalllagen, die Trunks aufnehmen können.

Die Aufgabe des Kanalverdrahters ist es, mit möglichst wenig Spuren die Verdrahtung innerhalb des Kanals vollständig durchzuführen. Kanäle haben also grundsätzlich keine vorgegebene Höhe, sondern diese soll durch die benötigte Spurzahl minimiert werden.

Verdrahtung: Left-Edge-Algorithmus



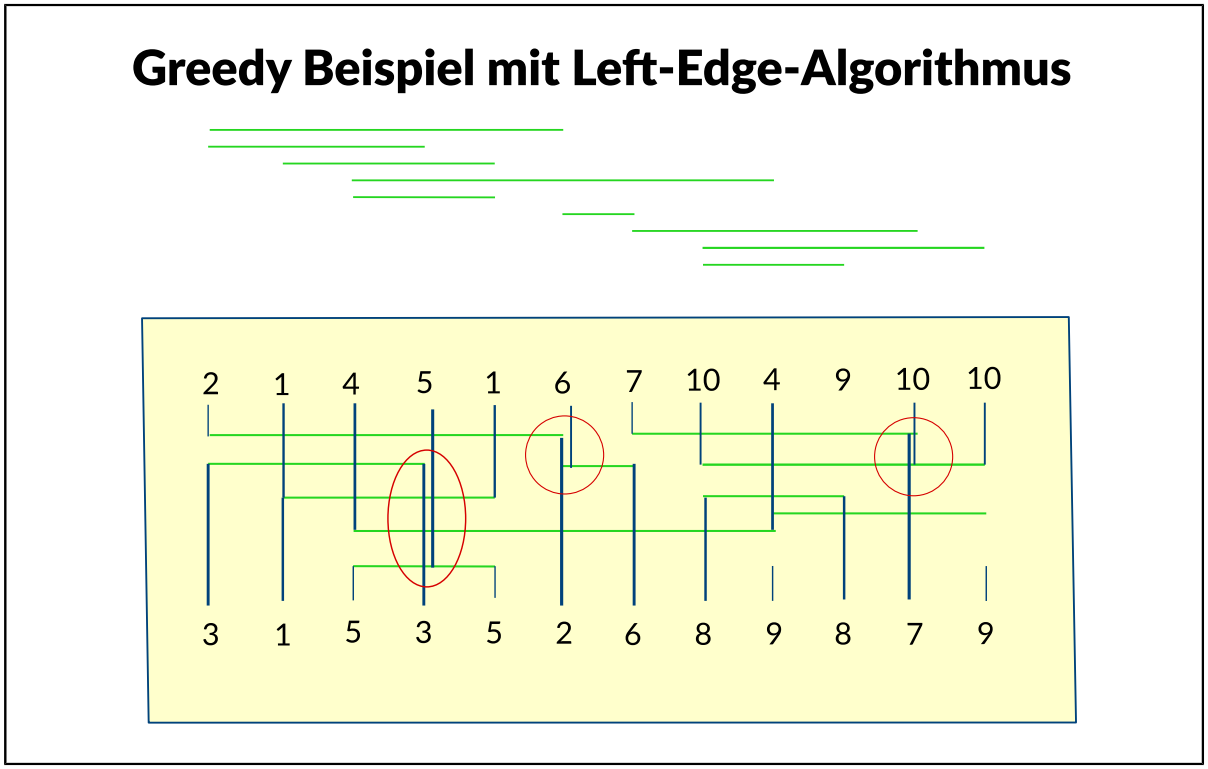
Da nicht für jeden Trunk eine neue Spur verwendet werden muss, können mehrere Trunks auf eine Spur gelegt werden. Hierzu dient der Left-Edge-Algorithmus.

Trunks beginnen und enden an den Positionen der entsprechenden Terminals. Sie werden nach ihren linken Anfangspositionen (left edge) sortiert. Anschließend wird der erste Trunk in der sortierten Liste entfernt und der ersten Spur zugeordnet. Um die Spur zu füllen, werden die Anfangspunkte der übrigen Trunks der Liste mit dem Endpunkt des Trunks aus der Spur verglichen. Liegt der Anfangspunkt rechts vom Endpunkt, so wird dieser Trunk hinter den vorherigen in die Spur eingefügt und aus der Liste entfernt. Dieses wird solange durchgeführt, bis die Spur gefüllt ist oder kein Trunk mehr in der Liste enthalten ist, der in die aktuelle Spur eingefügt werden kann.

