# Algorithmen im Chip-Entwurf 4

## Genetische Algorithmen, Längenmaße und Platzierung

Andreas Koch
FG Eingebettete Systeme
und ihre Anwendungen
TU Darmstadt



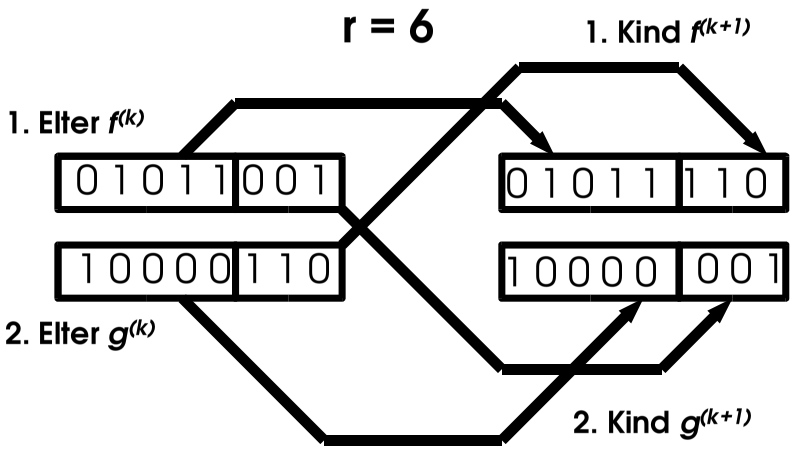
# Überblick

- Abschluss Genetische Algorithmen
- Übung Timing-Analyse
- Längenmaße
- Arten von Platzierungsproblemen
- Platzierungsverfahren
- Partitionierung
  - Kernighan-Lin
- Zusammenfassung



# Genetische Algorithmen 4

Beispiel: UPP im 10x10 Raster, plaziere einzelne Zelle

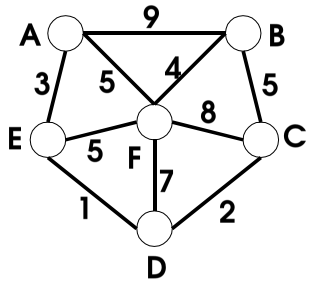





# Genetische Algorithmen 5

- Crossover erzeugt ungültige Lösungen
  - Abhilfe: Mehr Struktur als einfache Bitfolgen
- Bei UPP: Folgen von 4-bit Koordinaten
  - Nun zwar intern konsistente Koordinaten
  - Reicht aber nicht aus!

# Travelling Salesman Problem




- TSP
- *Einfacher* Zyklus durch alle Knoten mit minimaler Länge
  - Jeder Knoten nur einmal besucht
  - Minimale Kantengewichte
- NP-vollständig



# Genetische Algorithmen 6

- Chromosom: Folge von Knoten
- Aber:
  - $\underline{f}^{(k)}$ = v1v3 | v6v5v2v4, $\underline{g}^{(k)}$ = v4v2 | v1v5v3v6, $r$=3
  - $\underline{f}^{(k+1)}$ = v1v3v1v5v3v6, $\underline{g}^{(k+1)}$ = v4v2v6v5v2v4



# Genetische Algorithmen 7

- Problem-spezifisches Crossover
- Bei TSP: z.B. Geordnetes Crossover
  - Kopiere Elemente 1...($r$-1) aus $\underline{f}^{(k)}$ nach $\underline{f}^{(k+1)}$
  - Kopiere in $\underline{f}^{(k+1)}$ *fehlende* Elemente nach $\underline{f}^{(k+1)}$
    - In der Reihenfolge ihre Auftretens in $\underline{g}^{(k)}$
  - Beispiel
    - $\underline{f}^{(k)}$ = v1v3 | v6v5v2v4, $\underline{g}^{(k)}$ = v4v2 | v1v5v3v6, $r$=3
    - $\underline{f}^{(k+1)}$ = v1v3v4v2v5v6, $\underline{g}^{(k+1)}$ = v4v2v1v3v6v5, $r$=3



# Genetische Algorithmen 8

- Bisher noch keine Optimierung
  - Nur neue Lösungen erzeugt

➔ Bevorzuge gute Lösungen vor schlechten

  - Wähle „gute“ Eltern aus: Niedrige Kosten
  - Kombiniere gute Eigenschaften in Nachwuchs
  - Aber: Auch Gegenteil möglich ($r$ zufällig)
    - Vererbung schlechter Eigenschaften
    - Idee: Schlechte Nachkommen verscheiden in nächster Generation

# Genetische Algorithmen 9

```
genetic() {
        int pop_size;
        set<chromosome> pop, new_pop;
        chromosome parent1, parent2, child;

        pop := ∅;
        for (i:=1; i <= pop.size(); i := i+1)
                pop := pop ∪ {"Chromosom einer zufälligen Lösung"}
        do {
                newpop := ∅;
                for (i:=1; i<= pop.size(); i := i + 1) {
                        parent1     := pop.select();
                        parent2     := pop.select();
                        child       := crossover(parent1, parent2);
                        newpop      := newpop ∪ {child};
                }
                pop := newpop;
        } while (!stop());
        report(pop.findmin(c));
}
```



