

11c

 **\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE,
INDEPENDENT-SET und VERTEX-COVER**

Prof. Dr. Jasmin Blanchette

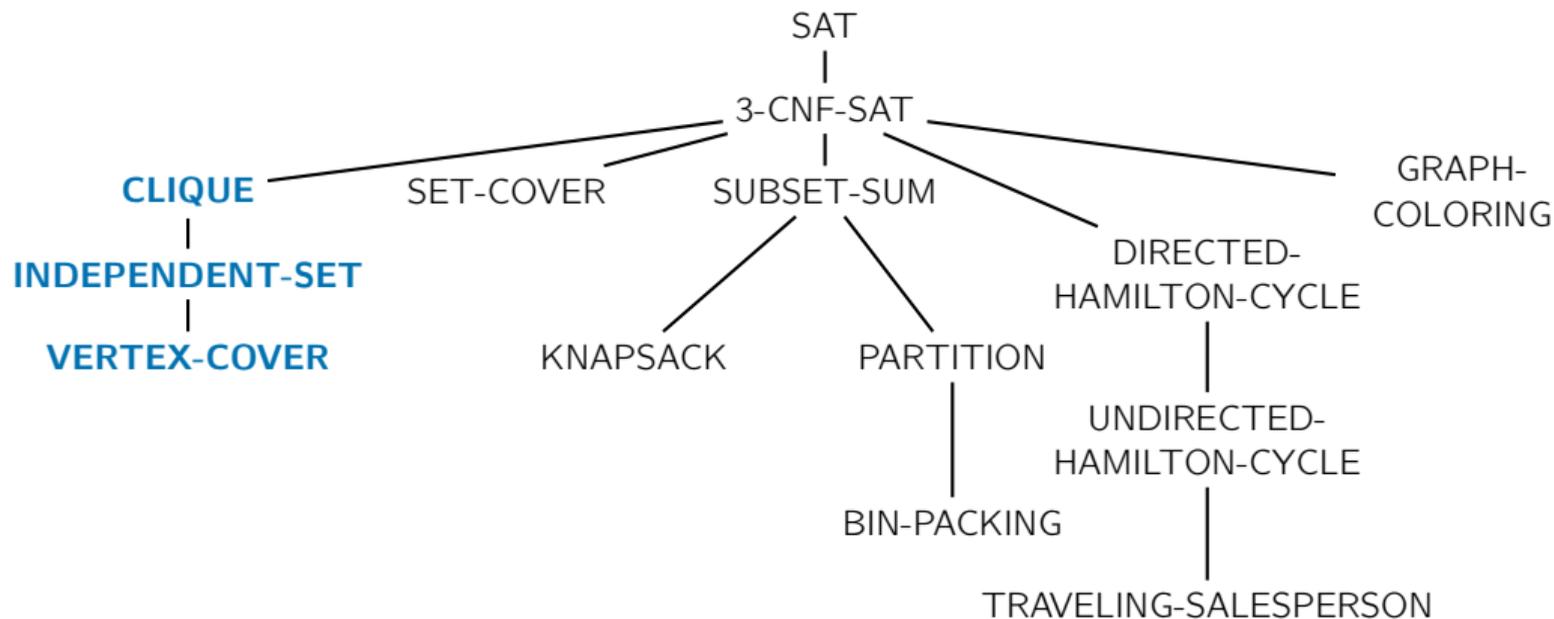
Lehr- und Forschungseinheit für
Theoretische Informatik und Theorembeweisen

Stand: 21. Juli 2025

Basierend auf Folien von PD Dr. David Sabel



Überblick über \mathcal{NP} -Vollständigkeitsbeweise



Ungerichtete Graphen

Ein **ungerichteter Graph** $G = (V, E)$ besteht aus

- ▶ einer endlichen Menge V von Knoten (vertices)
- ▶ einer endlichen Menge E von Kanten (edges), wobei Kanten aus zwei Knoten bestehen, und für alle $\{u, v\} \in E$ gilt $u \neq v$.

Ungerichtete Graphen

Ein **ungerichteter Graph** $G = (V, E)$ besteht aus

- ▶ einer endlichen Menge V von Knoten (vertices)
- ▶ einer endlichen Menge E von Kanten (edges), wobei Kanten aus zwei Knoten bestehen, und für alle $\{u, v\} \in E$ gilt $u \neq v$.