Nun wird mit dem ersten der verbliebenen Trunks aus der Liste eine neue Spur angelegt und das Verfahren beginnt von vorn.

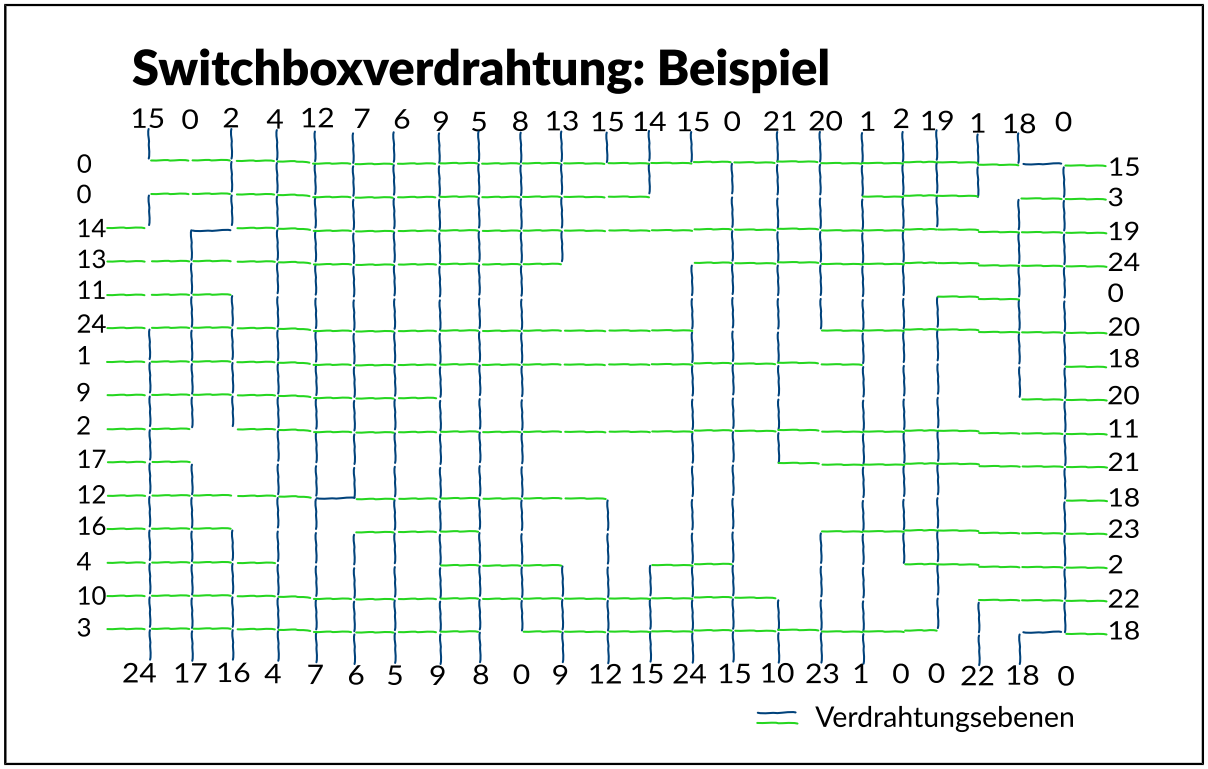
Im dargestellten Beispiel werden für 10 Trunks 4 Spuren benötigt. Der Left-Edge-Algorithmus liefert trotz seiner Einfachheit für die Minimierung der Spurzahl eine optimale Lösung, sofern es nicht zu Konflikten kommt, wenn Terminals an gleichen Positionen angeschlossen werden müssen.