# Genetische Algorithmen 10

- stop()
  - Z.B. „Keine Verbesserung in den letzten *m* Iterationen“
  - *m* problemspezifischer Parameter
- Mutation
  - Fehler beim Kopieren
  - Vermeidet Steckenbleiben in lokalen Minima
- Sehr viele Variationsmöglichkeiten
  - Komplexes Crossover (mehrere *r*)
  - Mehrere Generationen gleichzeitig
  - Elite-Selektion
  - Meta-Genetische Algorithmen

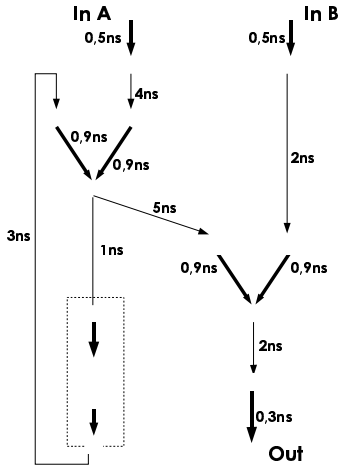


# Allgemeine Heuristiken

- Diverse Alternativen
  - Neuronale Netze
  - Simulierte Evolution
  - Lösen des SAT-Erfüllbarkeitsproblems
- Bei allen allgemeinen Ansätzen
  - Immer schlechter als problemspezifische
    - Z.B. Kernighan-Lin für Partitionierung
  - Aber schneller zu realisieren
    - Bei unbekannten Problemeigenschaften
- Hybride Ansätze
  - z.B. Eingeschränktes SA
    - SDI, TU Braunschweig



# Übung Timing-Analyse




$$T_a(v) = \underset{(u,v)\in E}{Max}\,(T_a(u) + w(u,v))$$

$$T_r(u) = \underset{(u,v)\in E}{Min}\,(T_r(v) - w(u,v))$$

$$slack(u,v) = T_r(v) - T_a(u) - w(u,v)$$

- $D_{max}$ = 13,6ns

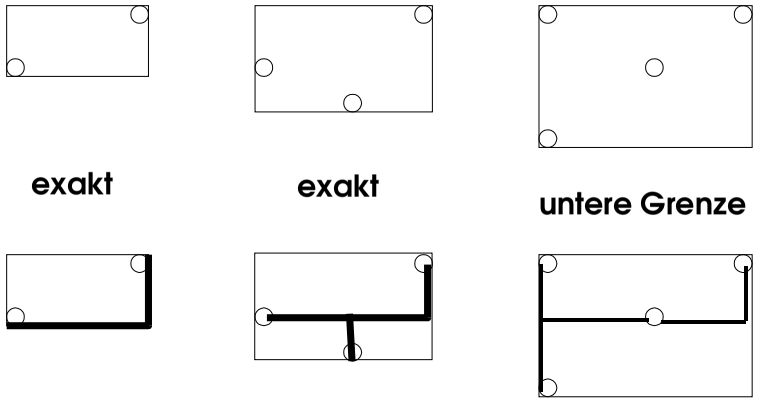
# Verdrahtungsfläche

- Mögliches Platzierungs-Qualitätskriterium
  - Gesamtfläche für Verdrahtung
    - Nur bei ASIC
    - Bei FPGA: Feste Breite der Leitungen, Länge reicht
- Aber: Vollständiges Routing zu komplex
  - NP
- Abschätzen der Länge durch Metrik
  - Einzeln pro Netz
  - Aufsummieren der Teillängen
  - Multiplizieren mit angenommener
    - Leitungsbreite plus
    - Leitungsabstand



# Längenmetriken 1

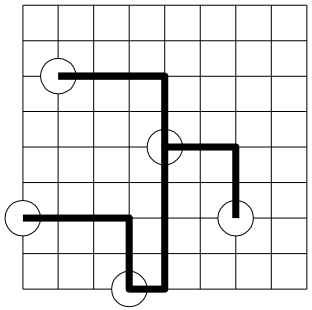
- Halber Umfang (half perimeter)
  - Rechteck um alle Terminals des Netzes






# Längenmetriken 2

- Minimaler Rechtwinkliger Überspannender Baum (MRST)



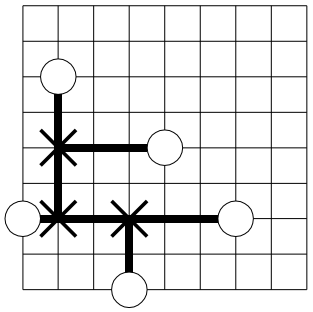
$L_R$=19

- Sonderfall von MRST
  - In P via Prim's Algorithmus (im Buch 3.4.4)
    - Vollständiger planarer Graph



# Längenmetriken 3

- Rechtw. Steiner-minimaler Baum (RSMT)