Beispiel: $G = (V, E)$ mit

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und

$E = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\},$
 $\{2, 6\}, \{4, 7\}, \{6, 7\}, \{6, 8\}, \{8, 9\}\}$

Ungerichtete Graphen

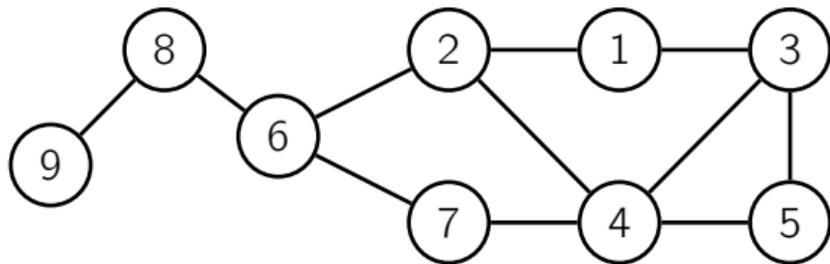
Ein **ungerichteter Graph** $G = (V, E)$ besteht aus

- ▶ einer endlichen Menge V von Knoten (vertices)
- ▶ einer endlichen Menge E von Kanten (edges), wobei Kanten aus zwei Knoten bestehen, und für alle $\{u, v\} \in E$ gilt $u \neq v$.

Beispiel: $G = (V, E)$ mit

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und

$E = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\},$
 $\{2, 6\}, \{4, 7\}, \{6, 7\}, \{6, 8\}, \{8, 9\}\}$



Ungerichtete Graphen

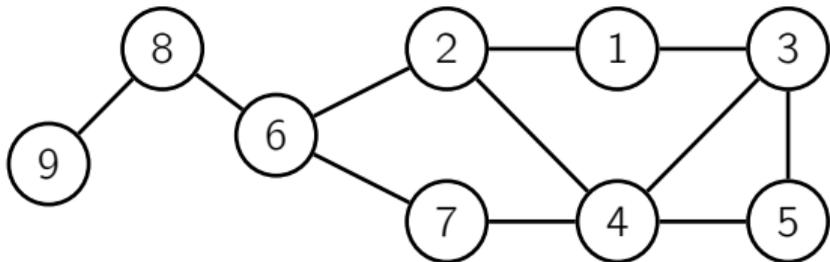
Ein **ungerichteter Graph** $G = (V, E)$ besteht aus

- ▶ einer endlichen Menge V von Knoten (vertices)
- ▶ einer endlichen Menge E von Kanten (edges), wobei Kanten aus zwei Knoten bestehen, und für alle $\{u, v\} \in E$ gilt $u \neq v$.

Beispiel: $G = (V, E)$ mit

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und

$E = \{\{1, 2\}, \{1, 3\}, \{2, 4\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\},$
 $\{2, 6\}, \{4, 7\}, \{6, 7\}, \{6, 8\}, \{8, 9\}\}$



Beachte: Wir **verbieten**

- ▶ Schlingen $\{u, u\} \in E$
- ▶ Mehrfachkanten (= mehrere Kanten zwischen u und v)
- ▶ Hypergraphen (Kanten mit nicht genau 2 Knoten).

Gerichtete Graphen

Bei **gerichteten Graphen** sind die Kanten gerichtet: $(u, v) \in E$ statt $\{u, v\} \in E$.
Daher sind Kanten (u, v) und (v, u) verschieden.

Gerichtete Graphen

Bei **gerichteten Graphen** sind die Kanten gerichtet: $(u, v) \in E$ statt $\{u, v\} \in E$.
Daher sind Kanten (u, v) und (v, u) verschieden.

Beispiel: $G = (V, E)$ mit

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und

$E = \{(1, 2), (1, 3), (2, 4), (3, 4), (3, 5), (4, 5),$
 $(2, 6), (4, 7), (6, 7), (6, 8), (8, 9)\}$

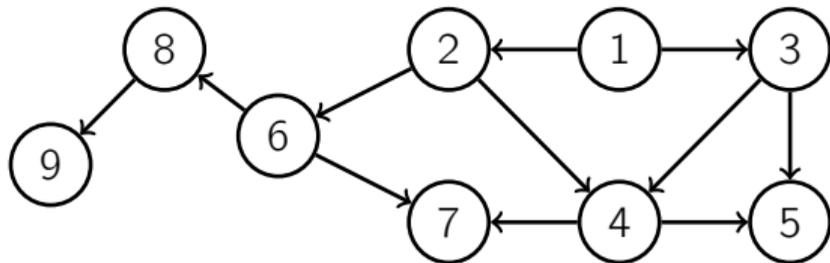
Gerichtete Graphen

Bei **gerichteten Graphen** sind die Kanten gerichtet: $(u, v) \in E$ statt $\{u, v\} \in E$.
Daher sind Kanten (u, v) und (v, u) verschieden.