Verdrahtung: Beispiel Left-Edge-Algorihmus



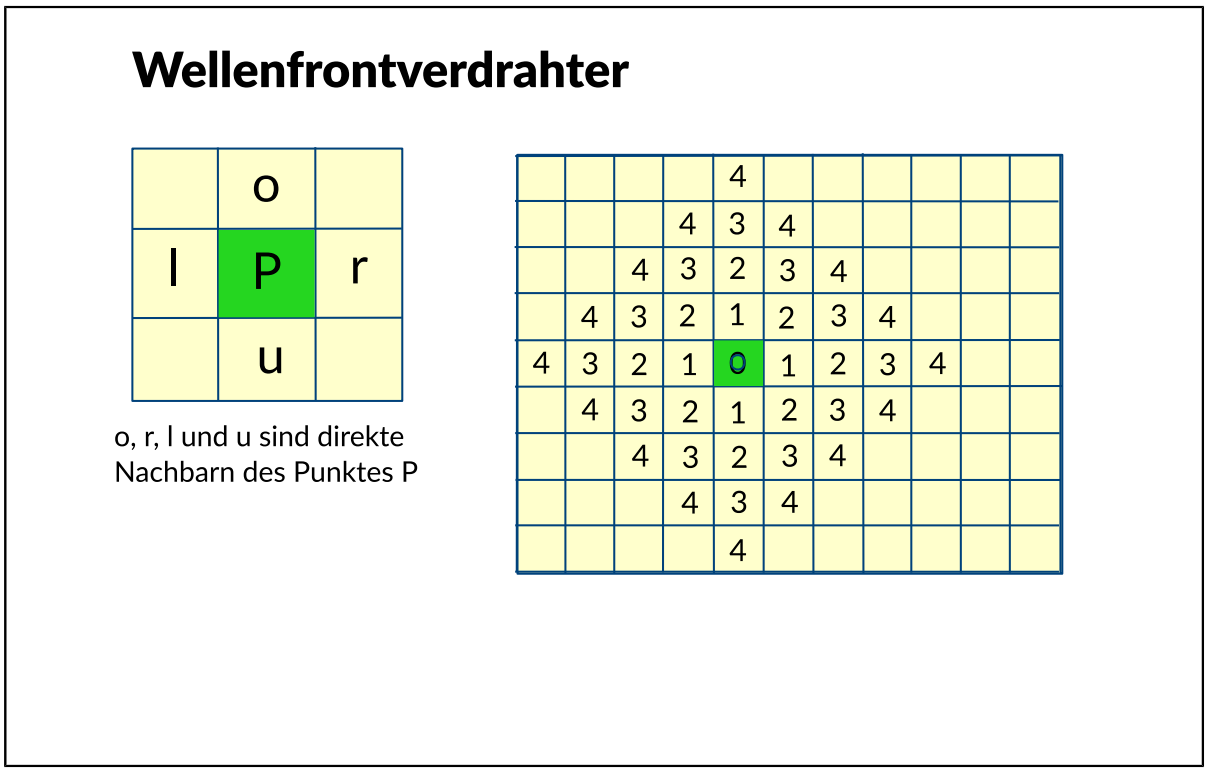
Es wird eine beispielhafte Verdrahtung mit Hilfe des Left-Edge-Algorithmus berechnet. Allerdings gibt es einige Konflikte, die nachträglich aufgelöst werden müssen. Das könnte wieder weitere Spuren erfordern.

Verdrahtung: Switchboxverdrahtung: Beispiel



Die Abbildung zeigt beispielhaft das Ergebniss einer Switchboxverdrahtung mit zwei Verdrahtungsebenen. Dabei sind die zu verbindenden Anschlüsse an den Rändern mit ihren Netznummern gekennzeichnet.