$L_S$=15

$L_R/L_S$ = 1,26

- RSMT-Berechnung ist NP-vollständig
  - Annäherung durch MSRT: max. 1.5x so lang
  - Bessere Näherungen existieren

# Längenmetriken 4

- Quadratischer Euklidischer Abstand
  - Arbeitet auf Zellen, nicht auf Netzen
    - Für Clique-Modell geeignet

$$\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\gamma_{ij}[(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2]$$

- $\gamma$ij
  - =0 wenn $(v_i, v_j) \notin E$
  - =$|(v_i,v_j)|$: Gewichtet nach Anzahl Kanten
  - < $|(v_i,v_j)|$: nicht nur Einzelleitungen



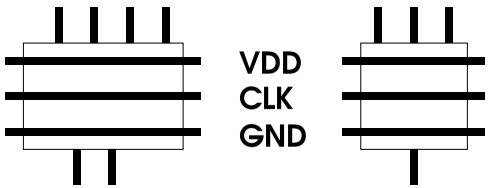
# Platzierungsprobleme

- Standardzellen
  - Semi-Custom
- Building Block
  - Teilweise Full-Custom möglich
- MPGA/FPGA
  - Auf vorgegebene Strukturen



# Standardzellen 1

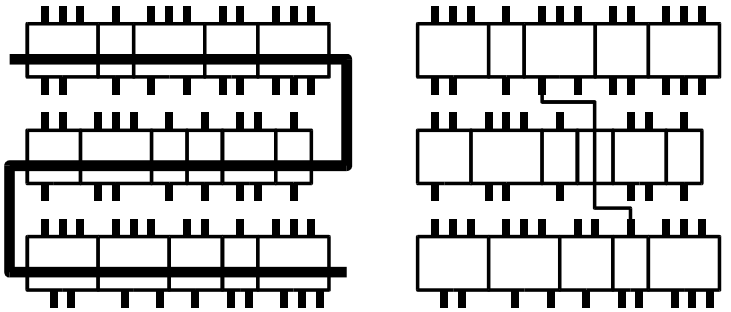
- Standardzellen (Semi-Custom)
  - Kleinere Schaltungen (Gatter) aus Bibliothek
  - Festes Layout
    - Grösse
    - Terminal-Anordnung
  - Anreihbar in Zeilen
    - Logistische Signale





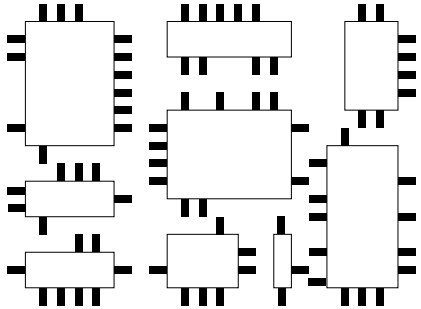

# Standardzellen 2

- Zeilenweise Anordnung
- Verdrahtung zwischen Zeilen
- Ausnahmen
  - Angrenzende Verbindungen (abutment)
  - Durchleitungen (feedthroughs)



# Building Blocks 1

- Mehr Flexibilität
  - Kann auch Full-Custom Teile enthalten
  - Automatisch generierte Blöcke (z.B. RAM)
- Verdrahtungskanäle an allen Seiten



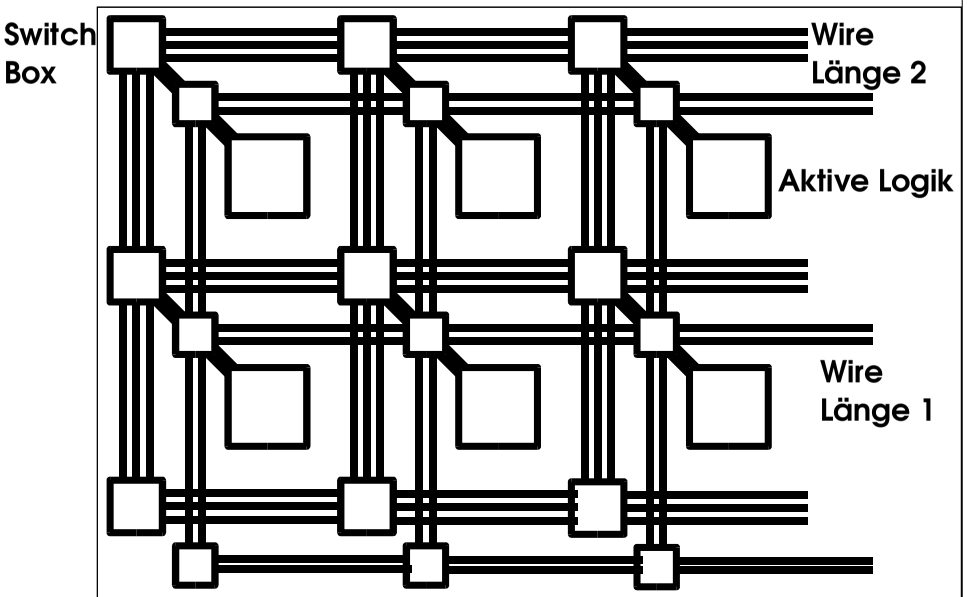


# MPGA/FPGA 1

- Mask-Programmable Gate Array
  - Modebezeichnung: Structured ASIC
- Field-Programmable Gate Array
- Feste Anordnung von
  - Logik
  - Verdrahtung
- Anpassung auf Anwendung
  - MPGA: Beim Hersteller (Metalllagen)
  - FPGA: Beim Anwender (Programmierung)



