Algorithmen im Chip-Entwurf 2

Kompaktierung, Schaltungsdarstellungen und Timing-Analyse

Andreas Koch
FG Eingebettete Systeme
und ihre Anwendungen
TU Darmstadt

Organisatorisches

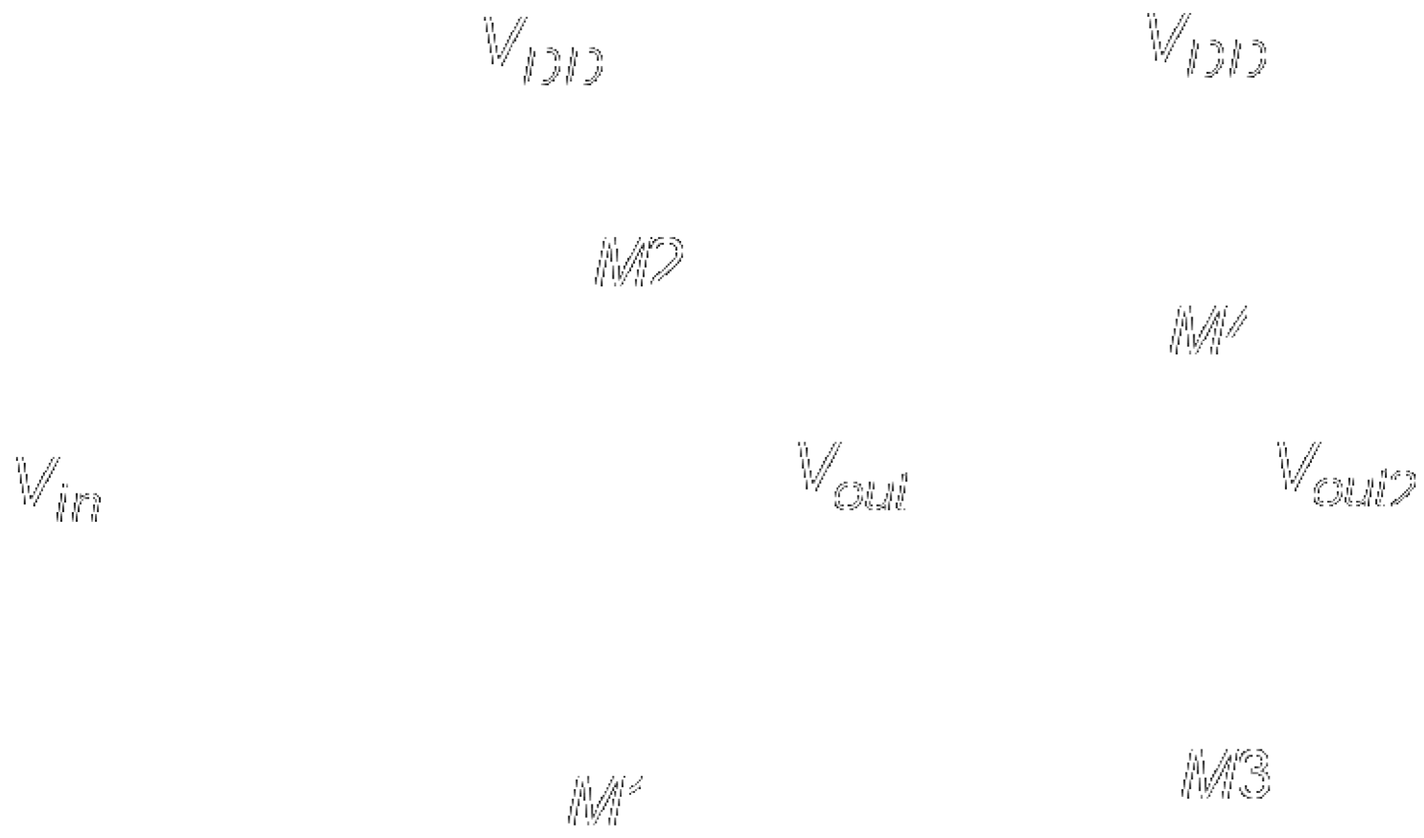
- Vorgehensweise
  - Anmeldebögen

- Wichtige Spalten ganz rechts: Ankreuzen
  - IV 4 SWS
    - Sie wollen das ganze Programmierprojekt
  - VL 2 SWS
    - Sie wollen ohnehin nur die VL hören

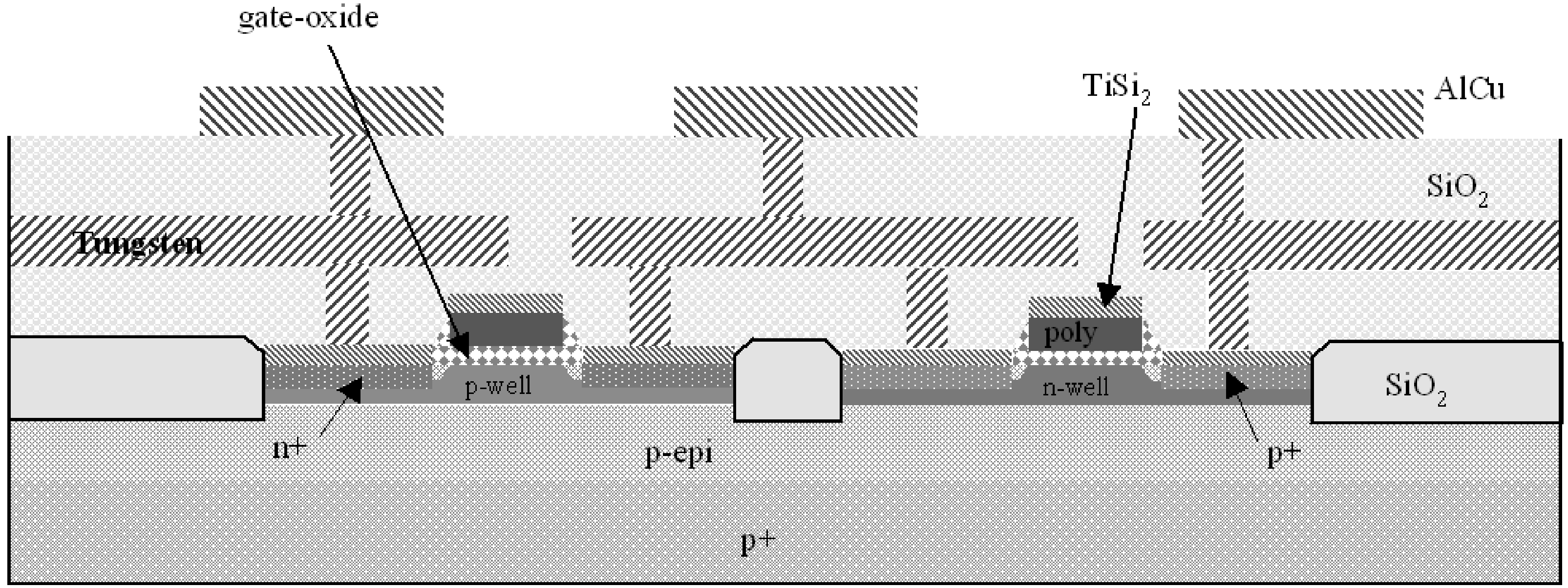
Übersicht

- Grundlagen von VLSI-Chips
- Kompaktierung
  - Längste Pfade
- Datenstrukturen für Schaltungen
- Timing-Analyse
- Zusammenfassung