Beispiel: $G = (V, E)$ mit

$V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ und

$E = \{(1, 2), (1, 3), (2, 4), (3, 4), (3, 5), (4, 5),$
 $(2, 6), (4, 7), (6, 7), (6, 8), (8, 9)\}$



Cliquen in Graphen

Definition

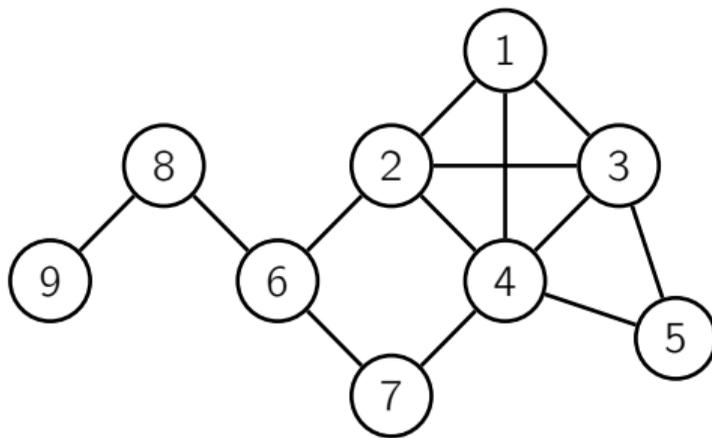
Für einen ungerichteten Graphen $G = (V, E)$ ist eine **Clique der Größe k** eine Menge $V' \subseteq V$, sodass $|V'| = k$ und für alle $u, v \in V'$ mit $u \neq v$ gilt: $\{u, v\} \in E$.

Cliquen in Graphen

Definition

Für einen ungerichteten Graphen $G = (V, E)$ ist eine **Clique der Größe k** eine Menge $V' \subseteq V$, sodass $|V'| = k$ und für alle $u, v \in V'$ mit $u \neq v$ gilt: $\{u, v\} \in E$.

Beispiel:

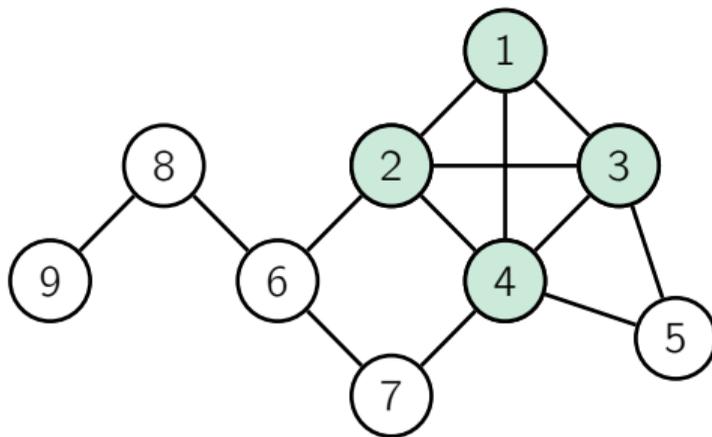


Cliquen in Graphen

Definition

Für einen ungerichteten Graphen $G = (V, E)$ ist eine **Clique der Größe k** eine Menge $V' \subseteq V$, sodass $|V'| = k$ und für alle $u, v \in V'$ mit $u \neq v$ gilt: $\{u, v\} \in E$.

Beispiel (Größe 4):



Definition

Das **CLIQUE-Problem** lässt sich wie folgt formulieren.

gegeben: ein ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und eine Zahl $k \in \mathbb{N}$

gefragt: Besitzt G eine Clique der Größe k ?

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Satz

CLIQUE ist \mathcal{NP} -vollständig.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Satz

CLIQUE ist \mathcal{NP} -vollständig.

Beweis

1. CLIQUE $\in \mathcal{NP}$:

Rate nichtdeterministisch eine Menge $V' \subseteq V$ von k Knoten.

Prüfe deterministisch (in Polynomialzeit), ob für alle $u, v \in V' : \{u, v\} \in E$ gilt.

Falls ja, akzeptiere, sonst verwirf.