# MPGA/FPGA 2






# MPGA/FPGA 3

- Sehr ähnlich zu UPP
- Aber: Segmentierte Verbindungen
  - Mehrere Verdrahtungslängen
- Verzögerung abhängig von
  - Anzahl durchlaufener Switch Boxes
  - Last (Fan-Out)
- Feste Verdrahtungskapazität
- ➢ Nicht jede Platzierung verdrahtbar
- Verdrahtbarkeit in Kostenfunktion

# Platzierungsverfahren 1

- Konstruktiv
  - Zellkoordinaten sind nach einmaligem Plazierungsschritt fest
- Iterativ
  - Zellkoordinaten können beliebig oft geändert werden
- Kombination
  - Konstruktive Startlösung
  - Dann iterative Verbesserung



# Mögliche Optimierungsziele 1

- Minimale Verdrahtungsfläche
- Minimale Verdrahtungslänge
- Schnellste Schaltung
  - Timing-driven
- Anzahl von Leitungen durch Schnittlinie
- Verdrahtbare Schaltung
- Geringes Übersprechen
  - Zwischen Leitungen



# Konstruktive Platzierung 1

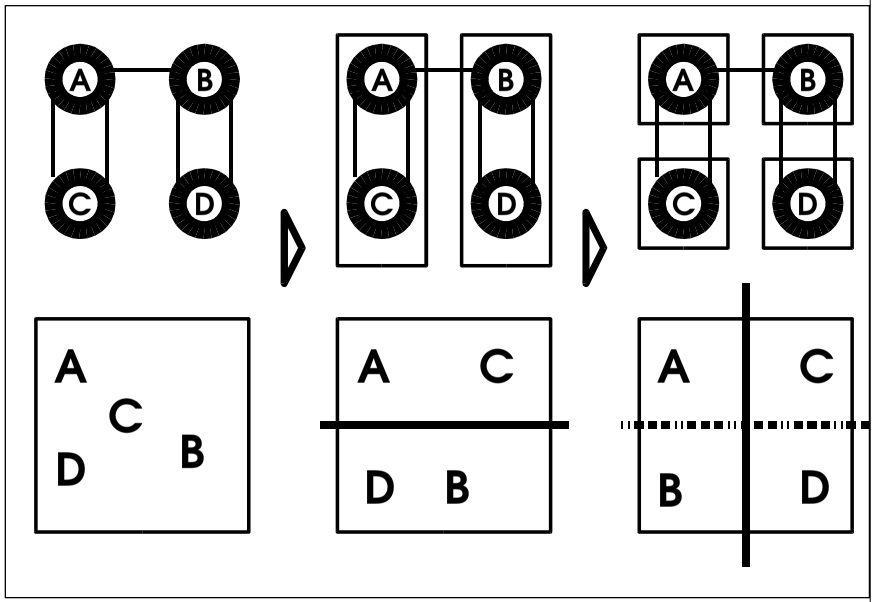
- Viele Methoden
- Top-Down Verfahren
  - Starten mit kompletter Schaltung
  - Aufteilen in immer kleinere Probleme
  - Beispiel: Min-Cut
- Bottom-Up Verfahren
  - Beginnen mit einzelnen Zellen
  - Zusammenfügen von Teillösungen
  - Beispiel: Clustering



# Min-Cut Platzierung 1

- Idee
  - Teile Schaltung in zwei Hälften auf
  - Minimiere die Anzahl der Netze dazwischen
    - MinCut: Minimiere Gewicht *durchschnittener* Netze
  - Teile auch Layoutfläche nach jedem Schnitt
  - Ordne Schaltungshälften Layouthälften zu
    - Horizontal und Vertikal, i.d.R. abwechselnd
  - Wiederhole bis Abbruch
    - z.B. Nur noch eine Zelle in Partition

# Min-Cut Plazierung 2






# Min-Cut Plazierung 3

- Aufteilen des Graphen
  - Standardalgorithmen
- Zuweisung der Partitionen an Layout
  - Einschließlich Richtung der Aufteilung
  - Verschiedene Heuristiken
  - Beispiele:
    - Berücksichtige bereits zugewiesene Partitionen
    - Berücksichtige Chip-I/O-Pads