Transistorschaltungen

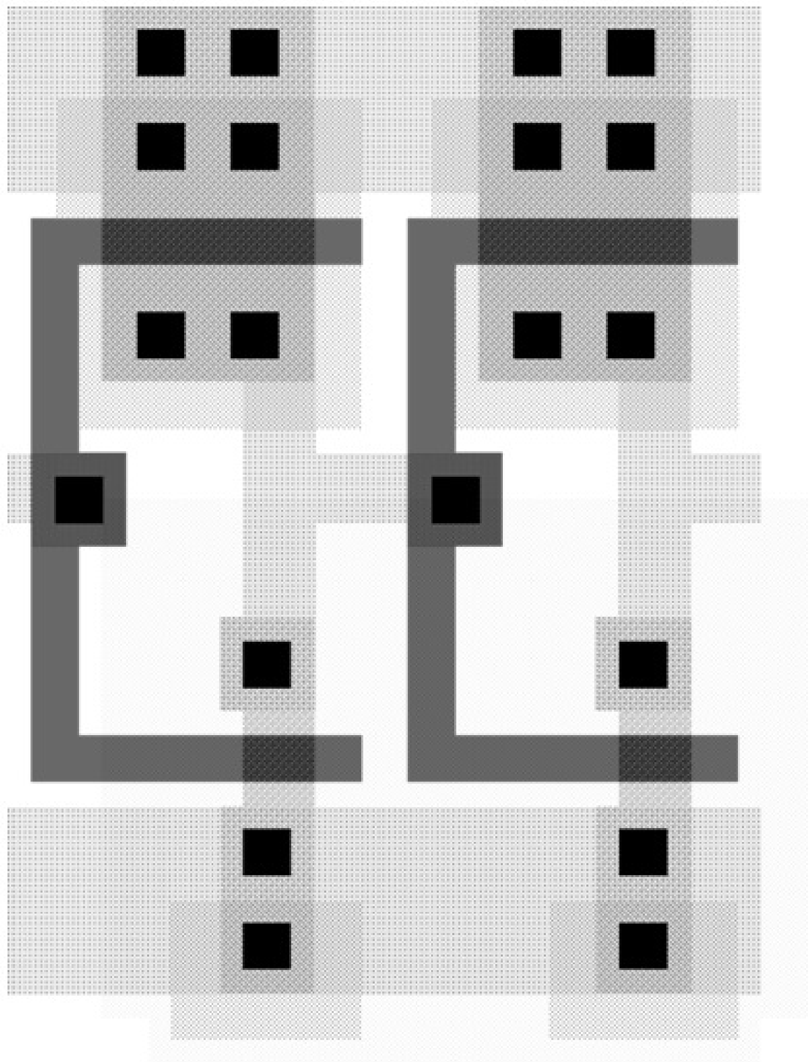


Seitenansicht durch Chip

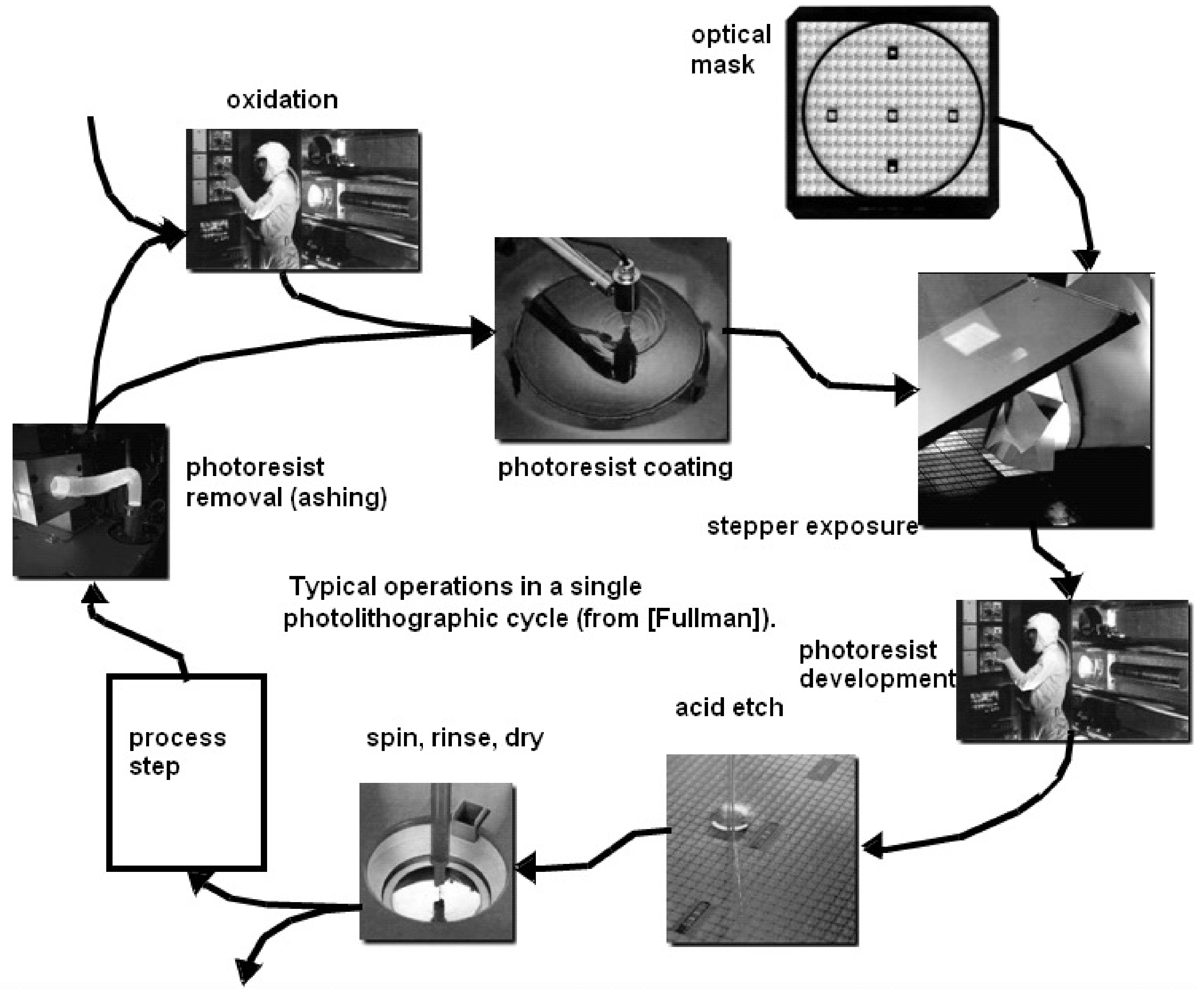


Dual-Well Trench-Isolated CMOS Process

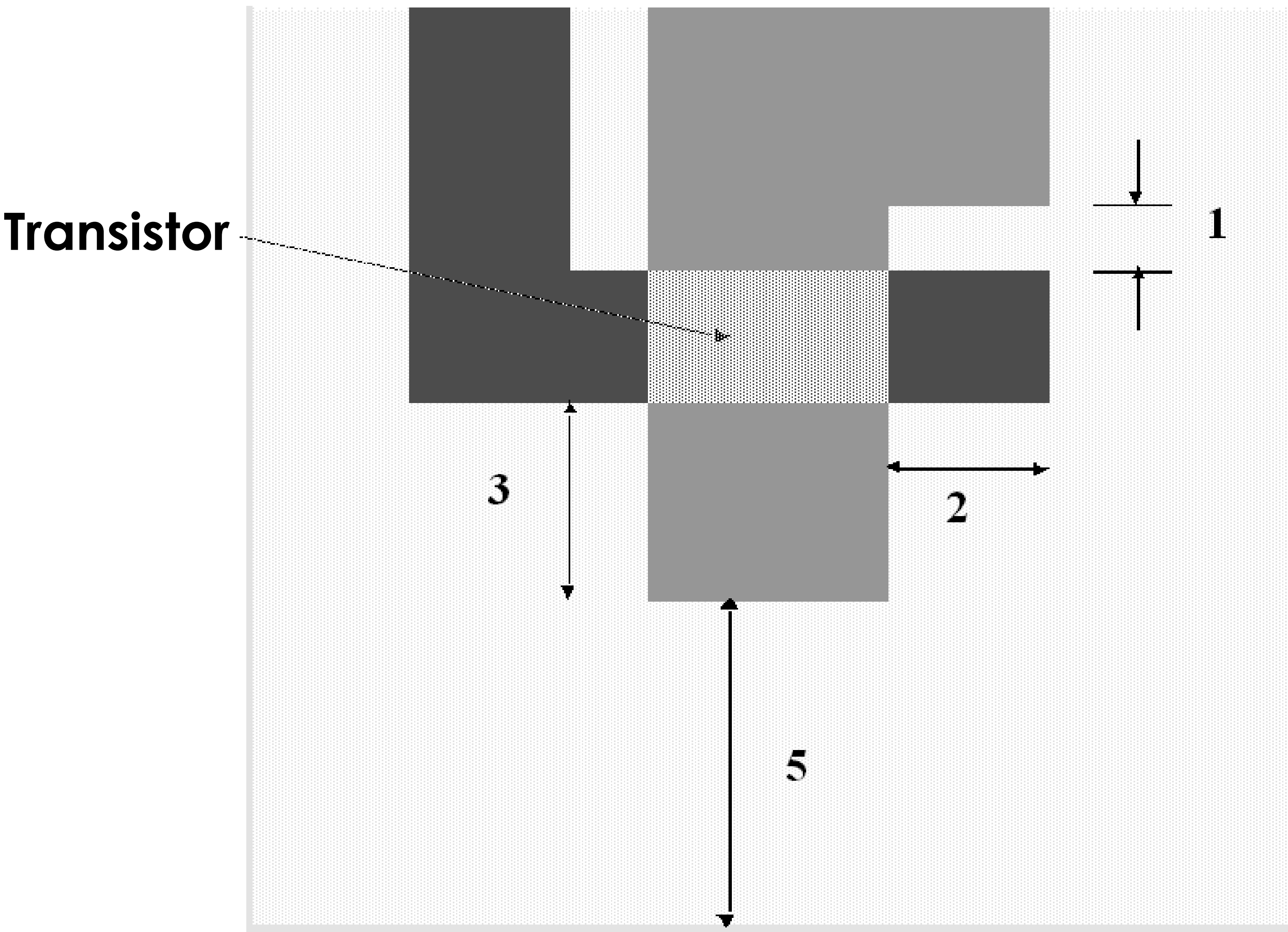
Layout-Sicht



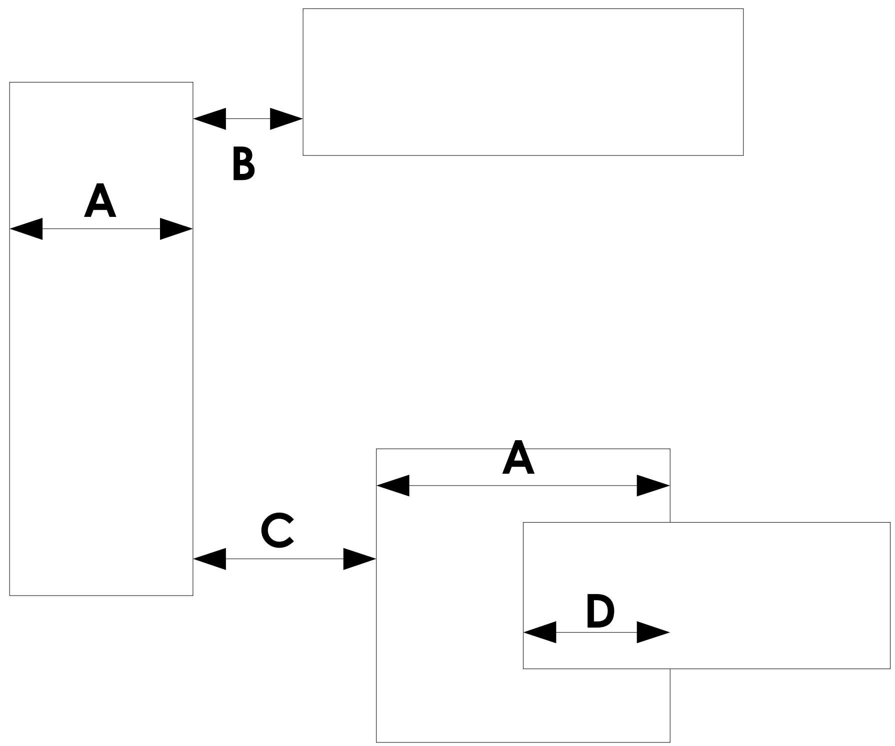
Fertigung


optical
mask
oxidation
photoresist coating
stepper exposure
photoresist
removal (ashing)
Typical operations in a single
photolithographic cycle (from [Fullman]).
photoresist
development
acid etch
spin, rinse, dry
process
step

Entwurfsregeln 1



Entwurfsregeln 2



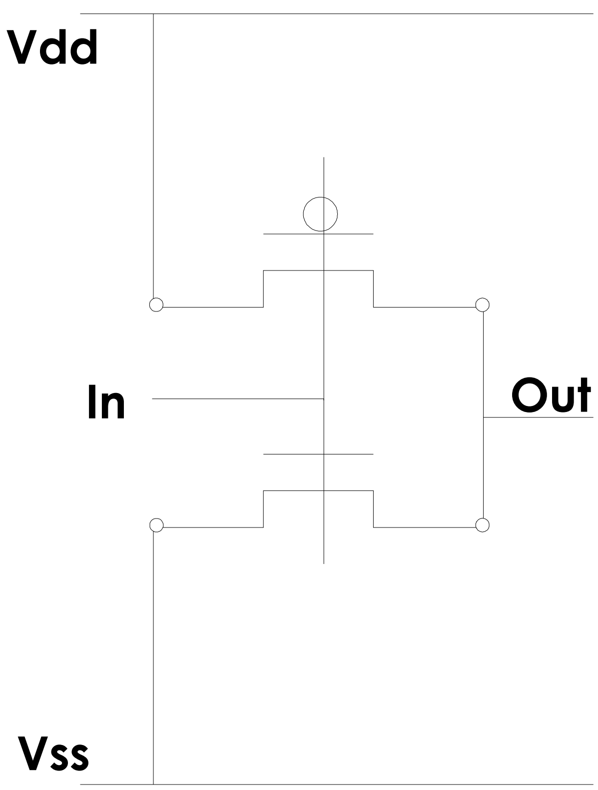
A – minimale Breite
B – minimaler Abstand (L1-L2)
C – minimaler Abstand (L1-L1)
D – minimale Überlappung

