Technische
Universität
Braunschweig

Algorithmen und Datenstrukturen 2 – Übung #5

Reduktionen

Matthias Konitzny

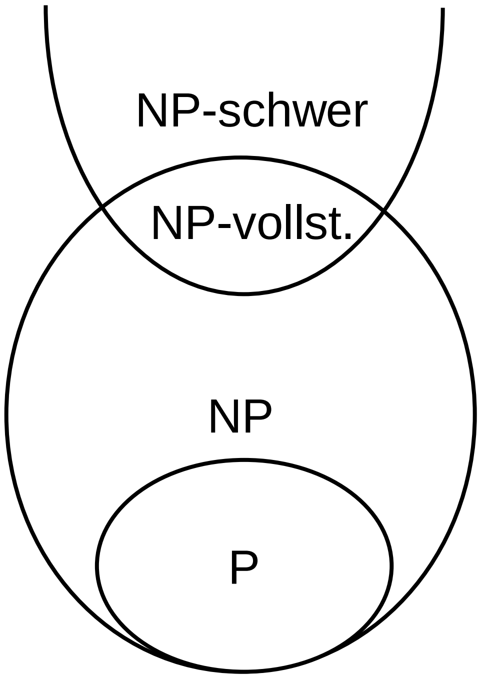
23.06.2021

Heute

Reduktionen

- 3-SAT
- Ungerichtetes Hamiltonkreis Problem
- Gerichtetes Hamiltonkreis Problem
- Traveling Salesman Problem

Komplexitätsklassen



P: Probleme lassen sich effizient lösen.

NP: Lösungen können effizient verifiziert werden.

NP-schwer: Wenn das Problem in P liegt, gilt P=NP.

NP-vollständig: Problem liegt in NP und ist NP-schwer.

NP-Schwere

Etwas genauer:

> Ein Problem Π heißt *NP-schwer*, falls es für jedes Problem $\Pi' \in$ NP eine Polynomialzeit-Reduktion von Π' auf Π existiert.

Um zu zeigen, dass ein Problem NP-schwer ist, reicht es eine Reduktion **von** einem bekannten NP-schweren Problem durchzuführen.

In der Literatur wird öfters auch $\Pi' \leq_p \Pi$ geschrieben.