Verdrahtung: Wellenfrontverdrahter

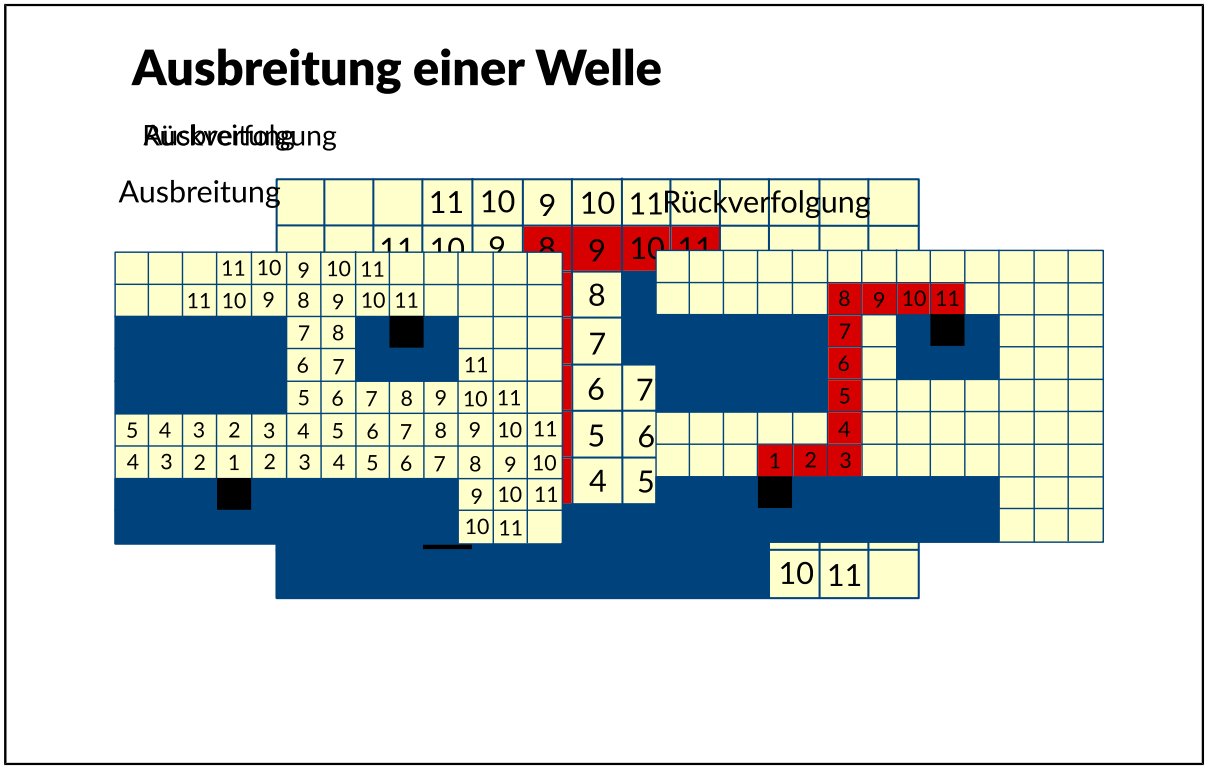


Der Wellenfront-Verdrahter ist ein rasterbasierter Punkt-zu-Punkt-Verdrahter. Eine anschauliche Vorstellung des Verfahrens liefert eine Welle, die sich vom Startpunkt der Verdrahtung aus in alle Richtungen ausbreitet, wie durch einen Stein, der ins Wasser geworfen wird. Die Welle läuft an Hindernissen im Layout vorbei und erreicht, wenn es einen Weg gibt, in jedem Falle das Ziel. Es handelt sich um eine Breitensuche.

Das Verfahren ist auch unter der Bezeichnung“Maze-Router” oder Lee-Algorithmus bekannt.

Der Startwert wird mit dem Wert 1 initialisiert. Die direkten Nacxhbarn (rechts, links, untzer- und oberhalb) erhalten den um 1 erhöhten Wert. Dieser Vorgang wird solange fortgesetzt, bis der Zielpunkt erreicht wurde.