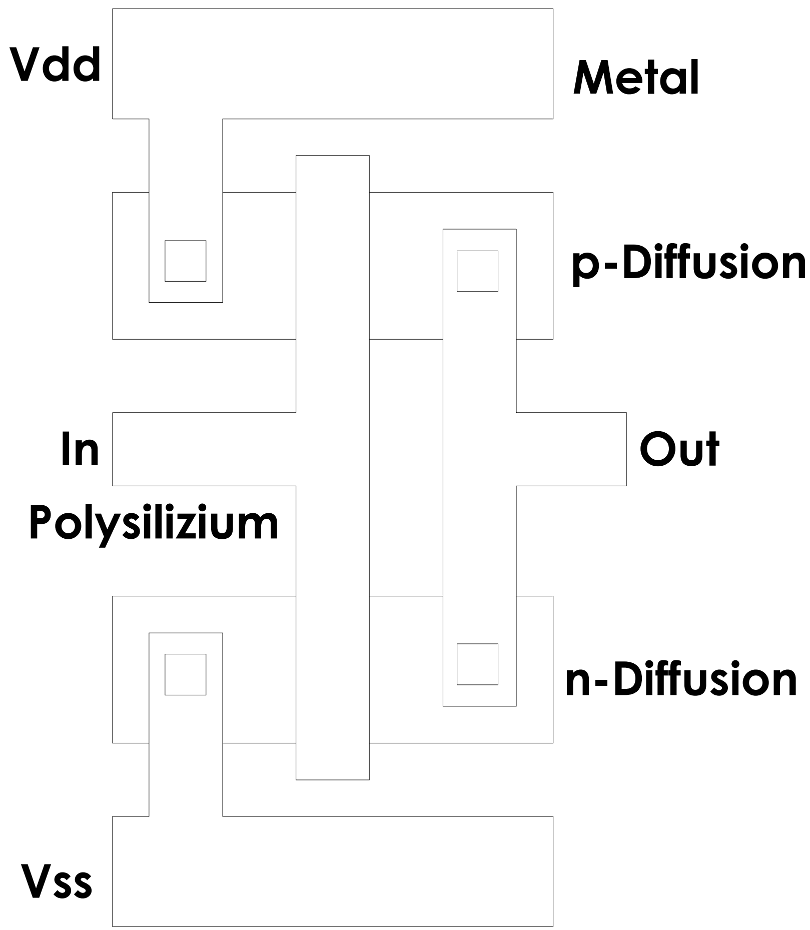
- Bei ASIC-Layouts
  - Grundlage für erfolgreiche Fertigbarkeit
  - Von „Technologen“ erarbeitet

Symbolisches Layout

- Kein vollständiges Layout
  - Keine absoluten geometrischen Angaben
- Stattdessen
  - *Symbole* für Elemente
    - Transistoren, Kontakte
  - Für Elemente noch variabel
    - Länge, Breite, Layer
  - Einige Angaben fehlen vollständig
    - n- und p-Wells (irrelevant für Funktionalität)
      - Automatisch berechenbar

Symbolisches Layout





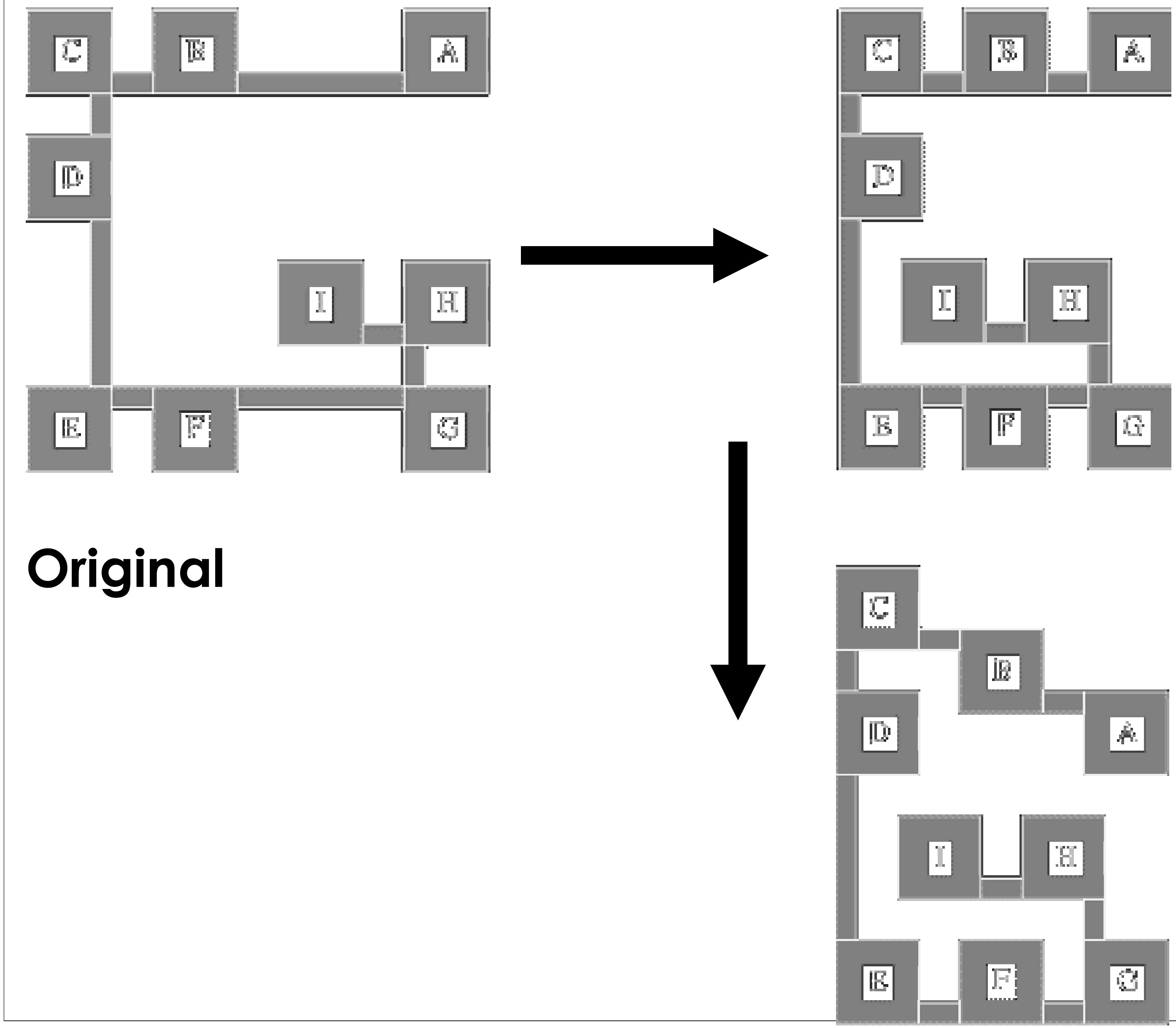
Kompaktierung

- Komprimieren/Expandieren von Layouts
  - Unter Beachtung der Design-Rules
- Anwendungsgebiete
  - Layout-Compilierung
    - Von symbolischen in geometrische Layouts
  - Flächenminimierung
    - Von bestehenden Layouts
  - Korrektur
    - Entfernung von Entwurfsregelverletzungen
  - Skalierung
    - Portierung eines Layouts auf andere Technologie

Vorgehensweise

- Eindimensional (1D)
  - Nur eine Richtung bearbeitet
    - Operationen: Bewegen, Stauchen
  - Oft abwechselnd in X, Y Richtungen
- Zweidimensional (2D)
  - Beide Richtungen simultan bearbeiten
- Problem
  - 1D ist effizient machbar, aber suboptimal
  - 2D liefert optimale Lösung, ist aber NP-hart