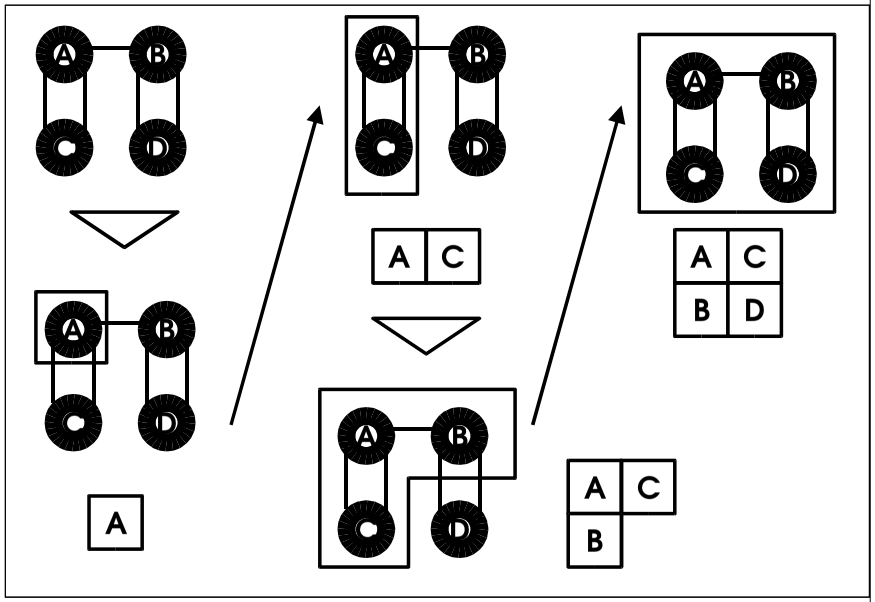
# Platzierung mit Clustering 1

- Beginne mit einer Startzelle als Cluster
- Finde angeschlossene Zelle(n)
- Ordne Zelle(n) „nahe“ um Cluster an
- Füge neue Zellen dem Cluster hinzu

- Entscheidungen:
  - Welche Zellen(n) hinzufügen?
  - Auf welche Art nahegelegen anordnen?



# Platzierung mit Clustering 2



# Iterative Verbesserung 1

- „Kleine“ Veränderung bestehender Lösung
  - Ändere die Position von Zelle(n)
  - Falls besseres Ergebnis: Immer übernehmen
  - Schlechter: Unter Umständen übernehmen

  ➔ Abhängig von Suchverfahren!



# Iterative Verbesserung 2

```
iterative_improvement () {
   s := initial_configuration();
   c := s.cost();
   while (!stop()) {
         s' := s.perturb();
         c':= s'.cost();
         if ( c.accept( c' ) )
             s := s';
   }
}
```

- initial_configuration
- cost
- stop
  - z.B. #Iterationen
  - komplexer möglich
- accept
  - Nachbarsuche
  - Simulated Annealing
  - Tabu-Suche



# Iterative Verbesserung 3

- perturb
  - Bei UPP: einfach, z.B. Positionstausch
    - Bei Standardzellen oder Building Block:
      - Unterschiedliche Zellgrößen, Überlappung möglich

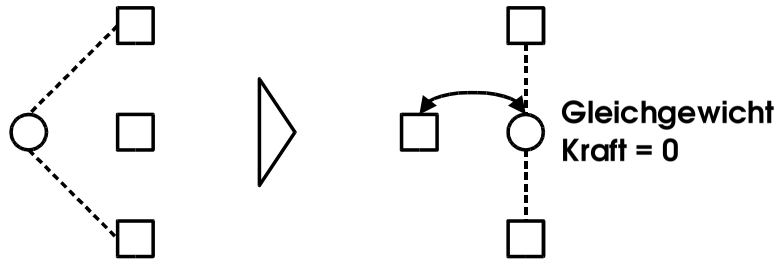


# Iterative Verbesserung 4

- Vorgehensweisen
  - Überlappung erlaubt, aber höhere Kosten
    - Bereinige beste gefundene Lösung am Ende
    - Möglicherweise drastische Verschlechterung
  - Beseitige Überlappung direkt nach jedem Zug
    - Bei BB sehr aufwendig, bei SC machbar
    - Aber so genauere Kostenberechnung möglich
  - Erzeuge nur überlappungsfreie Lösungen
    - Züge unter Umständen sehr viel aufwendiger

# Iterative Verbesserung 5

- Alternativen zu zufälligem Zellaustausch
  - Kräfte-gesteuerte Auswahl des Partners
  - Bestimme Idealposition der Zelle
    - Reduziere durch Netze ausgeübte Anziehungskraft
  - Tausche dann mit Zelle auf Idealposition






# Iterative Verbesserung 6

- Berechnung des Schwerpunktes
  - Verwendet Cliquen-Modell $G(V, E)$
  - $\gamma_{ij}$: Gewicht von $(i,j) \in E$, $\gamma_{ij} = 0$ falls $(i, j) \notin E$
  - Bestimme Schwerpunkt $(x_i^g, y_i^g)$ der Zelle $i$

$$x_i^g = \frac{\sum_j \gamma_{ij} x_j}{\sum_j \gamma_{ij}} \quad \text{Gewichteter Durchschnitt} \quad y_i^g = \frac{\sum_j \gamma_{ij} y_j}{\sum_j \gamma_{ij}}$$