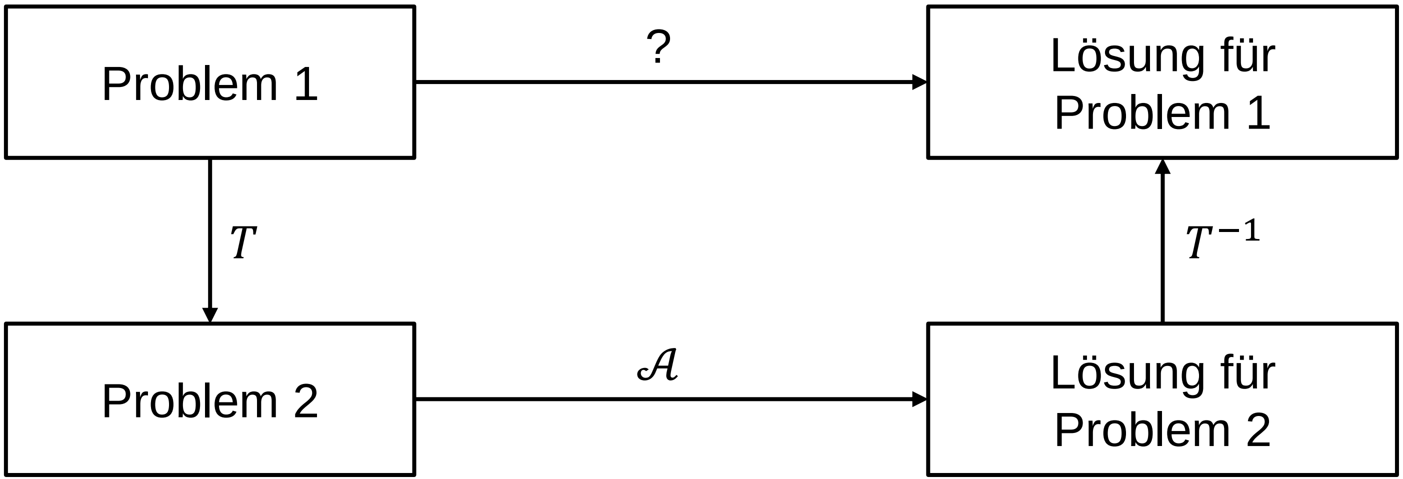
„Π' ist höchstens so schwer wie Π“

Reduktionen

$$
\begin{tikzcd}[column sep=huge, row sep=large]
\boxed{\text{Problem 1}} \arrow[r, "?"] \arrow[d, "T"] & \boxed{\text{Lösung für Problem 1}} \\
\boxed{\text{Problem 2}} \arrow[r, "\mathcal{A}"] & \boxed{\text{Lösung für Problem 2}} \arrow[u, "T^{-1}"']
\end{tikzcd}
$$

Besitzen T, T^{-1} und $\mathcal{A}$ polynomielle Laufzeit,
kann Problem 1 in polynomieller Zeit gelöst werden.

Reduktionen



Ist Problem 1 NP-schwer und besitzen T und T^{-1} polynomielle Laufzeit, dann muss Problem 2 auch NP-schwer sein.

Ein paar Probleme

Ein paar Probleme

3-SAT

$$\varphi = (\overline{x_1} \vee x_2 \vee x_3) \wedge (x_2 \vee \overline{x_3} \vee x_4) \wedge (x_1 \vee \overline{x_2} \vee x_4)$$

Gegeben

Logische Formel φ in konjunktiver Normalform mit

- m Klauseln
- n Variablen
- maximal drei Literalen pro Klausel

Frage

Gibt es eine φ erfüllende Belegung der Variablen?

Ein paar Probleme

3-SAT

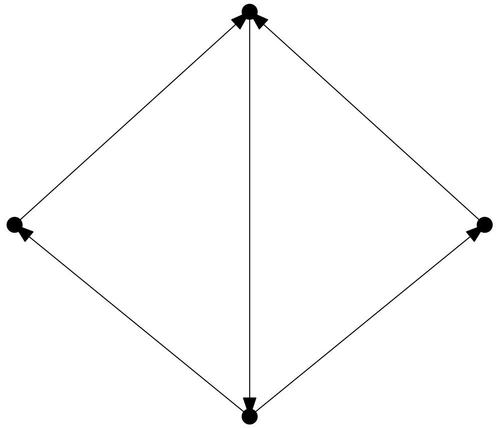
Directed Hamiltonian Cycle DHC

Gegeben

Gerichteter Graph $\mathrm{D} = (V, E)$

Frage

Gibt es einen gerichteten Hamiltonkreis in D?



Ein paar Probleme

3-SAT **DHC**

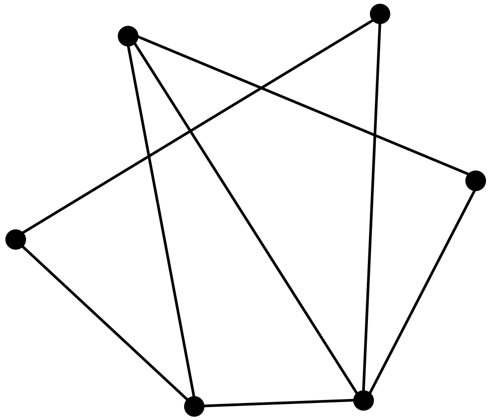
Undirected Hamiltonian Cycle HC

Gegeben

Ungerichteter Graph $\mathrm{G} = (V, E)$

Frage

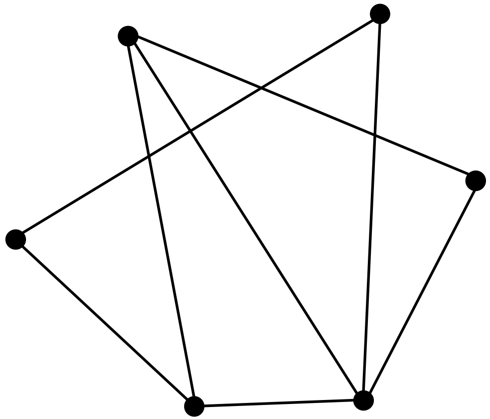
Gibt es einen Hamiltonkreis in G?