Kompaktierung 1

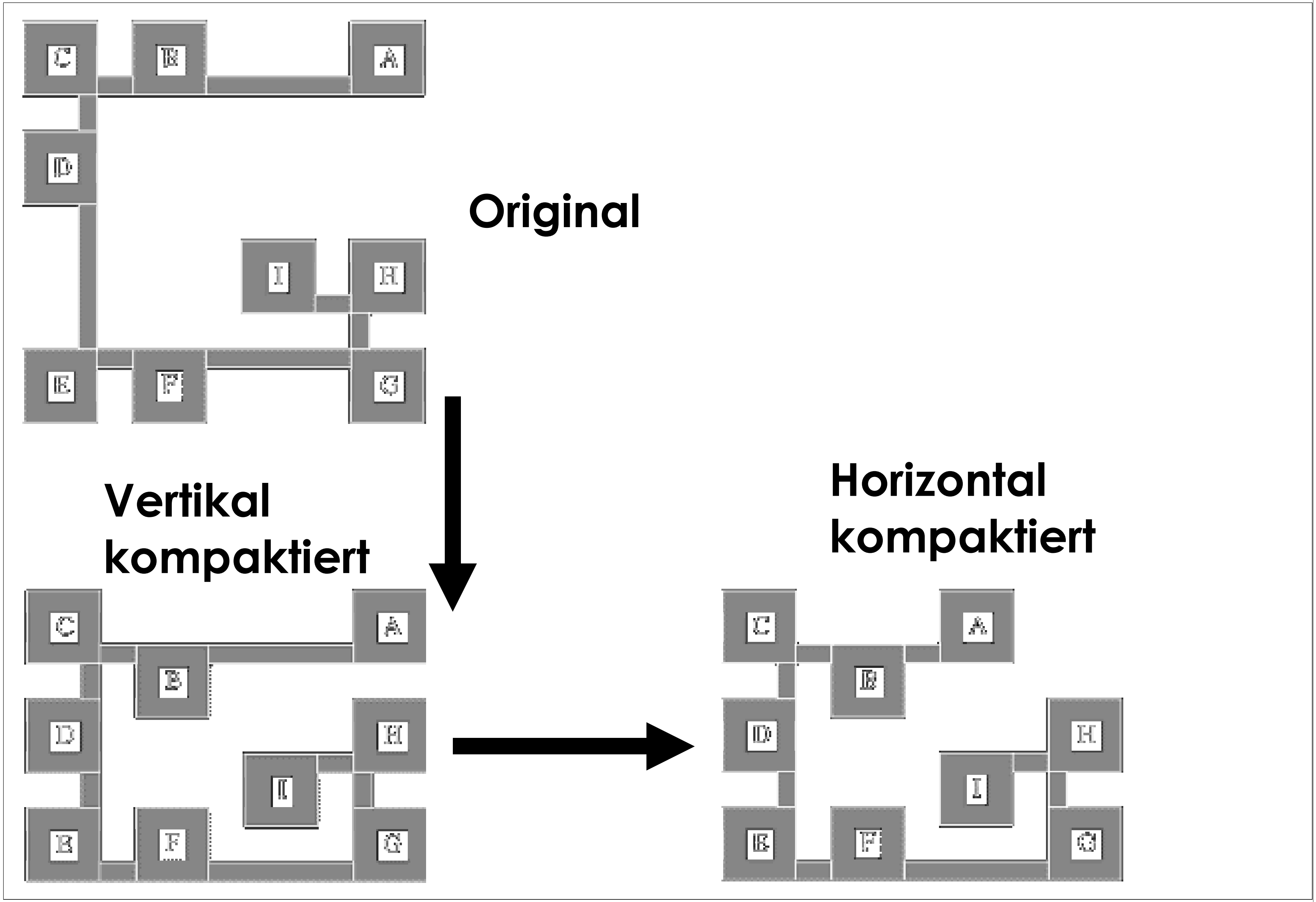


Original

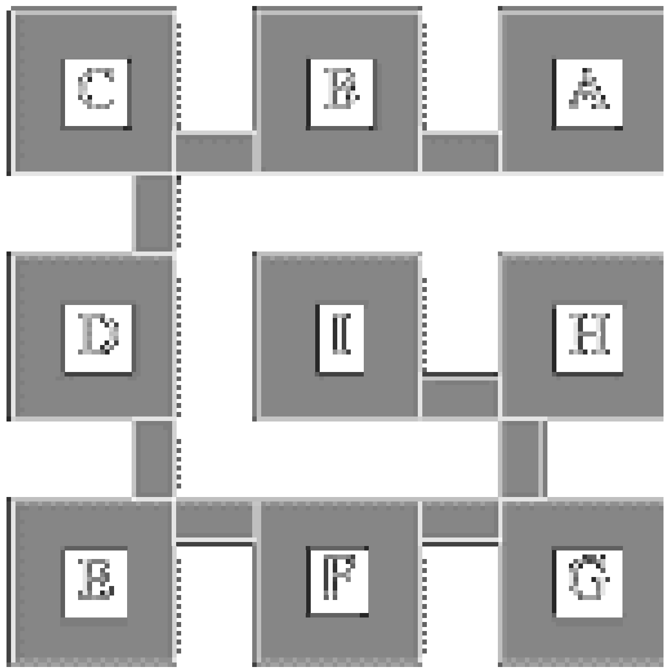
Horizontal kompaktiert

Vertikal kompaktiert

Kompaktierung 2

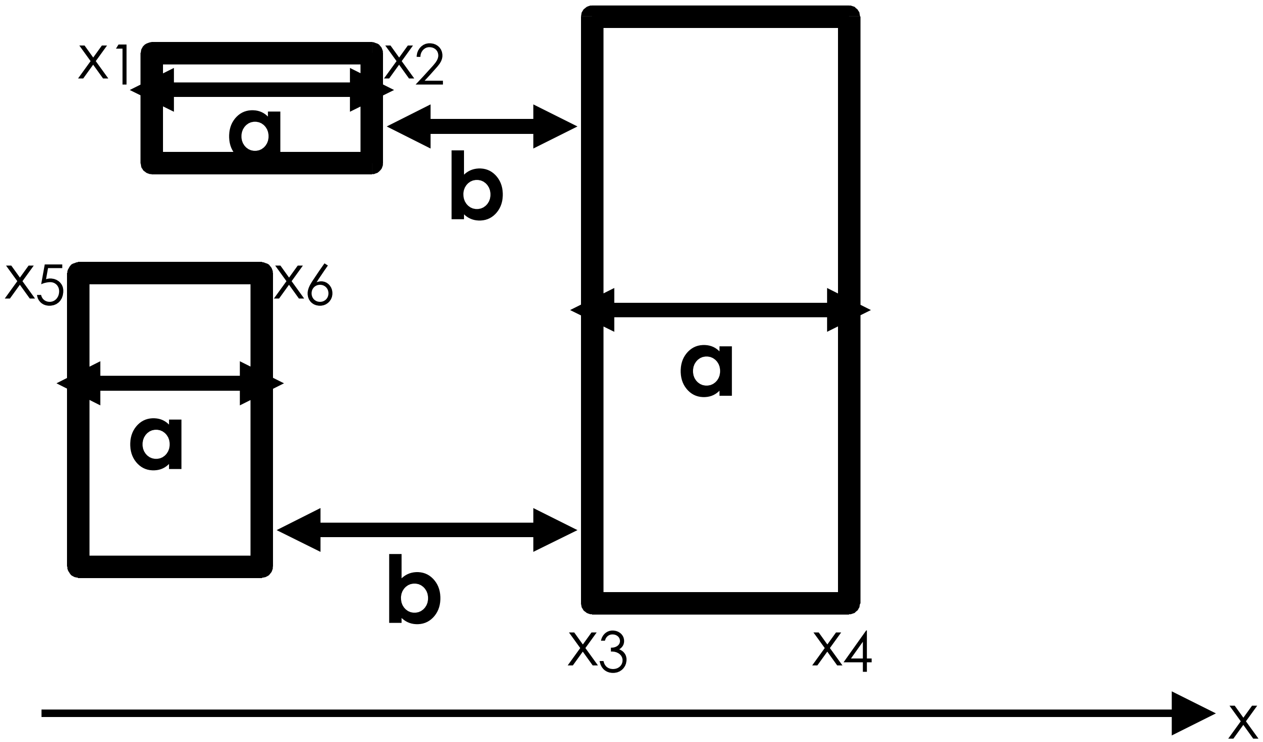


Kompaktierung 3



- 2D Kompaktierung
  - Findet optimale Lsg.
  - NP-vollständig
- Vorgehensweise
  - Mehrfache 1D-K
  - Wechselnd in H, V
  - Aber: nicht optimal