Daher kann eine NTM konstruiert werden, die CLIQUE in Polynomialzeit entscheidet.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

2. CLIQUE ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $3\text{-CNF-SAT} \leq_p \text{CLIQUE}$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

2. CLIQUE ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $3\text{-CNF-SAT} \leq_p \text{CLIQUE}$.

Sei $F = K_1 \wedge \dots \wedge K_m$ eine 3-CNF, wobei

$$K_i = (L_{i,1} \vee L_{i,2} \vee L_{i,3})$$

für $i \in \{1, \dots, m\}$. Falls K_i weniger als drei Literale hat, verdopple Literale.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

2. CLIQUE ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $3\text{-CNF-SAT} \leq_p \text{CLIQUE}$.

Sei $F = K_1 \wedge \dots \wedge K_m$ eine 3-CNF, wobei

$$K_i = (L_{i,1} \vee L_{i,2} \vee L_{i,3})$$

für $i \in \{1, \dots, m\}$. Falls K_i weniger als drei Literale hat, verdopple Literale.

Notation: \bar{L} ist negiertes Literal zu L : $\bar{x} = \neg x$ und $\overline{\bar{x}} = x$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

2. CLIQUE ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $3\text{-CNF-SAT} \leq_p \text{CLIQUE}$.

Sei $F = K_1 \wedge \dots \wedge K_m$ eine 3-CNF, wobei

$$K_i = (L_{i,1} \vee L_{i,2} \vee L_{i,3})$$

für $i \in \{1, \dots, m\}$. Falls K_i weniger als drei Literale hat, verdopple Literale.

Notation: \bar{L} ist negiertes Literal zu L : $\bar{x} = \neg x$ und $\overline{\bar{x}} = x$.

Wir erzeugen einen Graphen $f(G)$.

Für jedes Literal $L_{i,j}$ erzeuge Knoten (i,j) im Graph, d.h.

$$V := \{(i,j) \mid i \in \{1, \dots, m\} \text{ und } j \in \{1, 2, 3\}\}$$

Beweis (Fortsetzung)

Für die Kanten:

- ▶ Erzeuge **keine Kanten innerhalb** der drei Knoten $\{(i, 1), (i, 2), (i, 3)\}$ **einer Klausel** für jedes i .

Beweis (Fortsetzung)

Für die Kanten:

- ▶ Erzeuge **keine Kanten innerhalb** der drei Knoten $\{(i, 1), (i, 2), (i, 3)\}$ **einer Klausel** für jedes i .
- ▶ Erzeuge Kanten zwischen Literalen verschiedenen Klauseln, aber **ohne dass sich zwei verbundene Literale $L_{i,j}$ und $L_{i',j'}$ widersprechen** (d.h. $L_{i,j} \neq \overline{L_{i',j'}}$).

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

Für die Kanten:

- ▶ Erzeuge **keine Kanten innerhalb** der drei Knoten $\{(i, 1), (i, 2), (i, 3)\}$ einer Klausel für jedes i .
- ▶ Erzeuge Kanten zwischen Literalen verschiedenen Klauseln, aber **ohne dass sich zwei verbundene Literale $L_{i,j}$ und $L_{i',j'}$ widersprechen** (d.h. $L_{i,j} \neq \overline{L_{i',j'}}$).

Daher:

$$E := \left\{ \{(i,j), (i',j')\} \mid \begin{array}{l} i \neq i' \text{ und } i, i' \in \{1, \dots, m\} \text{ und } j, j' \in \{1, 2, 3\} \\ \text{und } L_{i,j} \neq \overline{L_{i',j'}} \end{array} \right\}$$

Beweis (Fortsetzung)

Für die Kanten:

- ▶ Erzeuge **keine Kanten innerhalb** der drei Knoten $\{(i, 1), (i, 2), (i, 3)\}$ einer Klausel für jedes i .
- ▶ Erzeuge Kanten zwischen Literalen verschiedenen Klauseln, aber **ohne dass sich zwei verbundene Literale $L_{i,j}$ und $L_{i',j'}$ widersprechen** (d.h. $L_{i,j} \neq \overline{L_{i',j'}}$).

Daher:

$$E := \left\{ \{(i,j), (i',j')\} \mid \begin{array}{l} i \neq i' \text{ und } i, i' \in \{1, \dots, m\} \text{ und } j, j' \in \{1, 2, 3\} \\ \text{und } L_{i,j} \neq \overline{L_{i',j'}} \end{array} \right\}$$

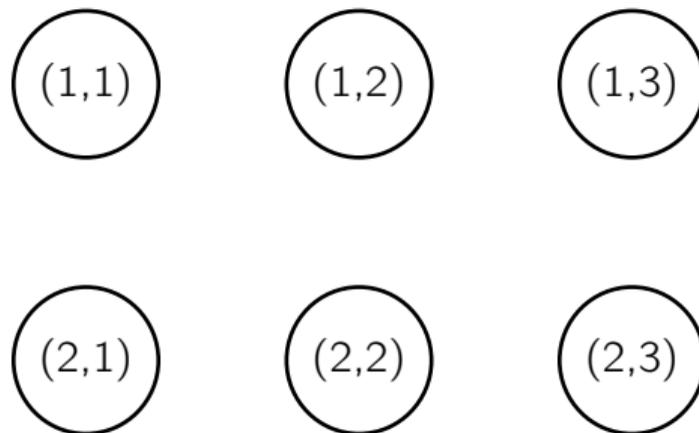
$f(F) = ((V, E), m)$ ist total und in Polynomialzeit berechenbar.