  - Bewege Zelle $i$ dorthin
  - Was tun, wenn dort schon andere Zelle liegt?
    - Bewege andere Zelle auf ihren Schwerpunkt
    - Erzeugt Folge von Zügen, ggf. Tabu-Mechanismus



# Partitionierung 1

- Aufteilen eines Graphen
- Hier motiviert durch Plazierung
  - Min-Cut
- Andere Anwendungen
  - Aufteilen einer Schaltung auf mehrere Chips
  - Verkleinern der Problemgröße
    - Vorbearbeitung vor anderem Algorithmus
- Viele Verfahren
  - Beispiel: Kernighan-Lin



# Kernighan-Lin Partitionierung 1

- Problem
  - Gewichteter, ungerichteter Graph $G(V,E)$
  - $|V| = 2n$
  - $\gamma_{ab}$: Gewicht von $(a,b) \in E$, $\gamma_{ab} = 0$ bei $(a,b) \notin E$
  - Finde Mengen $A$ und $B$ mit
    - $A \cup B = V$, $A \cap B = \emptyset$, $|A| = |B| = n$
  - Minimiere

$$\sum_{(a,b) \in A \times B} \gamma_{ab}$$

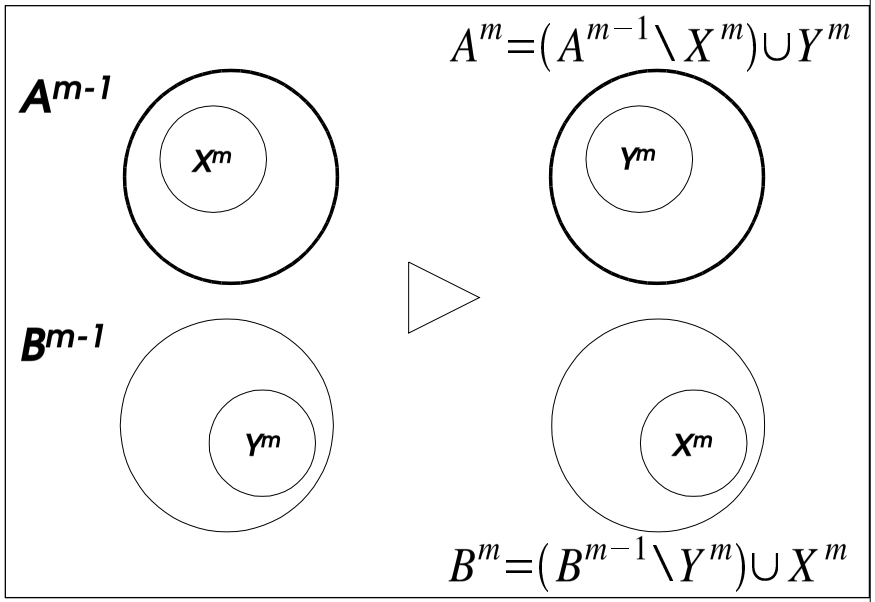
- Arbeitet auf Cliquen-Modell

# Kernighan-Lin Partitionierung 2

- Partitionierungsproblem ist NP-vollständig
- KL ist eine Heuristik
  - Im praktischen Einsatz bewährt
- Vorgehensweise
  - Anfangslösung bestehend aus $A^0$ und $B^0$
    - I.d.R. nicht optimal
  - Isoliere Untermengen von $A^{m-1}$ und $B^{m-1}$
  - Tausche diese aus um $A^m$ und $B^m$ zu bestimmen
  - Wiederhole, solange Verbesserung erreichbar



# Kernighan-Lin Partitionierung 3






# Kernighan-Lin Partitionierung 4

- Optimum immer in einem Schritt erzielbar
  - Bei geeignetem $X^m$ und $Y^m$
- Problem: Wie $X^m$ und $Y^m$ bestimmen?
  - Schwer zu finden

➔Suche Lösung in mehreren Schritten

  - Wiederhole, bis keine Verbesserung mehr
- Anzahl Schritte unabhängig von *n*
  - In der Praxis <= 4.