Modellierung 1



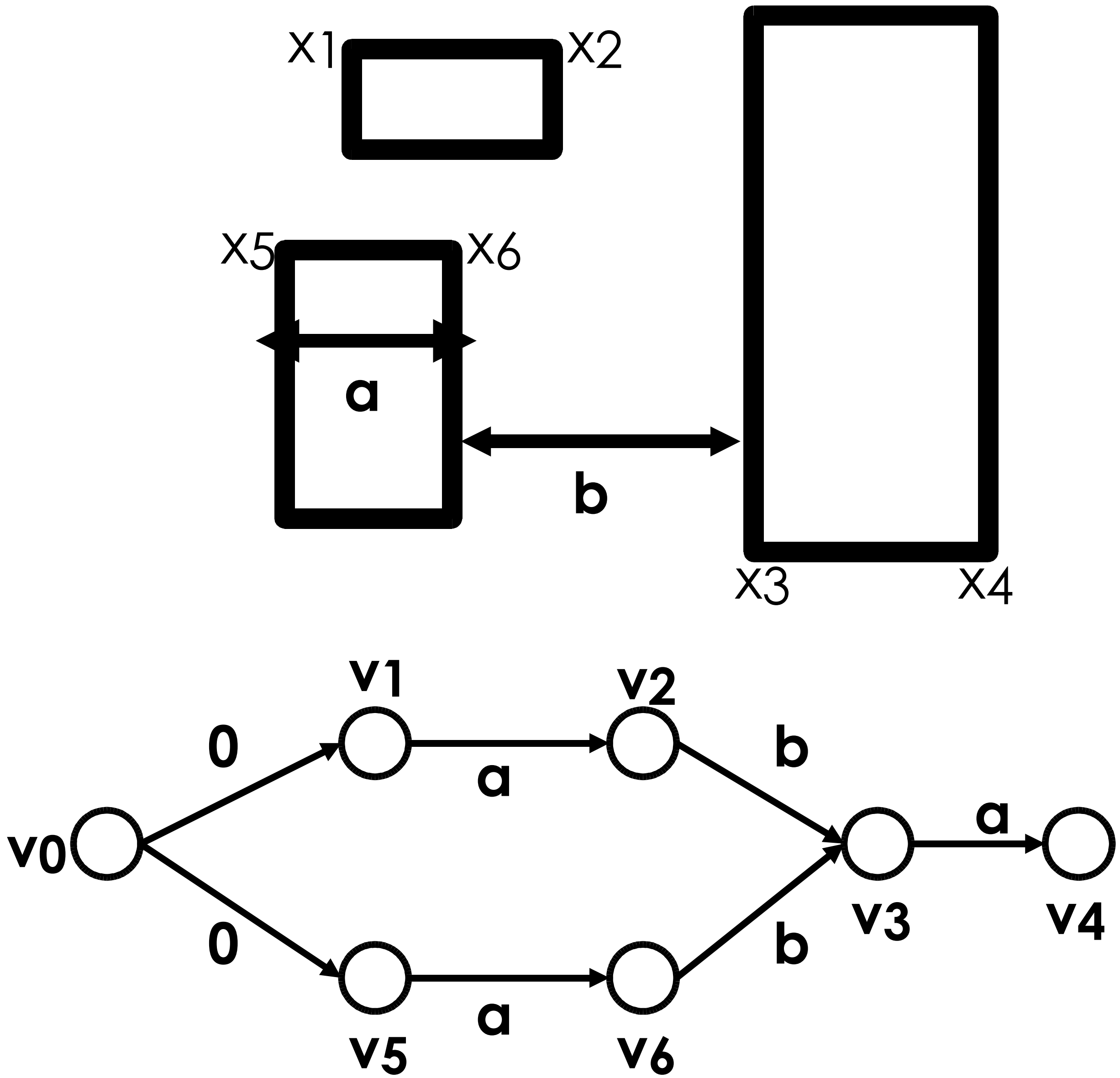
$$x_2 - x_1 \geq a$$

$$x_3 - x_2 \geq b$$

$$x_3 - x_6 \geq b$$

$$x_j - x_i \geq d_{ij}$$

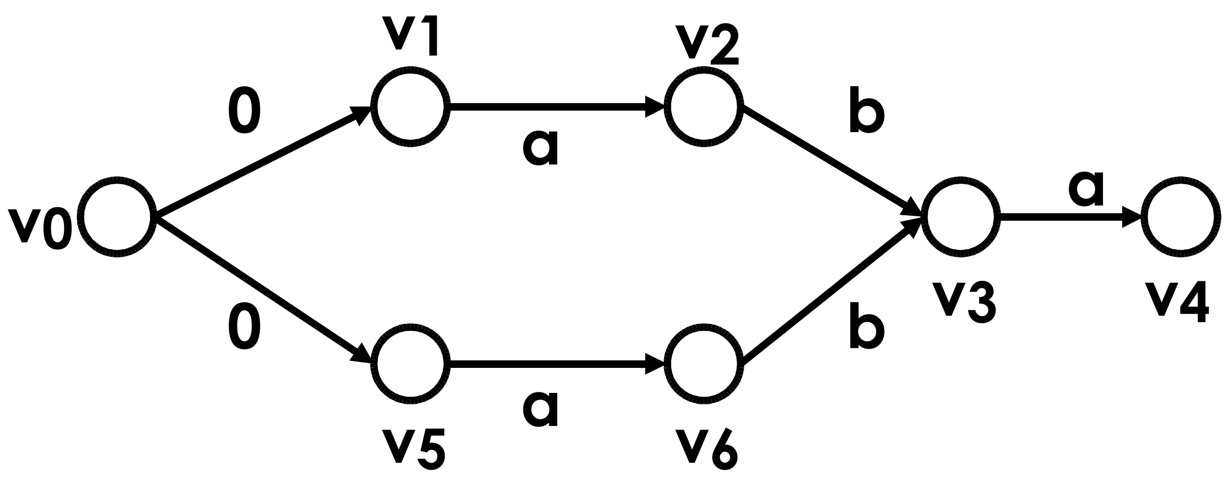
Modellierung 2



Modellierung 3

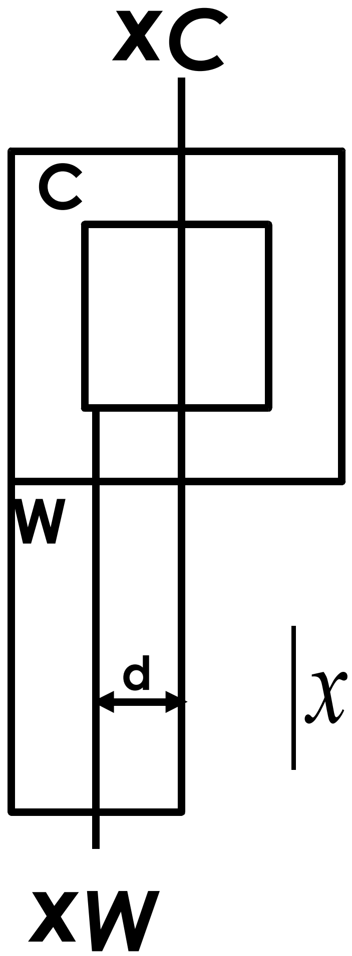
- Einschränkungsgraph $G(V, E)$
  - Gerichtet von (v_i, v_j)
  - Zyklenfrei
- Längster Pfad von v_0 zu v_i

  → Minimale Koordinate von x_i



Modellierung 4

- Bedingungen an *maximalen* Abstand



$$\left|x_C - x_W\right| \leq d$$

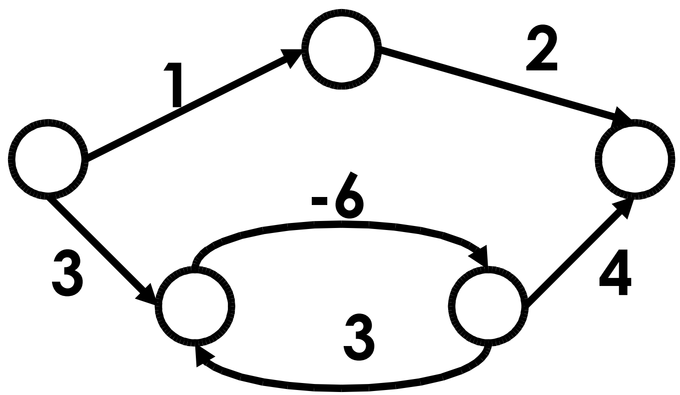
Modellierung 5

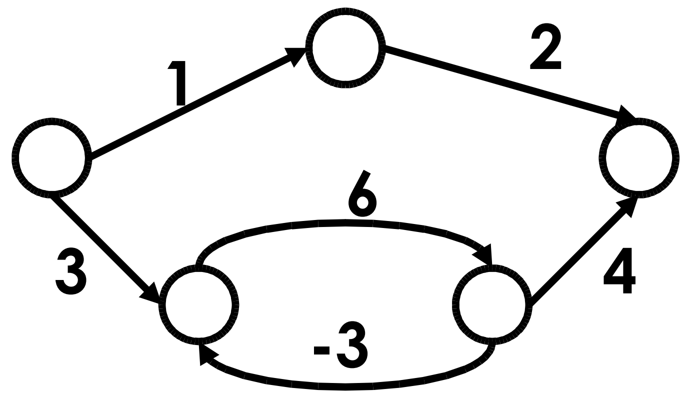
- $|x_C - x_W| \leq d$
  - $x_j - x_i \leq c_{ij}$, $c_{ij} \geq 0$
  - $x_i - x_j \geq -c_{ij}$
- **Passende Form für Einschränkungsgraph**
  - Jetzt aber Richtung *(v_j, v_i)*: Zyklen möglich!

- **Aufgabe:**
  - Berechnung des längsten Pfades in Graphen mit Zyklen

Längster Pfad

- ■ Zyklenfreie Graphen
  - OK, ähnlich BFS
- ■ Graphen mit Zyklen
  - Ohne positiven Zyklus: OK
  - Mit positivem Zyklus: Undefiniert
    - ◆ Kompaktierung: Überbeschränktes Layout





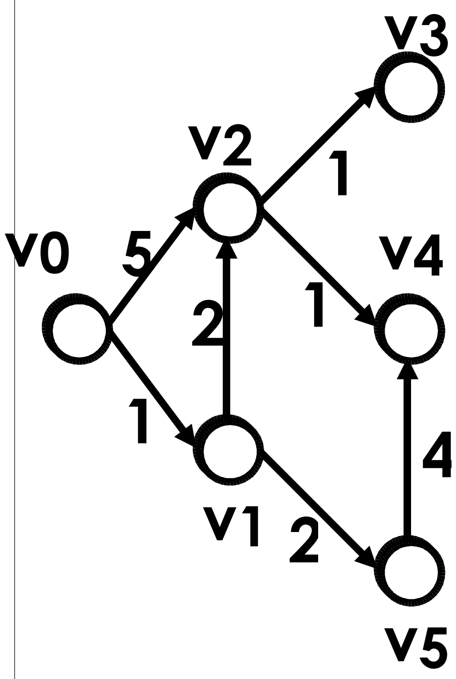
Zyklenfreie Graphen 1

```
main() {
   for (i:=0; i ≤ n; ++i)
       xi := 0;
   longest_path(G);
}
```

- **Directed Acylic Graph (DAG)**
- **Längster, gerichteter, einfacher Pfad (*trail*)**

```
longest_path(G) {
   for (i:=1; i ≤ n; ++i)
       pi := vi.indegree();
   set Q := {v0};
   while (Q ≠ Ø) {
       vi := Q.pickany();
       Q := Q \ {vi};
       foreach (vi, vj) ∈ E {
           xj := max(xj, xi + dij);
           --pj;
           if (pj ≤ 0)
               Q := Q ∪ {vj};
       }
   }
}
```

Zyklenfreie Graphen 2



Q	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
nil	1	2	1	2	1	0	0	0	0	0
{v0}	0	1	1	2	1	1	5	0	0	0
{v1}	0	0	1	2	0	1	5	0	0	3
{v2,v5}	0	0	0	1	0	1	5	6	6	3
{v3,v5}	0	0	0	1	0	1	5	6	6	3
{v5}	0	0	0	0	0	1	5	6	7	3
{v4}	0	0	0	0	0	1	5	6	7	3

Graphen mit Zyklen

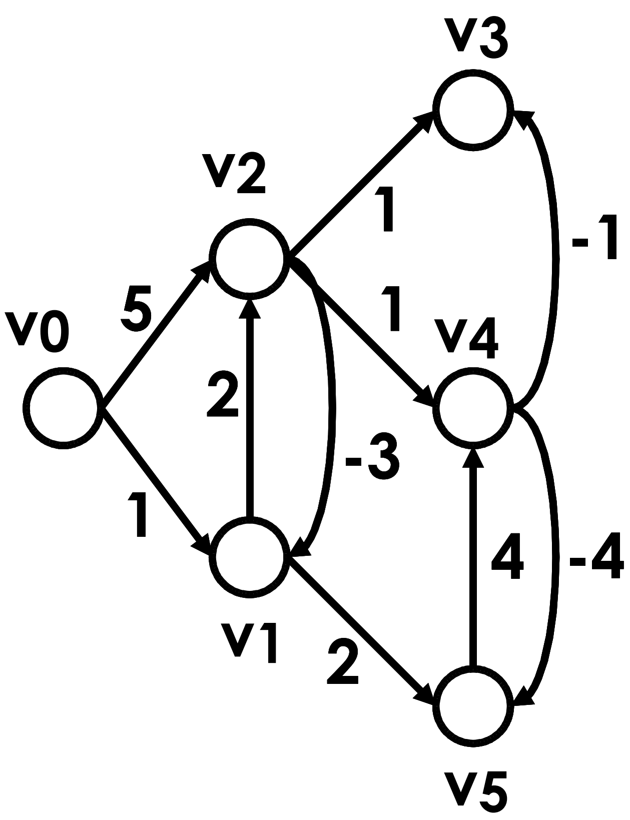
- Nur mit *negativen* Zyklen
- Erkenne positive Zyklen
  - Überbeschränkte Layouts
- Aber lokalisiere sie nicht

Längster Pfad mit Liao-Wong 1

```
count := 0;
for (i:=1; i ≤ n; ++i)
  xi := -∞;
x0 := 0;
do {
  is_modified := false;
  longest_path(Gf);
  foreach (vi, vj) ∈ Eb
     if (xj < xi + dij) {
        xj := xi + dij;
        is_modified := true;
     }
  ++count;
  if (count > |Eb| && is_modified)
     error("positive cycle!");
} while (is_modified);
```

- **Idee:**
  - **Trennen zwischen**
    - **E_f: min. Distanz**
    - **E_b: max. Distanz**
      - **Erzeugen Zyklen!**
  - **Berechne LP $G_f(V, E_f)$**
  - **Korrigiere für E_b**
    - **Schließen Zyklen**
  - **Stabilisiert sich in $|E_b|$**
    - **Jedes e_b nur 1x in Pfad**
  - **sonst überbeschränkt**