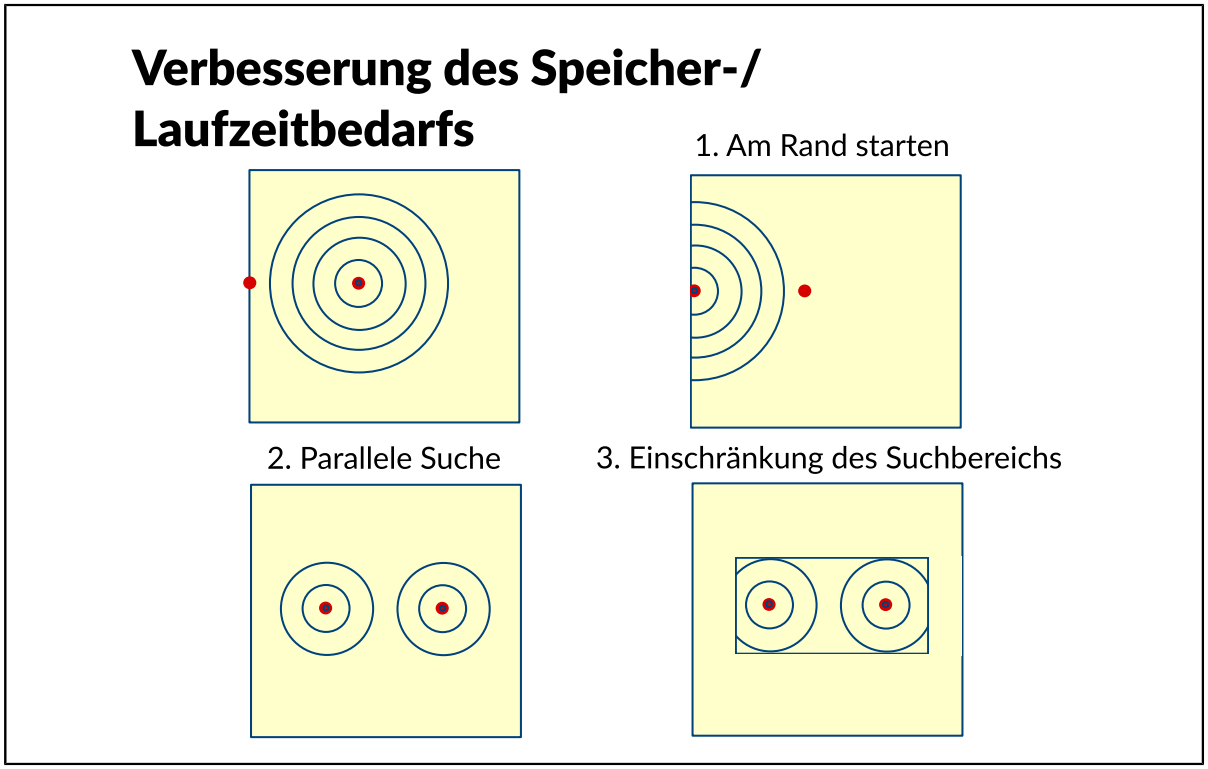
Verdrahtung: Ausbreitung einer Welle



Wenn das Ziel erreicht wurde, hat sich die Welle zwischen Start und Ziel ausgebreitet. Damit ist bekannt, dass es eine Lösung gibt und wie weit Start und Ziel auf kürzestem Wege auseinander liegen.

Unbekannt ist jedoch der Weg. Er kann durch Rückverfolgung gefunden werden. Die Rückverfolgung startet am Ziel und geht den Weg zurück, indem das jeweils folgende Feld mit dem nächst kleineren Wert ausgewählt wird. Dieser Weg muss nicht eindeutig sein, da es mehrere kürzeste Wege geben kann.

Verdrahtung: Verbesserung des Speicher-/Laufzeitbedarfs



Das beschriebene Verfahren hat einen hohen Speicher- und Laufzeitbedarf, da jedes Rasterfeld einen ganzzahligen Wert trägt und im Worst Case alle Felder mit einem Wert beschrieben werden müssen.

Kommen mehrere Punkte als Startpunkte in Frage, kann die Laufzeit des Verfahrens verbessert werden, indem der dem Rand am nähesten liegende Punkt als Startpunkt ausgewählt wird. Ein simultanes Aufbauen der Welle von Start und Ziel aus verbessert ebenfalls die Laufzeit durch die Verringerung des Flächenbedarfes des Suchbereiches. Treffen sich beide Wellen, so ist ein Weg gefunden.