Erstes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_1)$.

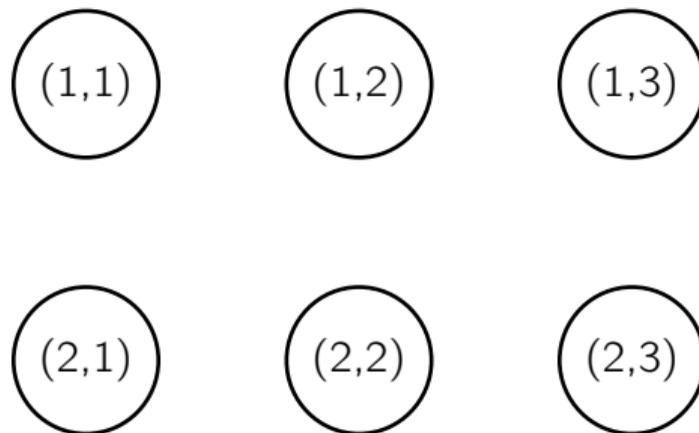
Erstes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_1)$. Graph:



Erstes Beispiel für die Reduktion

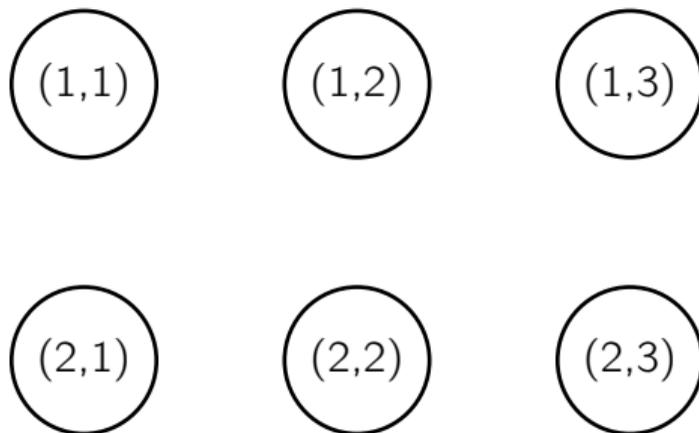
Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_1)$. Graph:



Es gibt keine Kanten, da sich $(1, i)$ und $(2, j)$ stets widersprechen.

Erstes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_1)$. Graph:



Es gibt keine Kanten, da sich $(1, i)$ und $(2, j)$ stets widersprechen.

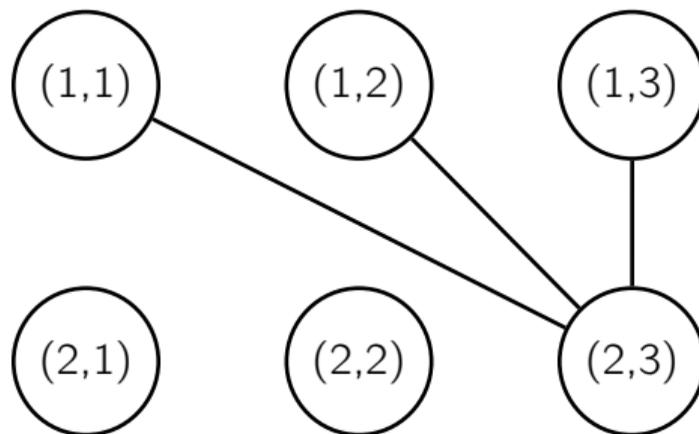
Es gibt keine Clique der Größe 2 aber auch keine erfüllende Belegung der Variablen von F .

Zweites Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_2)$.