Längster Pfad mit Liao-Wong 2



Schritt	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Init.	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$
Vor 1	1	5	6	7	3
Zurück 1	2	5	6	7	3
Vor 2	2	5	6	8	4
Zurück 2	2	5	7	8	4
Vor 3	2	5	7	8	4
Zurück 3	2	5	7	8	4

- Verbesserung: longest_path(G_f) bemerkt Änderung
- $O(|E_f| \times |E_b|)$

LP mit Bellman-Ford 1

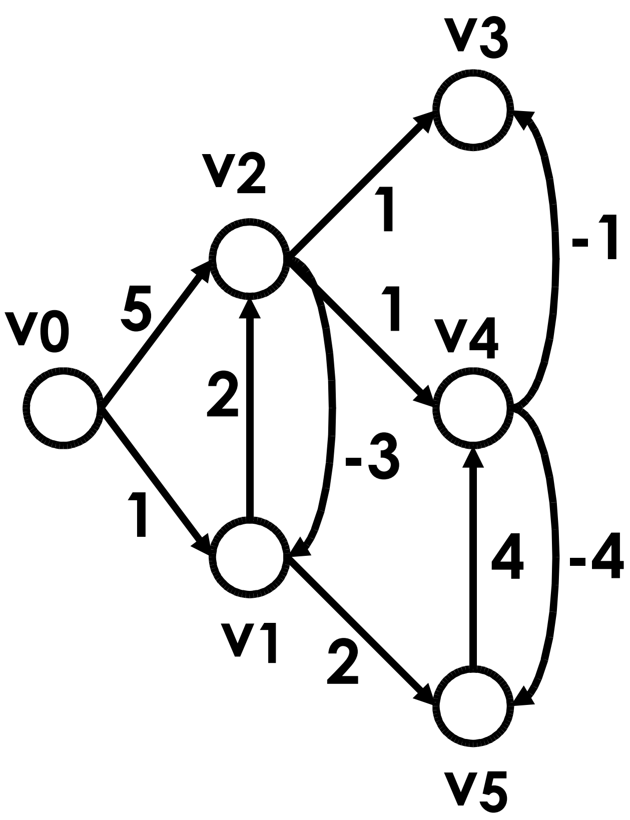
- Kein Unterschied zwischen E_f und E_b
- Vergleichbar azyklischem LP
  - Aber mehrere Durchläufe durch Graph

LP mit Bellman-Ford 2

```
for (i:=1; i ≤ n; ++i)
    xi := -∞;
x0 := 0;
count := 0;
S1 := {v0};
S2 := Ø;
while (count ≤ n && S1 ≠ Ø) {
    foreach vi ∈ S1
        foreach (vi, vj) ∈ E
            if (xj < xi + dij) {
                xj := xi + dij;
                S2 := S2 ∪ {vj};
            }
    S1 := S2;
    S2 := Ø;
    ++count;
}
if (count > n) error("positive cycle!");
```

- **Idee:**
  - **Zwei Wellenfronten**
    - **S_1: aktuelle**
    - **S_2: nächste Iteration**
  - **Zyklendetektion**
    - ***k*-te Iteration**
    - ➢ **LP durch *k*-1 Knoten**
    - **LP hat max. *n* Knoten**
    - ➔ **Falls mehr Iterationen**
      - **Zyklus!**
  - **$O(n^3)$, avg. $O(n^{1.5})$**

LP mit Bellman-Ford 3

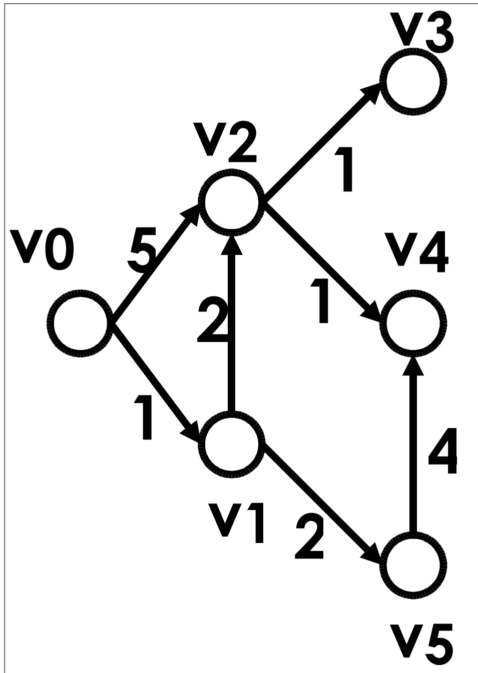


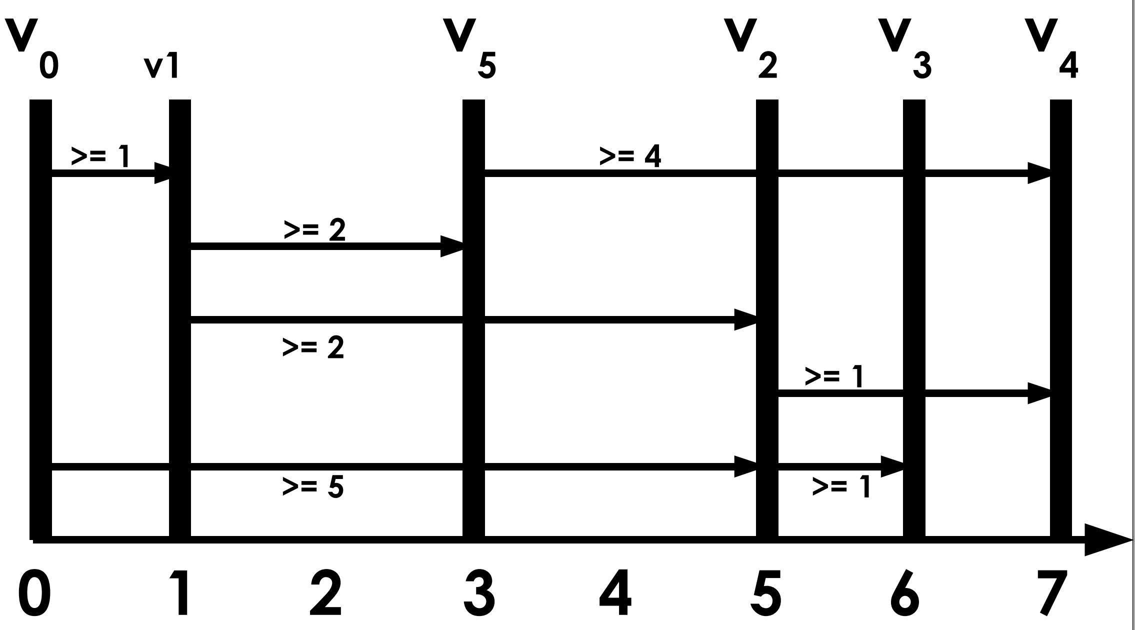
S_1	x1	x2	x3	x4	x5
nil	-∞	-∞	-∞	-∞	-∞
{v0}	1	5	-∞	-∞	-∞
{v1,v2}	2	5	6	6	3
{v1,v3,v4,v5}	2	5	6	7	4
{v4,v5}	2	5	6	8	4
{v4}	2	5	7	8	4
{v3}	2	5	7	8	4

Übersicht Pfad-Algorithmen

- LP wird SP bei Multiplikation der c_{ij} mit -1
- Gerichtete zyklenfreie Graphen (DAGs)
  - SP und LP lösbar in linearer Zeit
- Gerichtete Graphen mit Zyklen
  - Alle Gewichte positiv
    - SP in P, LP ist NP-vollständig
  - Alle Gewichte negativ
    - LP in P, SP ist NP-vollständig
  - Keine positiven Zyklen: LP in P
  - Keine negativen Zyklen: SP in P
  - Sonst: NP-vollständig

Kritische ./. Unkritische Elemente



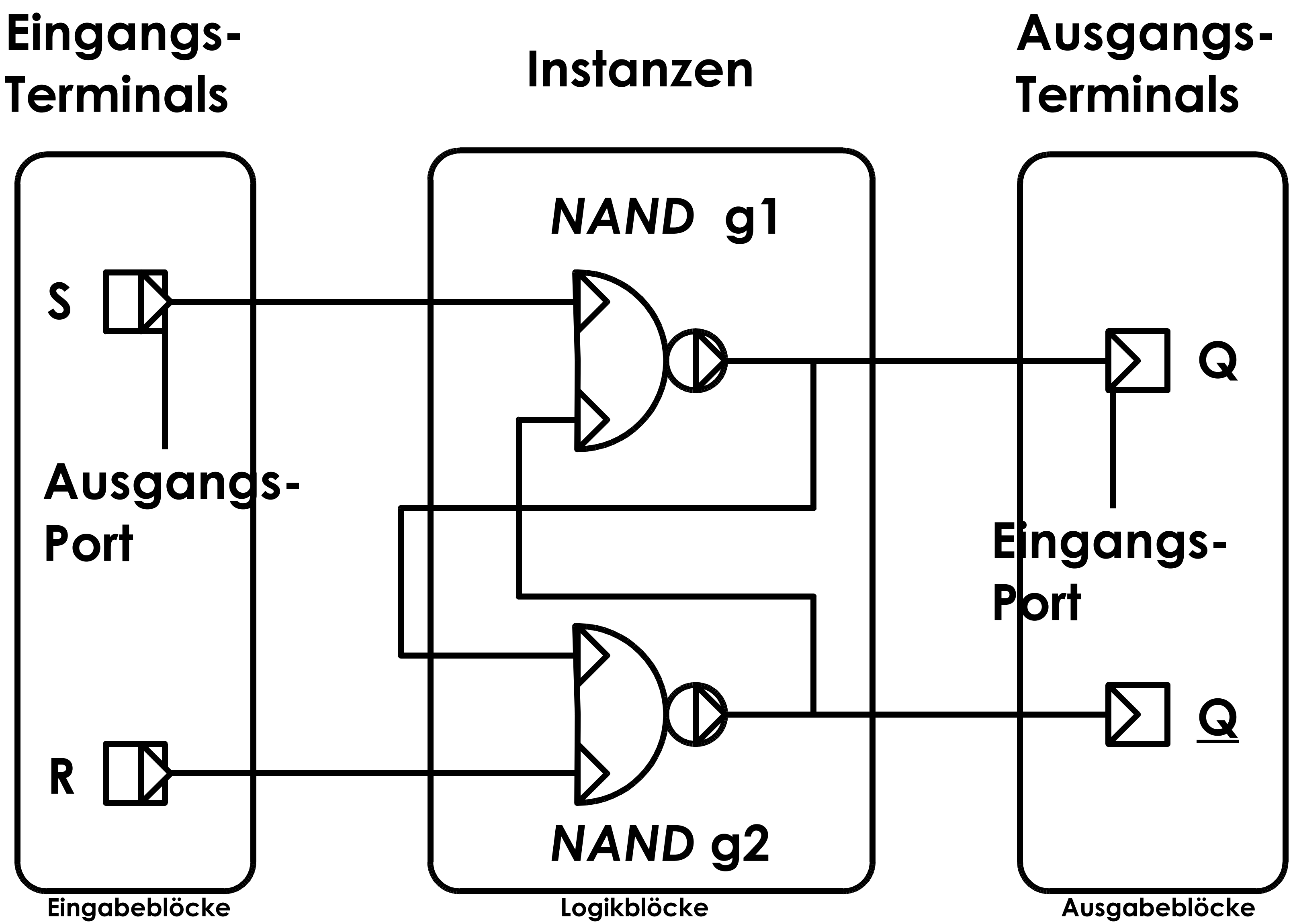


- **Layout-Breite**
  - Hängt nur von kritischen Elementen ab
- **Unkritische Elemente: Verschiebbar**
  - Beeinflussen aber weitere Iterationen