Eine andere Möglichkeit zur Rechenzeit- und Speicherersparnis besteht darin, die Fläche, in der nach einem Weg gesucht werden darf, auf ein heuristisch bestimmtes Maß einzuschränken.

Bewertung: Wellenfrontverfahren

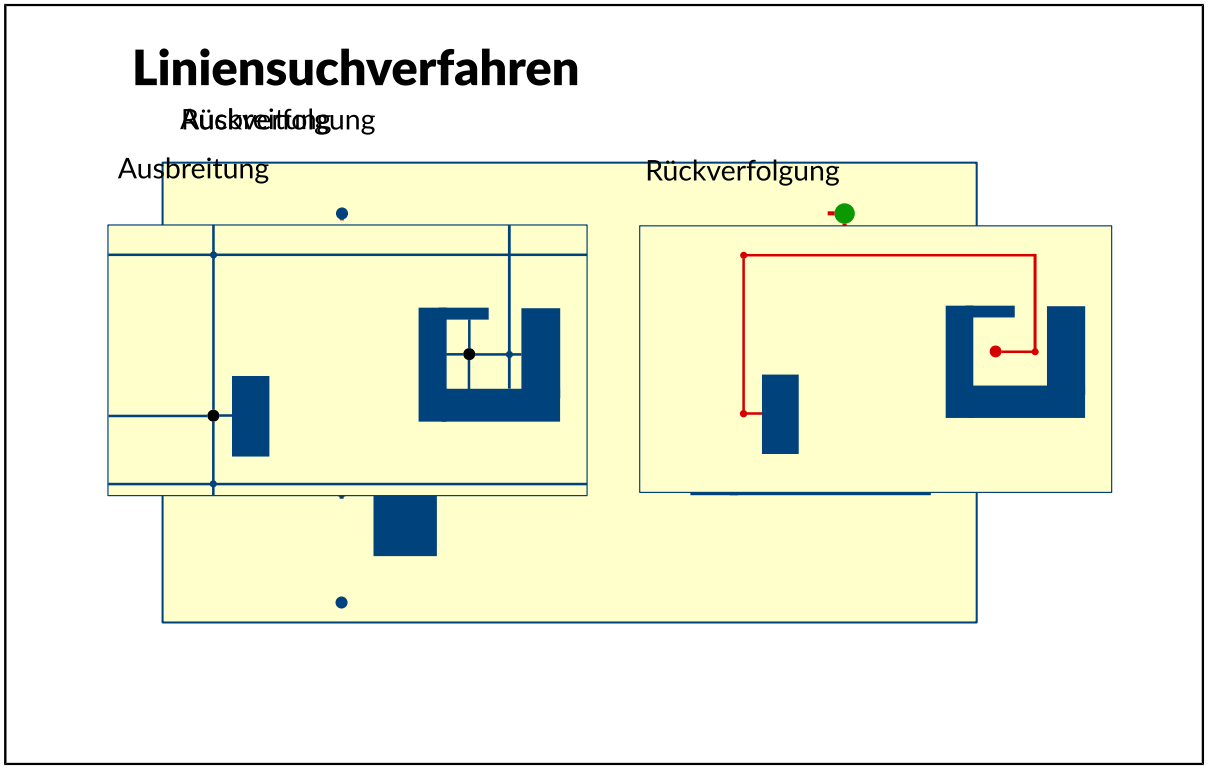
- Vorteile

- Falls eine Verbindung zwischen zwei Punkten möglich ist, wird sie gefunden.
- Die gefundene Verbindung ist in jedem Falle die kürzeste mögliche Verbindung zwischen den zwei Punkten.
- Der Algorithmus ist einfach zu implementieren.

- Nachteile

- Es wird jeweils nur eine Verbindung auf einmal gezogen.
- Der Algorithmus neigt dazu, mit den früh angelegten Verbindungen Wege für spätere Verbindungen zu versperren, und erreicht damit nicht unbedingt 100% Verdrahtungsrate.
- Das wiederholt auszuführende Markierungsverfahren resultiert in sehr hohen Laufzeiten.
- Die Layoutpräsentation führt zu hohem Speicherplatzbedarf.