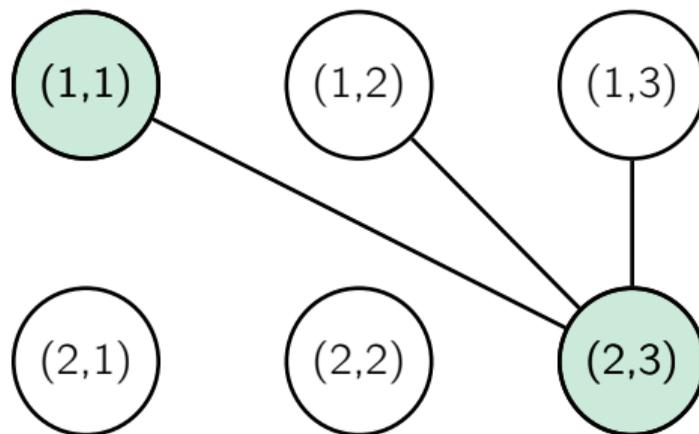
Zweites Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_2)$. Graph:



Zweites Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_1 \vee x_1) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_2)$. Graph:



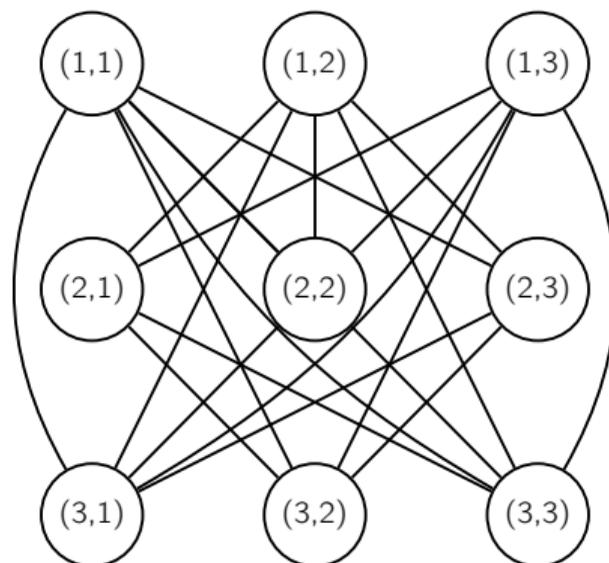
Z.B. ist $\{(1, 1), (2, 3)\}$ eine Clique der Größe 2.
Die zugehörige Belegung ist $I(x_1) = 1, I(x_2) = 0$.

Drittes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3) \wedge (\neg x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3)$.

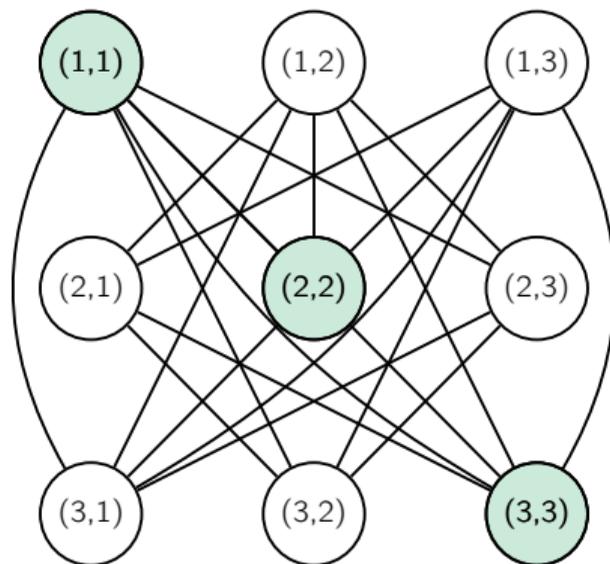
Drittes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3) \wedge (\neg x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3)$. Graph:



Drittes Beispiel für die Reduktion

Sei $F = (x_1 \vee x_2 \vee \neg x_3) \wedge (\neg x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (x_1 \vee \neg x_2 \vee \neg x_3)$. Graph:



Z.B. ist $\{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\}$ eine Clique der Größe 3.
Die zugehörige Belegung ist $I(x_1) = 1, I(x_2) = 1, I(x_3) = 0$.

Beweis (Fortsetzung)

Zu zeigen: F ist erfüllbar g.d.w. (V, E) eine Clique der Größe m hat.

\implies Wenn F erfüllbar ist, gibt es eine Belegung I , sodass in jeder Klausel K_i mindestens ein Literal wahr ist.

Beweis (Fortsetzung)

Zu zeigen: F ist erfüllbar g.d.w. (V, E) eine Clique der Größe m hat.

\implies Wenn F erfüllbar ist, gibt es eine Belegung I , sodass in jeder Klausel K_i mindestens ein Literal wahr ist.

D.h. es gibt Literale $L_{1,j_1}, \dots, L_{m,j_m}$ mit $I(L_{1,j_1}) = 1, \dots, I(L_{m,j_m}) = 1$.

Beweis (Fortsetzung)

Zu zeigen: F ist erfüllbar g.d.w. (V, E) eine Clique der Größe m hat.

⇒ Wenn F erfüllbar ist, gibt es eine Belegung I , sodass in jeder Klausel K_i mindestens ein Literal wahr ist.