Ein paar Probleme

3-SAT **DHC**

Undirected Hamiltonian Cycle HC



Gegeben

Ungerichteter Graph $\mathrm{G} = (V, E)$

Frage

Gibt es einen Hamiltonkreis in G?

Ein paar Probleme

3-SAT **DHC** **HC**

Traveling Salesman Problem TSP

Gegeben

Vollsändiger Graph $\mathrm{G} = (V, E)$ mit Kantenkosten $c: E \rightarrow \mathbb{R}^+$
und eine Zahl $k \in \mathbb{R}^+$

Frage

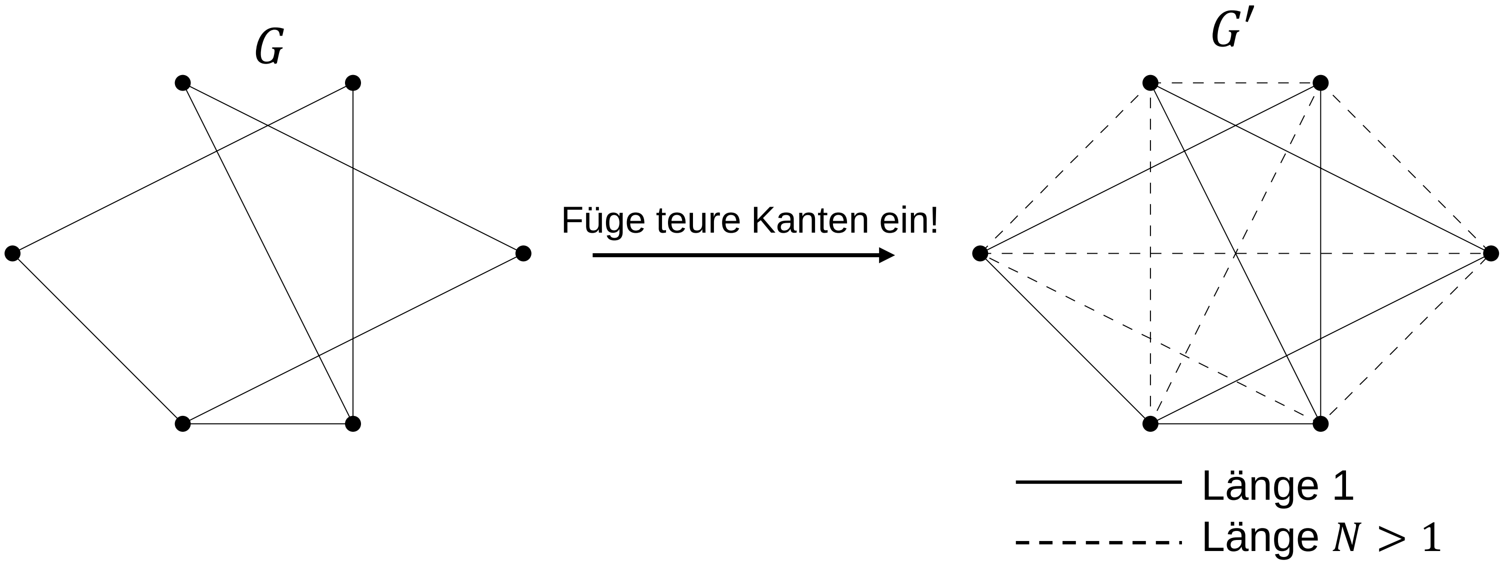
Gibt es eine Tour in G mit Kantenkosten maximal k?

Ein paar Probleme

$$\textbf{3-SAT} \xrightarrow{3} \textbf{DHC} \xrightarrow{2} \textbf{HC} \xrightarrow{1} \textbf{TSP}$$

HC auf TSP

Reduktion von HC auf TSP



Zu zeigen

G besitzt genau dann einen Hamitonkreis, wenn G' eine Tour der Länge $n \coloneqq |V|$ besitzt.

Beweis Korrektheit

„ $\Rightarrow$ “

Wähle die gleichen Kanten von G in G'. Diese haben die Kosten n.

„ $\Leftarrow$ “

Besitzt G keinen Hamiltonkreis, so muss in G' mindestens eine Kante mit Gewicht N benutzt werden. Somit hat die Tour ein Gewicht von mindestens $n - 1 + N > n$, da $N > 1$.

Laufzeit

Es müssen $O(n^2)$ Kanten hinzugefügt werden.