Verdrahtung: Liniensuchverfahren



Liniensuchverfahren suchen ähnlich den Wellenfrontverdrahtern einen Pfad vom Start zum Ziel. Jedoch unterscheiden sie sich in der Erstellung der Teillösungen. Während die Wellenfrontverdrahter für neue Teillösungen einen Rasterpunkt hinzufügen, expandieren die Liniensucherverfahren rasterlos mit ganzen Linien.

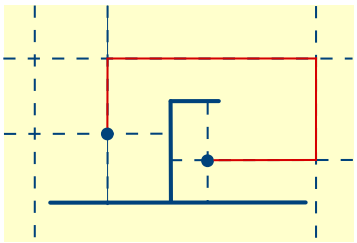
Das Hightower- und das Mikami-Verfahren starten mit der Erzeugung der Versuchslinien im Start- und Zielpunkt, indem bei beiden Verfahren im Start- und Zielpunkt jeweils eine horizontale und eine vertikale Linie erzeugt wird. Diese Versuchslinien werden solange ausgedehnt, bis sie auf ein Hindernis oder die Grenze der Verdrahtungsfläche stoßen. Schneiden sich die Start- und Zielversuchslinien, so ist ein Weg gefunden und die Suche wird abgebrochen. Schneiden sich die Start- und Zielversuchslinien nicht, werden iterativ senkrecht zu den letzten Versuchlinien neue erzeugt.

Verdrahtung: Hightower- und Mikami-Verfahren

Hightower- und Mikami-Verfahren

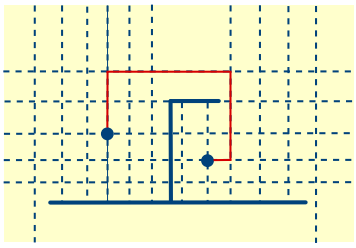
Hightower-Verfahren:

Es wird genau eine Versuchslinie erzeugt.



Mikami-Verfahren:

Es werden mehrere Versuchslinien (in einem festen Raster) erzeugt.



Das Hightower-Verfahren erzeugt die Versuchslinien anhand von charakteristischen Punkten von Hindernissen, um diese zu umgehen. Dieses Vorgehen ist stark heuristisch und findet somit nicht immer eine Lösung, auch wenn es eine gibt.

Das Mikami-Verfahren erzeugt neue Versuchslinien nach einem festen Raster, das sich nicht nach der Umgebung richtet. Ist die Größe des Rasters fein genug gewählt, wird die Lösung in jedem Fall gefunden, wenn es eine Lösung gibt.