Kompaktierungsdetails

- Freie Layoutelemente
  - Optimale Lösung ist 2D-Kompaktierung
- Einfügen von Jogs (Knicke in Leitungen)
- Berechnung der Einschränkungen
  - Einfacher n^2-Ansatz: Redundanzen
- Hierarchisches Vorgehen

Darstellung von Schaltungen 1



Darstellung von Schaltungen 2

- Instanz oder Zelle
  - Ein Auftreten einer Master-Zelle
  - Speichert Instanz-spezifische Eigenschaften
    - z.B. Name
- Master-Zelle
  - Speichert Eigenschaften aller Instanzen
    - z.B. Funktion, Ports, Layout, ...
- Netz
  - Verbindung von mehreren Ports
- Port
  - Anschlusspunkt von Leitung an Zelle
  - I.d.R. nicht untereinander austauschbar
  - Hierarchie: Terminals werden zu Ports

Darstellung von Schaltungen 3

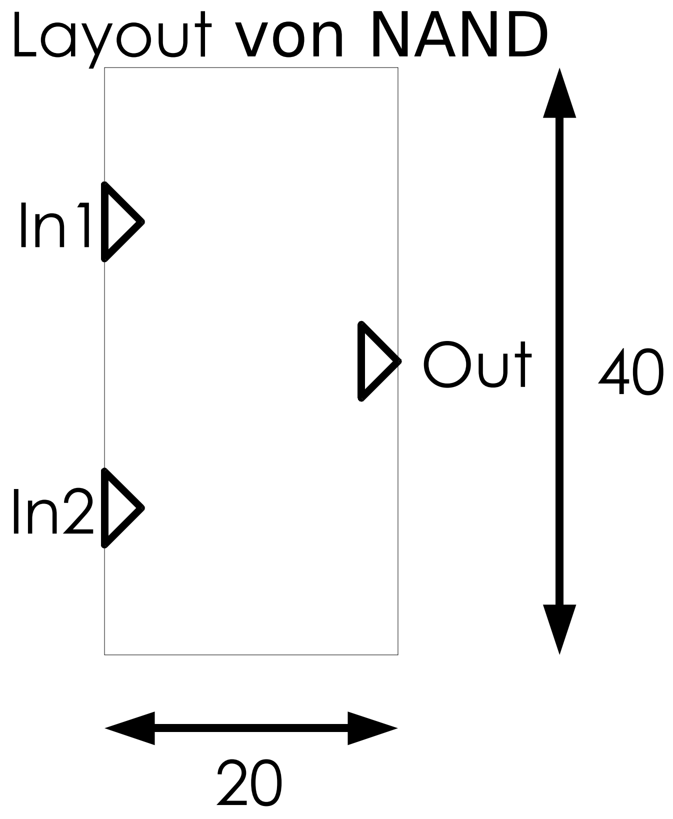
```
class cell_master {
  String name;
  truth_table func;
  Rect extent;
  set<port_master> ins, outs;
  ...
};

class cell {
  cell_master master;
  String name;
  set<port> ins, outs;
  ...
};
```

```
class net {
  String name;
  set<port> joined;
}
```

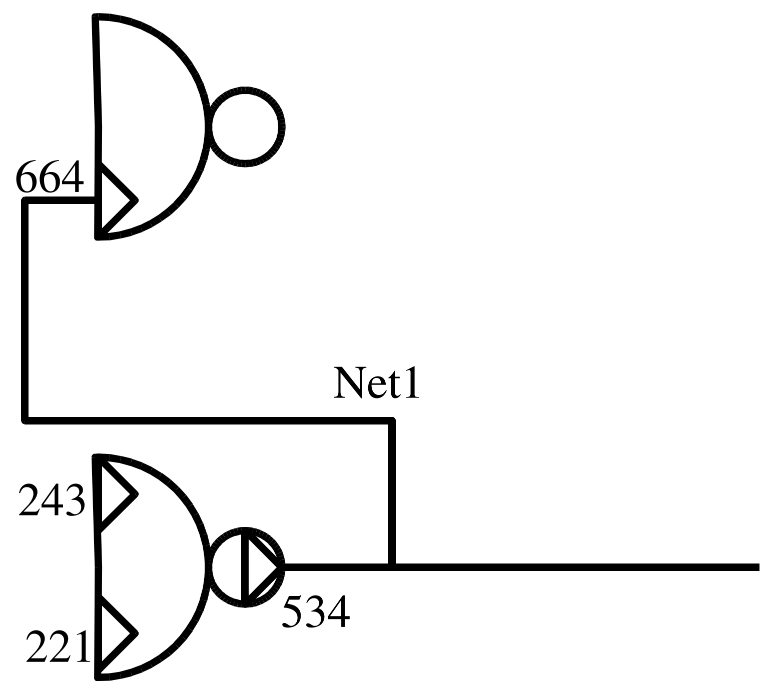
```
class port_master {
  String name;
  Point location;
  ...
}

class port {
  port_master master;
  String id;
  cell parent;
  net connects;
  ...
}
```