Alle $O(n^2)$ Kanten müssen mit Kosten versehen werden.

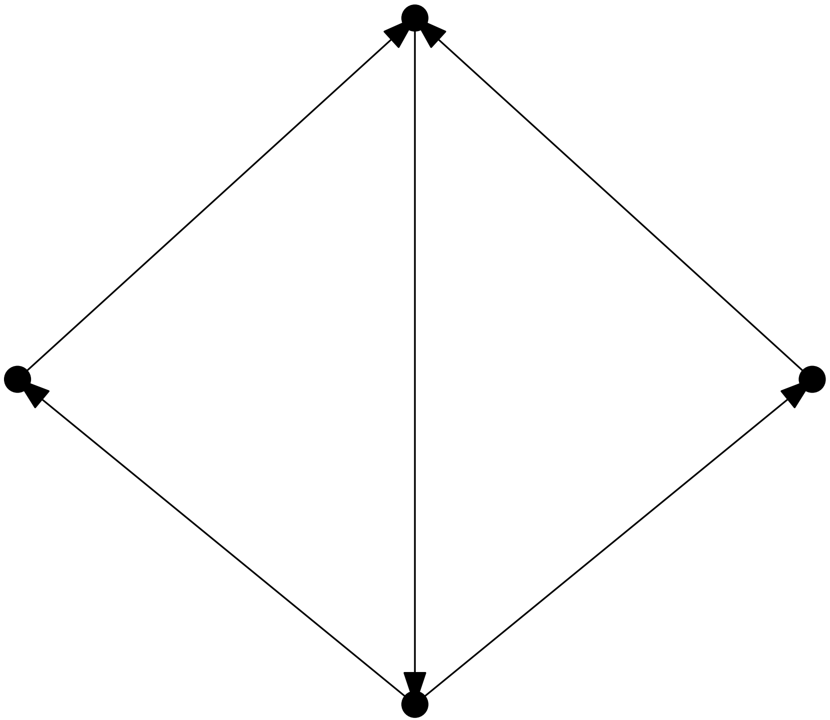
Insgesamt also eine Laufzeit von $O(n^2)$.

Konsequenz

TSP kann nicht approximiert werden

DHC auf HC

Reduktion von DHC auf HC

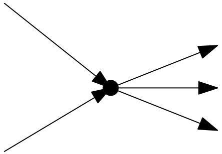


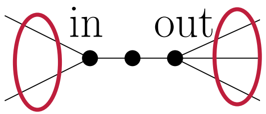
Wie kann man garantieren, dass im ungerichteten Graphen…

…nur eine der ursprünglich *eingehenden* Kanten verwendet wird?

…nur eine der ursprünglich *ausgehenden* Kanten verwendet wird?

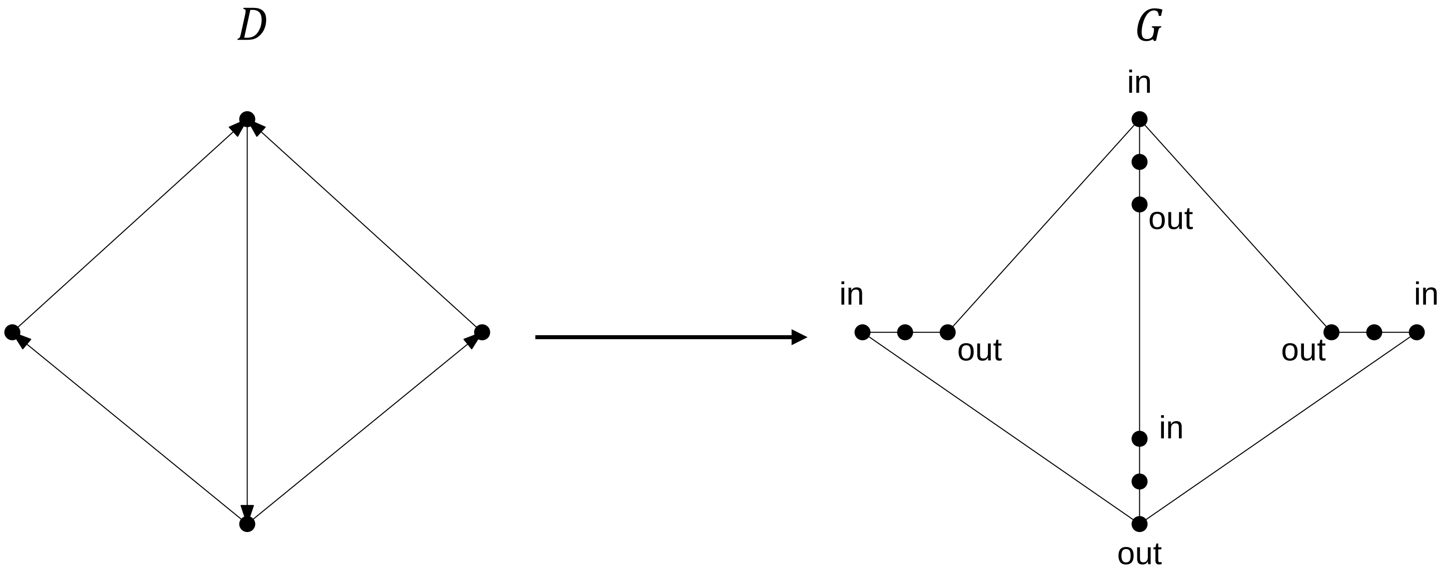
Idee: Teile Knoten auf!