D.h. es gibt Literale $L_{1,j_1}, \dots, L_{m,j_m}$ mit $I(L_{1,j_1}) = 1, \dots, I(L_{m,j_m}) = 1$.

Diese Literale können sich paarweise nicht widersprechen.

D.h. sie sind im Graph paarweise miteinander verbunden.

Beweis (Fortsetzung)

Zu zeigen: F ist erfüllbar g.d.w. (V, E) eine Clique der Größe m hat.

\implies Wenn F erfüllbar ist, gibt es eine Belegung I , sodass in jeder Klausel K_i mindestens ein Literal wahr ist.

D.h. es gibt Literale $L_{1,j_1}, \dots, L_{m,j_m}$ mit $I(L_{1,j_1}) = 1, \dots, I(L_{m,j_m}) = 1$.

Diese Literale können sich paarweise nicht widersprechen.

D.h. sie sind im Graph paarweise miteinander verbunden.

Daher formt $\{(1, j_1), \dots, (m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

- ← Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

⇐ Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

⇐ Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

Da (i, x) und (i, y) nie miteinander verbunden sind, müssen alle i_1, \dots, i_m paarweise verschieden sein, also $\{i_1, \dots, i_m\} = \{1, \dots, m\}$.

Mit anderen Worten gehören die Literale zu verschiedenen Klauseln.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

⇐ Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

Da (i, x) und (i, y) nie miteinander verbunden sind, müssen alle i_1, \dots, i_m paarweise verschieden sein, also $\{i_1, \dots, i_m\} = \{1, \dots, m\}$.

Mit anderen Worten gehören die Literale zu verschiedenen Klauseln.

Da sie verbunden sind, widersprechen sich die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ paarweise nicht.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

⇐ Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

Da (i, x) und (i, y) nie miteinander verbunden sind, müssen alle i_1, \dots, i_m paarweise verschieden sein, also $\{i_1, \dots, i_m\} = \{1, \dots, m\}$.

Mit anderen Worten gehören die Literale zu verschiedenen Klauseln.

Da sie verbunden sind, widersprechen sich die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ paarweise nicht.

Definiere die Belegung I mit $I(x) = 1$ wenn $L_{i_k j_k} = x$ und $I(x) = 0$ wenn $L_{i_k j_k} = \neg x$ und $I(y) = 1$ für alle anderen Variablen.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

\Leftarrow Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

Da (i, x) und (i, y) nie miteinander verbunden sind, müssen alle i_1, \dots, i_m paarweise verschieden sein, also $\{i_1, \dots, i_m\} = \{1, \dots, m\}$.

Mit anderen Worten gehören die Literale zu verschiedenen Klauseln.

Da sie verbunden sind, widersprechen sich die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ paarweise nicht.

Definiere die Belegung I mit $I(x) = 1$ wenn $L_{i_k j_k} = x$ und $I(x) = 0$ wenn $L_{i_k j_k} = \neg x$ und $I(y) = 1$ für alle anderen Variablen.

I macht die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ wahr

und da mindestens ein Literal pro Klausel wahr ist, ist F wahr.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von CLIQUE

Beweis (Fortsetzung)

\Leftarrow Wir nehmen an, dass (V, E) eine Clique der Größe m hat und beweisen, dass F erfüllbar ist.

Sei $V' = \{(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)\}$ eine Clique der Größe m .

Da (i, x) und (i, y) nie miteinander verbunden sind, müssen alle i_1, \dots, i_m paarweise verschieden sein, also $\{i_1, \dots, i_m\} = \{1, \dots, m\}$.

Mit anderen Worten gehören die Literale zu verschiedenen Klauseln.

Da sie verbunden sind, widersprechen sich die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ paarweise nicht.

Definiere die Belegung I mit $I(x) = 1$ wenn $L_{i_k j_k} = x$ und $I(x) = 0$ wenn $L_{i_k j_k} = \neg x$ und $I(y) = 1$ für alle anderen Variablen.

I macht die Literale $L_{i_1 j_1}, \dots, L_{i_m j_m}$ wahr und da mindestens ein Literal pro Klausel wahr ist, ist F wahr.

Daher: 3-CNF-SAT \leq_p CLIQUE.