Darstellung von Schaltungen 4

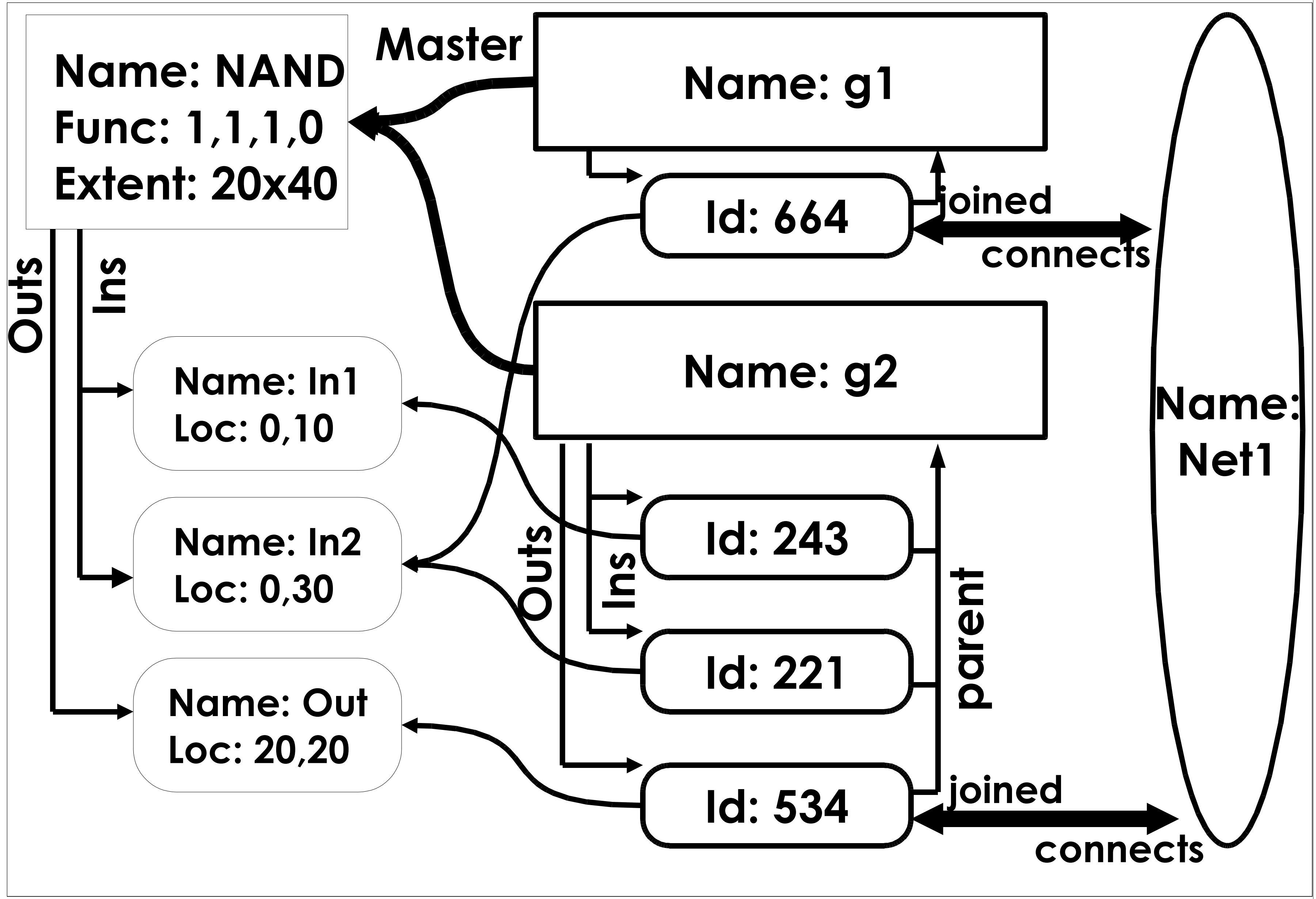
Master



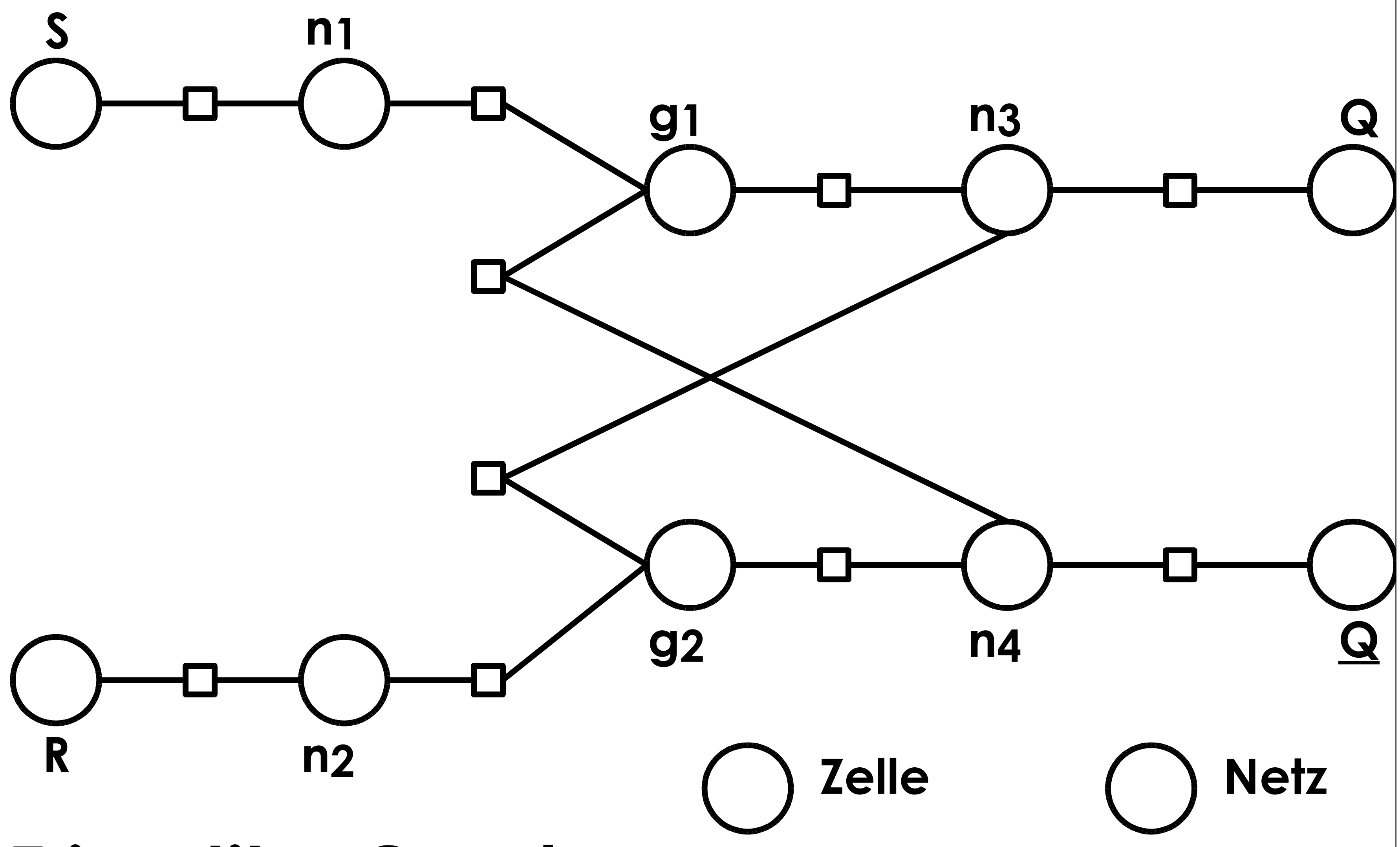
Schaltungsfragment



Darstellung von Schaltungen 5

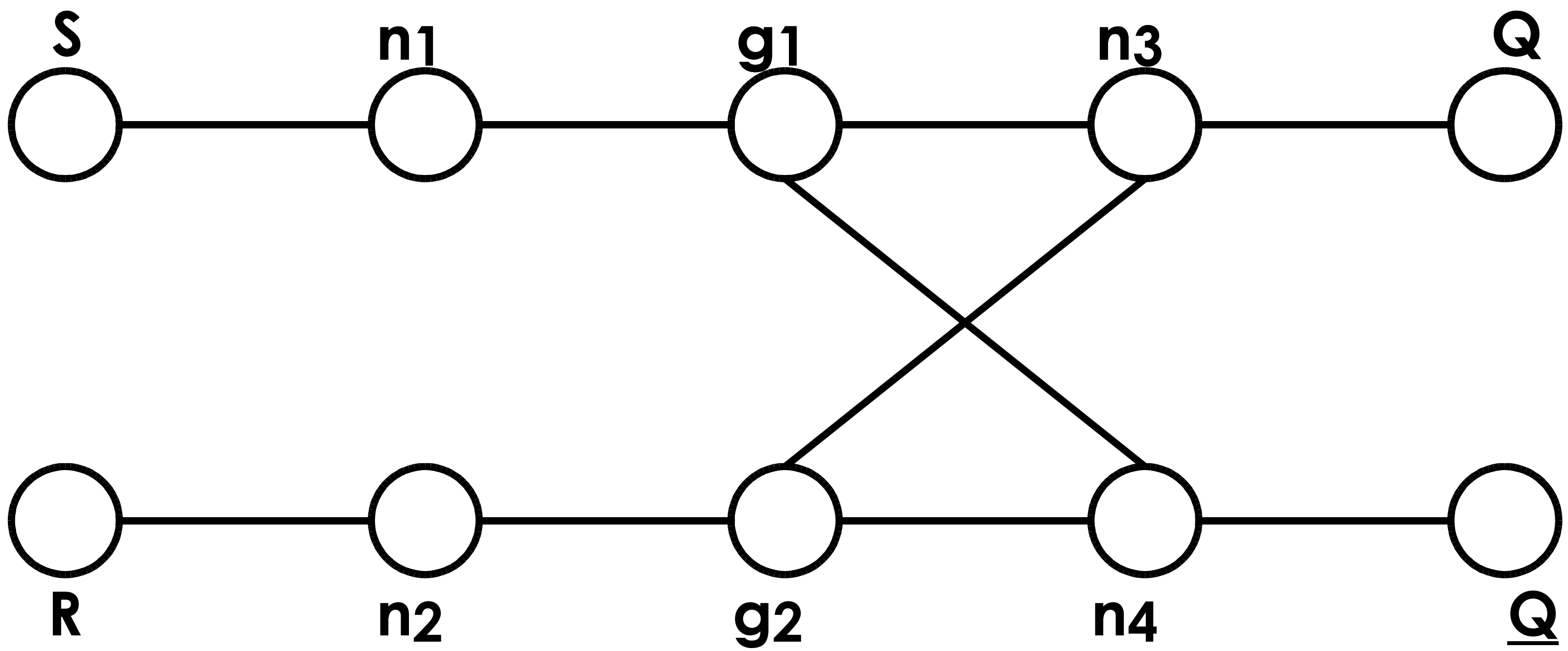


Schaltungen als Graphen 1

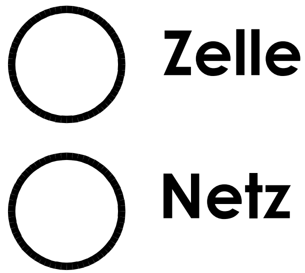


Tripartiter Graph

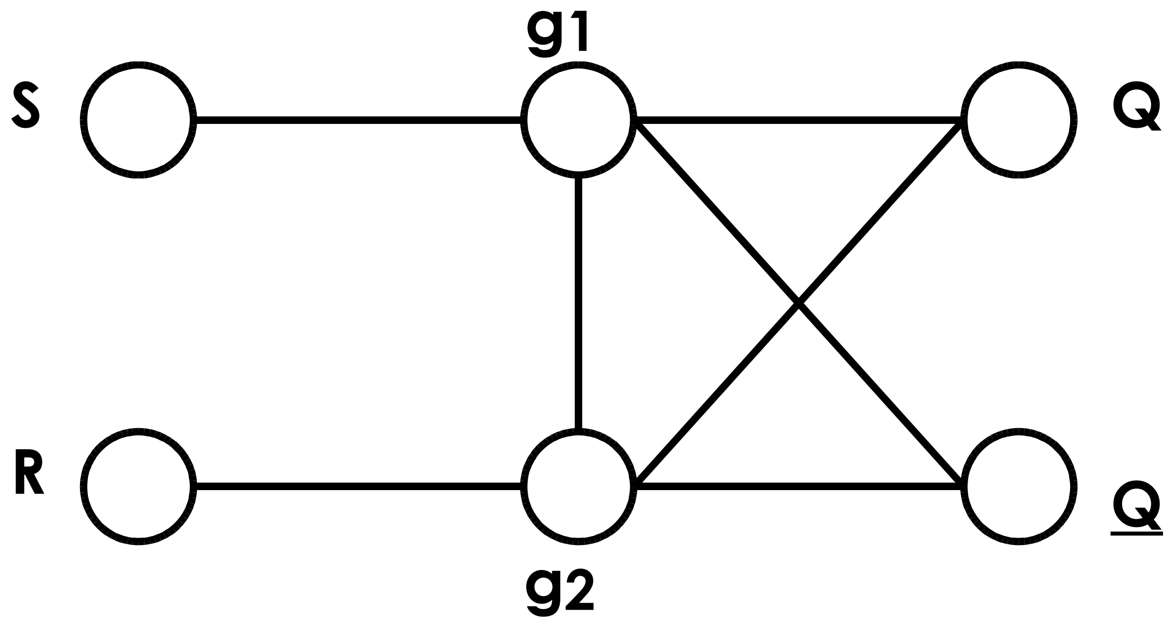
Schaltungen als Graphen 2

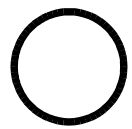


- **Bipartiter Graph**
  - **Weniger Details**
  - **Verschmelze Ports mit Zellen**
  - **Äquivalent zu *Hypergraph***



Schaltungen als Graphen 3





- **Cliquen-Modell**
  - Netze nicht mehr explizit modelliert
  - Zellen an Netzen bilden jetzt Clique

Schaltungsdarstellungen

- Zelle-Port-Netz Modell
- Tripartiter Graph
- Bipartiter Graph
- Clique-Modell

Ungenauer

- Für Problem *passendes* Modell wählen
  - Mehr Daten nicht immer besser
- Konvertierungsroutinen bereitstellen
  - Nur in ungenauere Darstellung möglich
  - Buchführen über Herkunft von Daten

Weiteres Vorgehen

- **Dienstag**
  - Kick-Off für praktische Arbeiten
  - Vorher zu 3er Gruppen zusammenfinden
  - Vorher den Leitfaden <u>lesen</u>
    - ... um gezielt Fragen stellen zu können
- **Nächste Vorlesung: Freitag**
- **Allgemeine Vorbereitung**
  - Buch Kapitel 5.5 - 5.9

Zusammenfassung

- Kompaktierung
- Berechnung der längsten Pfade
  - Ohne und mit Zyklen
- Modellierung von Schaltungen
  - Graphbasiert
  - Hierarchisch