Jeweils nur eine möglich!

Reduktion von DHC auf HC



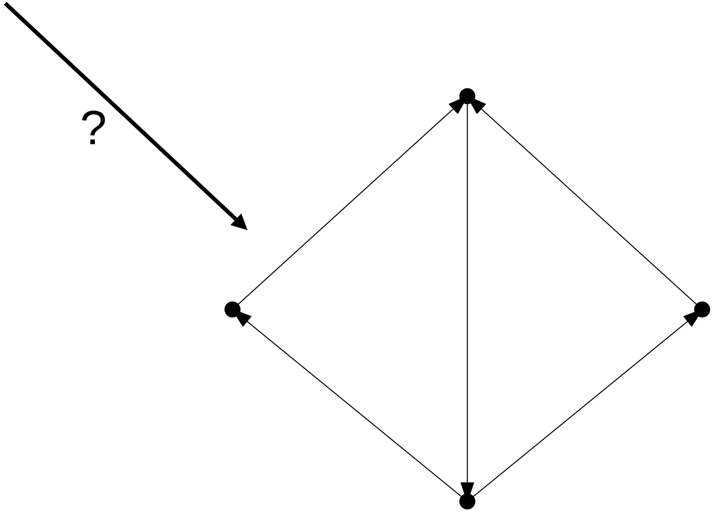
Zu zeigen

D besitzt genau dann einen gerichteten Hamiltonkreis, wenn G einen Hamiltonkreis besitzt.

3SAT auf DHC

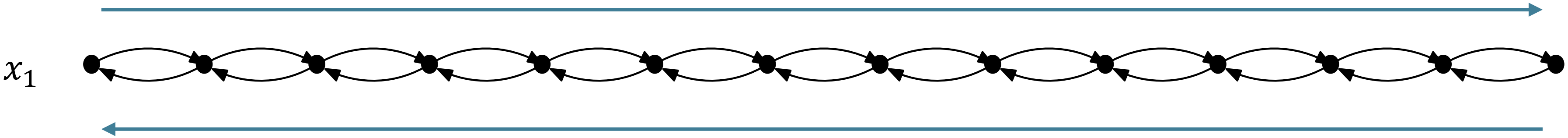
Reduktion 3SAT auf DHC

$$(x_1 \lor x_2 \lor \overline{x_3}) \land (\overline{x_2} \lor x_3 \lor x_4) \land (x_1 \lor \overline{x_2} \lor x_4)$$