Bewertung: Liniensuchverfahren

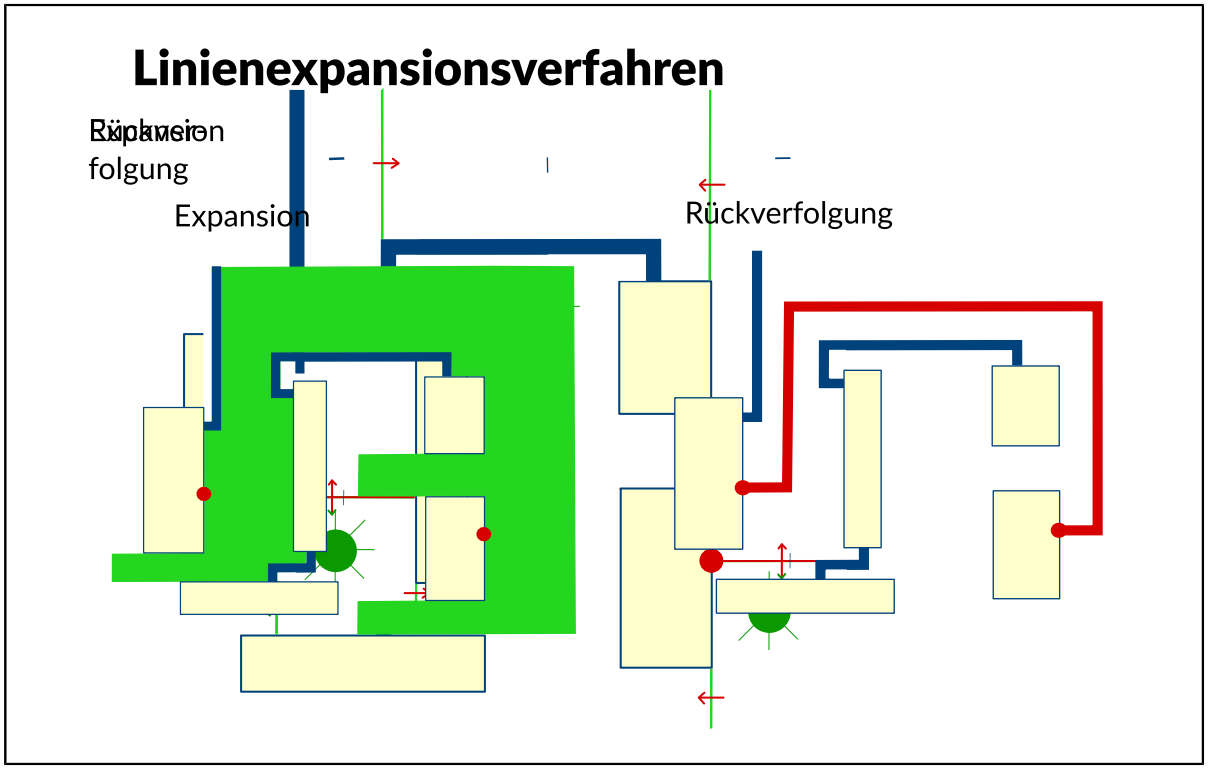
- Vorteile

- Laufzeit und Speicherbedarf sind geringer als beim Wellenfrontverfahren.
- Die Verfahren sind einfach zu implementieren.
- Das Mikami-Verfahren findet eine Lösung, falls eine existiert.
- Das Verfahren ist besonders für Verdrahtungen mit relativ wenigen Hindernissen auf der Verdrahtungsfläche gut geeignet.

- Nachteile

- Der Algorithmus neigt dazu, mit den früh angelegten Verbindungen Wege für spätere Verbindungen zu versperren, und erreicht damit nicht unbedingt 100% Verdrahtungsrate.
- Das Mikami-Verfahren findet zwar recht kurze Verbindungen, jedoch auf Kosten vieler Fluchtpunkte.
- Das Hightower-Verfahren kann nicht garantieren, eine Lösung zu finden, selbst wenn eine existiert.

Verdrahtung: Linienexpansionsverfahren



Das Linienexpansionsverfahren ist ein rasterfreies Verfahren, das als Kombination aus Wellenfrontverdrahter und Liniensuchverfahren verstanden werden kann. Im Unterschied zu den Wellenfrontverdrahtern und Liniensuchverfahren werden keine konkreten Wege gefunden, sondern nur Bereiche, in denen die Leitungen verlegt werden können.

Das Verfahren expandiert senkrecht zu Expansionslinien Expansionsflächen. Die Expansionsflächen werden durch die umgebenden Hindernisse begrenzt. Kanten, die keine Hindernisse darstellen, sind aktive Linien, welche in einem folgenden Schritt wieder expandiert werden können. Dieses Vorgehen wird iterativ weitergeführt, bis sich die Expansionsgebiete von Start- und Zielpfad überschneiden, womit eine Lösung gefunden wurde. Ein konkreter Weg für die Leitung wird in einem anschließenden Rückverfolgungsschritt gefunden.

Bewertung: Linienexpansionsverfahren

- Vorteile

- Die Geschwindigkeit des Algorithmus liegt zwischen der des Wellenfront- und der des Liniensuch-Verfahrens.
- Der beanspruchte Speicherbedarf ist sehr gering.
- Falls eine Verbindung existiert, wird sie auch gefunden.

- Nachteile

- Das Verfahren ermittelt keine konkrete Leitungsgeometrie, sondern eine Folge von Verdrahtungsgebieten, in denen in einem zweiten Schritt die eigentliche Leitung verlegt werden muss.
- Es ist eher für kleine Verdrahtungsprobleme geeignet, z.B. der interaktiven Analogverdrahtung.