# Kernighan-Lin Partitionierung 5

- Konstruktion von $X^m$ und $Y^m$
- Externe Kosten

$$E_a = \sum_{y \in B^{m-1}} \gamma_{ay} \quad , a \in A^{m-1}$$

- Interne Kosten

$$I_a = \sum_{x \in A^{m-1}} \gamma_{ax} \quad , a \in A^{m-1}$$

- Analog für B

# Kernighan-Lin Partitionierung 6

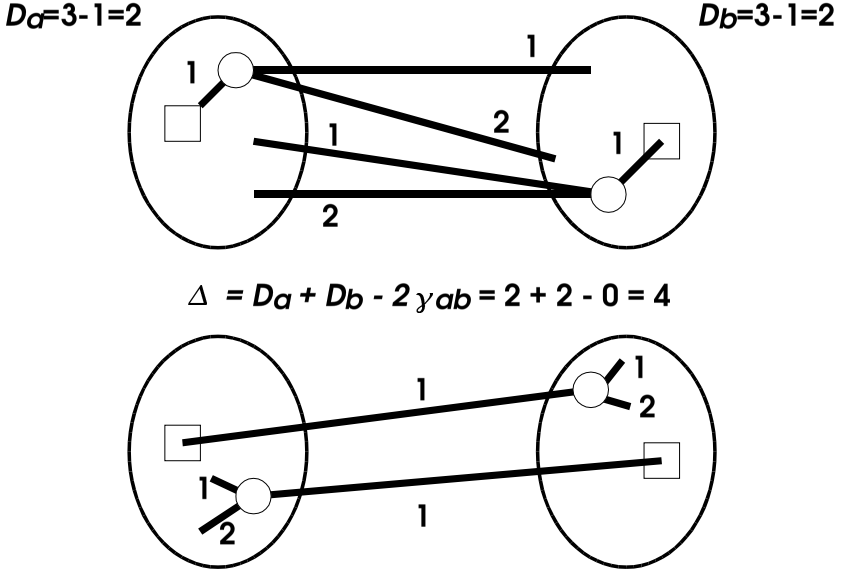
- $D_a = E_a - I_a$ für $a \in A^{m-1}$ (desirability)
  - >0: Knoten sollte nach *B* getauscht werden
  - <0: Knoten sollte in *A* bleiben
- Verbesserung $\Delta$ der Schnittkosten
  - Bei Austausch von $a \in A^{m-1}$ und $b \in B^{m-1}$

$$\Delta = D_a + D_b - 2\gamma_{ab}$$

  - $\Delta$ kann negativ sein!

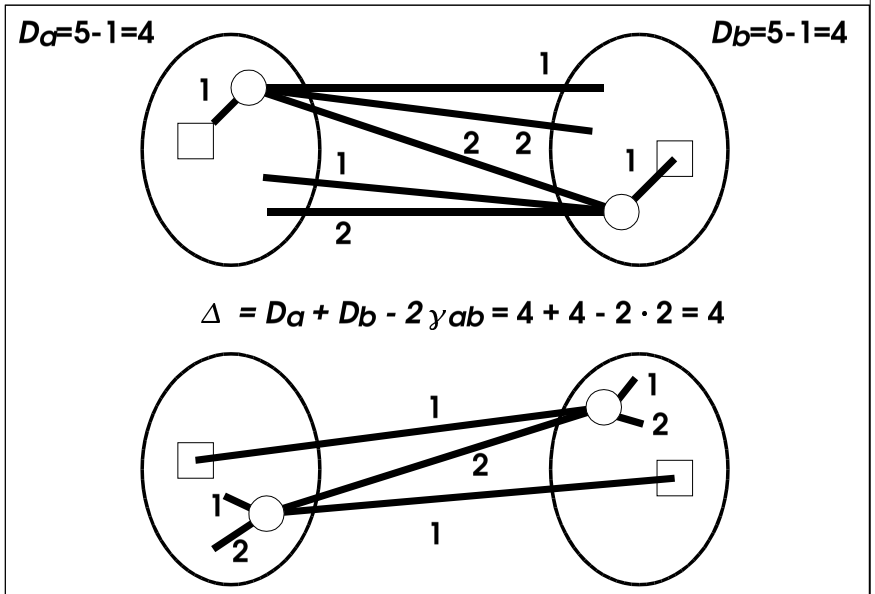


# Kernighan-Lin Partitionierung 7






# Kernighan-Lin Partitionierung 8






# Kernighan-Lin Partitionierung 9

initialize($A^0$, $B^0$);
m := 1;
**do** {
  **foreach** $a \in A^{m-1}$
    "berechne $D_a$";
  **foreach** $b \in B^{m-1}$
    "berechne $D_b$"
  **for** (i:=1; i <= n; ++i) {
    "finde freie $a_i \in A^{m-1}$, $b_i \in B^{m-1}$ mit
      $\Delta_i := D_{ai} + D_{bi} - 2\gamma_{aibi}$ maximal"
    "sperre $a_i$ und $b_i$"
    **foreach** "freies" $x \in A^{m-1}$
      $D_x := D_x + 2\gamma_{xai} - 2\gamma_{xbi}$;
    **foreach** "freies" $y \in B^{m-1}$
      $D_y := D_y - 2\gamma_{yai} + 2\gamma_{ybi}$;
  }
  "finde ein *k* mit $\sum_{i=1}^{k} \Delta_i$ ist max."
  $G := \sum_{i=1}^{k} \Delta_i$
  **if** (G > 0) {
    $X^m := \{a_1, \ldots a_k\}$;
    $Y^m := \{b_1, \ldots, b_k\}$;
    $A^m := (A^{m-1} \setminus X^m) \cup Y^m$;
    $B^m := (B^{m-1} \setminus Y^m) \cup X^m$;
    "entsperre alle Knoten in $A^m$ and $B^m$"
    m := m + 1;
  }
} **while** (G > 0);