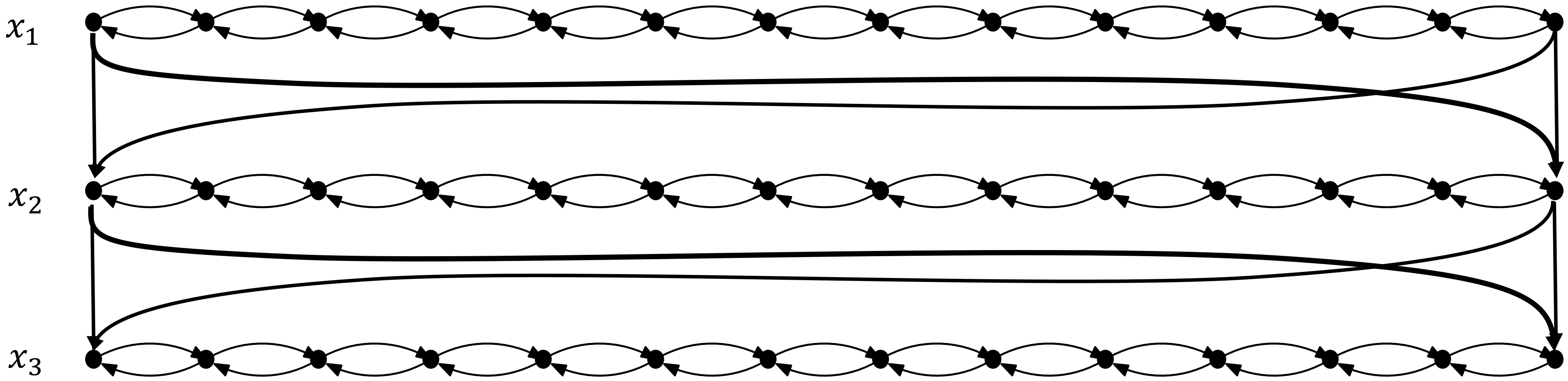
Variablen-Gadgets

„True“

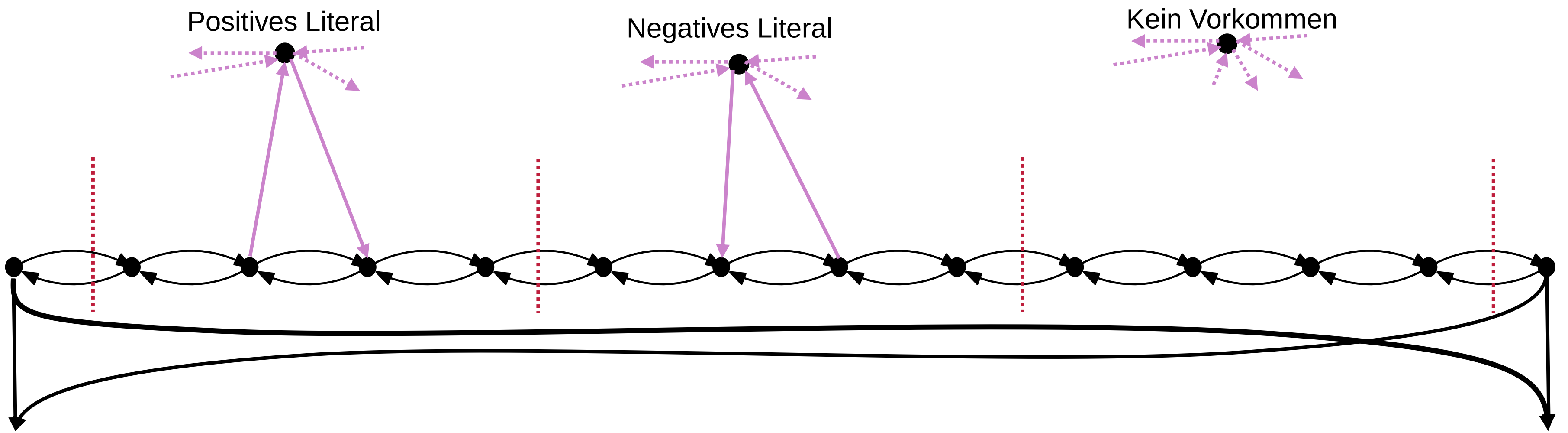


„False“

Variablen-Gadgets

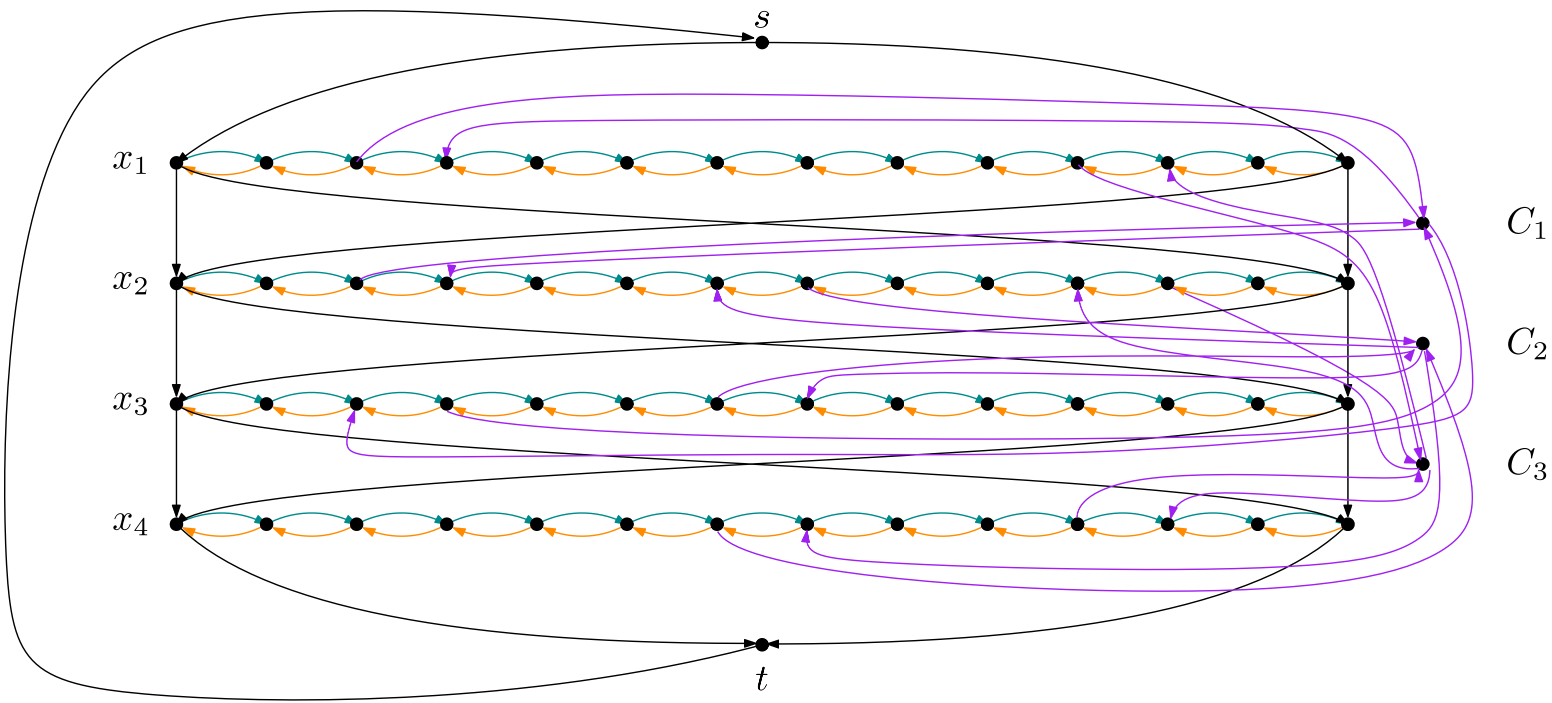


Klausel-Gadgets



Beispiel der Reduktion

$$(x_1 \vee x_2 \vee \overline{x_3}) \wedge (\overline{x_2} \vee x_3 \vee x_4) \wedge (x_1 \vee \overline{x_2} \vee x_4)$$



Korrektheit

„Wenn die Formel erfüllbar ist, dann gibt es einen Hamiltonkreis.“

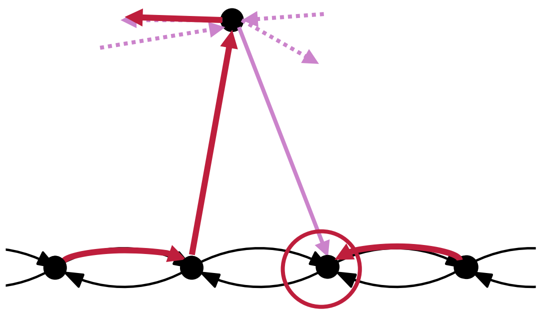
Klar: Laufe die Variablen Gadgets in der richtigen Richtung ab und laufe zwischendurch die Klauseln ab.

„Wenn es einen Hamiltonkreis gibt, dann ist die Formel erfüllbar.“

Dazu müssen wir zeigen:

1. Geht man zu einer Klausel, muss man zur selben Variable zurück.
2. Man darf nur Klauseln ablaufen, wenn die richtige Richtung gewählt wurde.

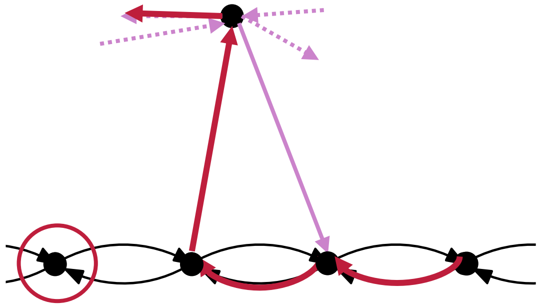
Man muss wieder zurück…



Man kommt nicht mehr weg…

Annahme: Man geht nicht zurück.

Man muss richtig rum laufen…



Man kommt nicht mehr weg…

Annahme: Man läuft Klauseln falsch ab.

Korrektheit

„Wenn es einen Hamiltonkreis gibt, dann ist die Formel erfüllbar.“

Dazu müssen wir zeigen:

1. Geht man zu einer Klausel, muss man zur selben Variable zurück. ✓
2. Man darf nur Klauseln ablaufen, wenn die richtige Richtung gewählt wurde. ✓

Also:

1. Variablen-Gadgets werden in einem Zug durchlaufen
   - Die Richtung gibt uns true oder false
2. Gibt es keine Belegung der Variablen, sodass φ erfüllt wird, so gibt es immer mindestens ein Klausel-Gadget, dass nicht abgelaufen werden kann.
   - Es gibt also keinen Hamiltonkreis.

Laufzeit der Transformation

Wir erstellen einen Graphen mit

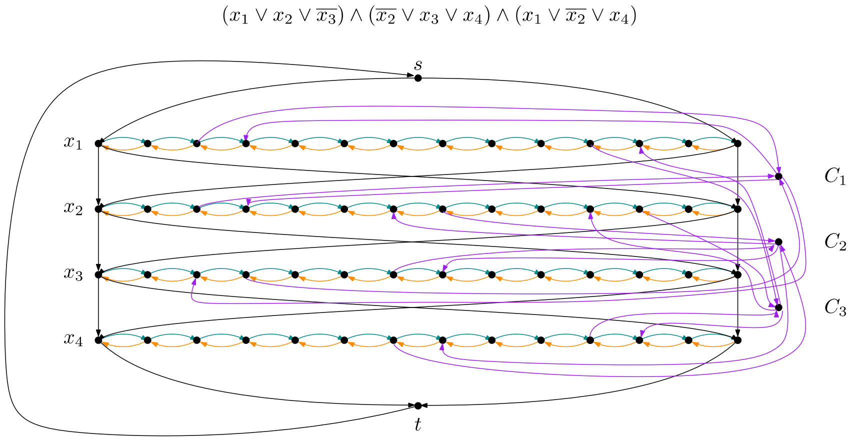
- $m + 4nm + 2n + 2$ Knoten
- $O(nm)$ vielen Kanten

Wir brauchen also $O(nm)$ Zeit, den Graphen zu erstellen.

Lösung für 3SAT berechnen

- O(1)

Uns interessiert nur, **ob** die Formel erfüllbar ist!



Beliebte Fehler

Schritte für einen NP-Schwere Beweis

Um zu zeigen, dass ein Problem Π NP-schwer ist:

- Suche ein geeignetes NP-schweres Problem Π'
- Reduziere **von** Π' **auf** Π
- Beweise Korrektheit:

  „Für jede Instanz $I_{\Pi'}$ von Π' gibt es genau dann eine Lösung, wenn die Instanz $T(I_{\Pi'})$ von Π eine Lösung gibt.“

- Beweise polynomielle Laufzeit von T und T^{-1}.

Beliebte Fehler:

- Nur für ein Beispiel gezeigt.
- Reduktion falsch herum.
- Im Korrektheitsbeweis nur eine Richtung gezeigt.
- Laufzeit der Transformation nicht berücksichtigt.
- Codierungsgröße von $T(I_{\Pi'})$ ist nicht polynomiell durch die Größe von $I_{\Pi'}$ beschränkt.