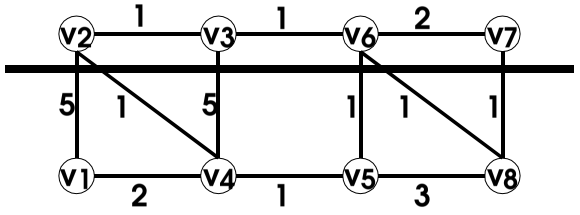
$$D_x = E_x - I_x$$
$$= E_x^{old} + \gamma_{ax} - \gamma_{bx} - (I_x^{old} - \gamma_{ax} + \gamma_{bx})$$
$$= D_x^{old} + 2\gamma_{ax} - 2\gamma_{bx}$$

# Kernighan-Lin Partitionierung 10

- $\Delta_i$ kann negativ werden
- $\sum \Delta_i$ kann zeitweise auch negativ sein
  - Dicht verbundene Teilmengen
    - Keine Verbesserung bei Austausch von Einzelknoten
    - Erst bei Austauch der gesamten Teilmenge



# Kernighan-Lin Partitionierung 11

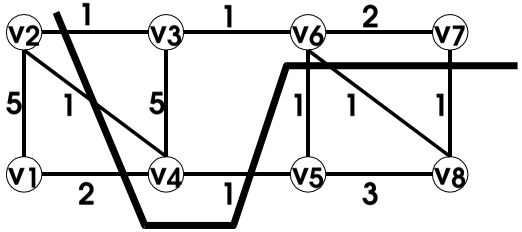



| i | $A^0$ v2 | v3 | v6 | v7 | $B^0$ v1 | v4 | v5 | v8 | $\Delta_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | [5] | 3 | -1 | -1 | 3 | [3] | -3 | -1 | 6 |
| 2 | | -5 | -1 | [-1] | -3 | | [-1] | -1 | -2 |
| 3 | | -5 | [1] | | -3 | | | [3] | 2 |
| 4 | | [-3] | | | [-3] | | | | -6 |

$\sum \Delta_i$: 6, 4, 6, 0



# Kernighan-Lin Partitionierung 12

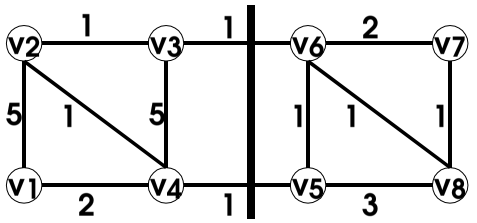



| i | $A^1$ v3 | v4 | v6 | v7 | $B^1$ v1 | v2 | v5 | v8 | $\Delta_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -5 | [-1] | -1 | -1 | -3 | -3 | -1 | [-1] | -2 |
| 2 | [5] | | -3 | -3 | -7 | -5 | [3] | | 8 |
| 3 | | | [-3] | -3 | [-7] | -7 | | | -10 |
| 4 | | | | [1] | | [3] | | | 4 |

$\sum \Delta_i$: -2, 6, -4, 0



# Kernighan-Lin Partitionierung 13




- Danach keine Verbesserung mehr in G
- Innere Schleife: *n* Iterationen
  - Finden des Paares mit bestem $\Delta$: $O(n^2)$
  - Nach $\Delta$ sortiert: O(n log n)

→ $O(n^3)$ oder $O(n^2 \log n)$

# Kernighan-Lin Partitionierung 14

- KL: Lokale Suche mit variabler Nachbarschaft
- Schnellere Verfahren
  - Fiduccia-Mattheyses (FM)
    - Wesentlich schneller: O(*n*)
    - Aber schlechtere Qualität der Lösungen
  - QuickCut (QC): avg. O(|E| log *n*)
    - Gleiche Qualität wie KL
- Diverse Alternativen
  - Spectral Partitioning, Multi-Level-FM, ...



# Weiteres Vorgehen

- Diesen Freitag keine Veranstaltung!
- Dienstag
  - Abgabe 1. Aufgabe: 12:00 Uhr MET mittags
    - Ausnahmsweise noch *ohne* Gruppennummer
    - Bitte in der Mail auch Klarnamen angeben
      - Nicht nur E-Mail-Adressen!
  - Keine Vorbereitung der Vorlesung
    - Vorstellung eines realen Platzierungswerkzeugs



# Zusammenfassung

- Genetische Algorithmen
- Übung Timing-Analyse
- Längenmaße für Netze
- Platzierungsverfahren
  - Zieltechnologien
  - Konstruktiv
  - Iterativ
- Partitionierung: Min-Cut
  - Anwendung für Platzierung
  - Kernighan-Lin