Da 3-CNF-SAT \mathcal{NP} -schwer ist, folgt dass CLIQUE \mathcal{NP} -schwer ist. \square

Unabhängige Knotenmenge

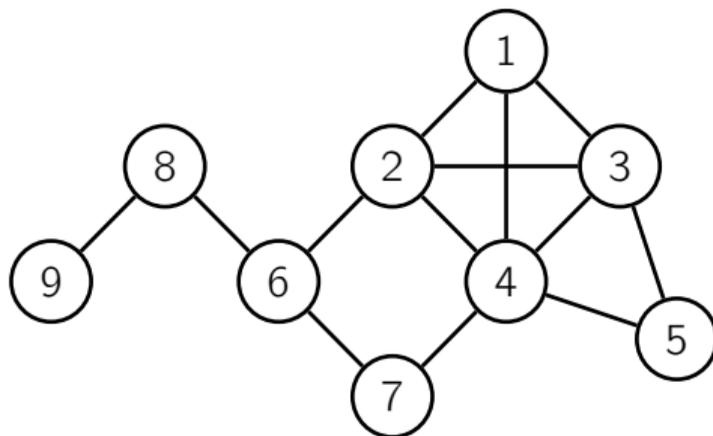
Definition

Für einen Graphen $G = (V, E)$ ist $V' \subseteq V$ eine **unabhängige Knotenmenge** (*independent set*), wenn keine zwei Knoten aus V' über eine Kante verbunden sind, d.h. $u, v \in V'$ impliziert $\{u, v\} \notin E$.

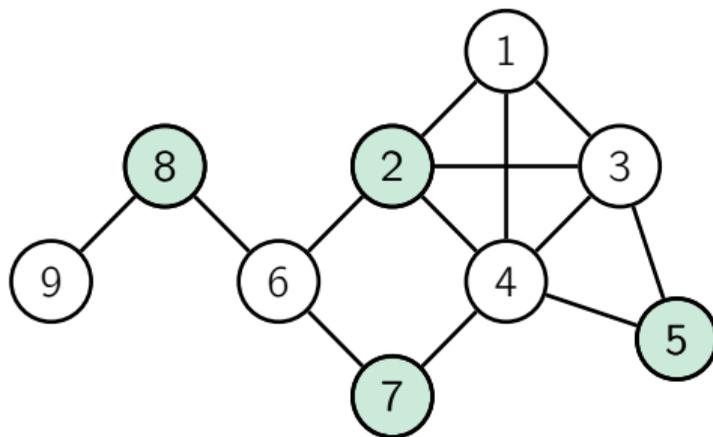
Beachte:

- ▶ \emptyset ist immer eine unabhängige Knotenmenge.
- ▶ Man möchte typischerweise eine große Menge V' finden.

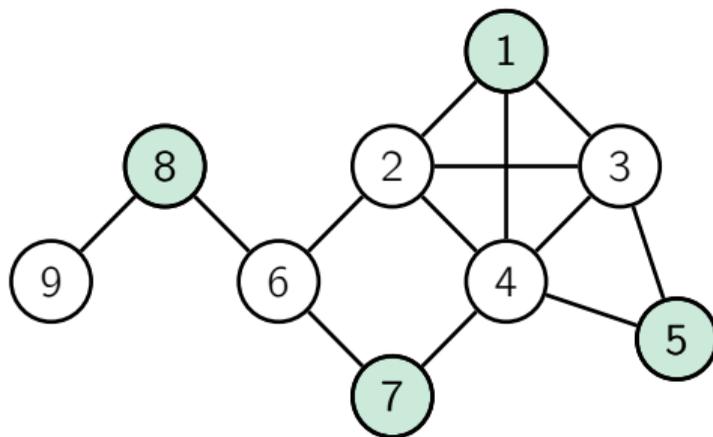
Beispiele für unabhängige Knotenmengen



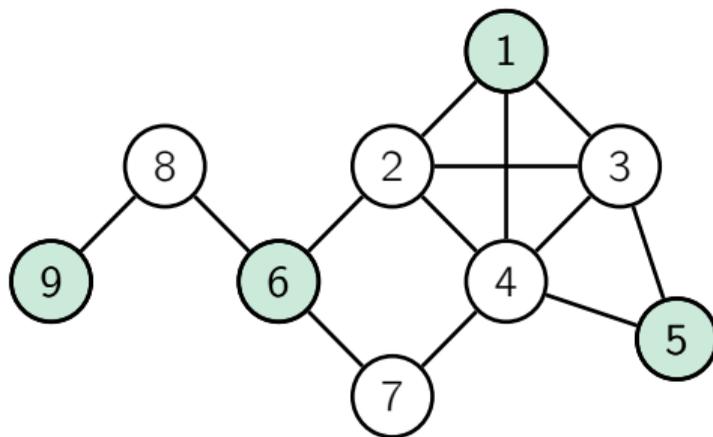
Beispiele für unabhängige Knotenmengen



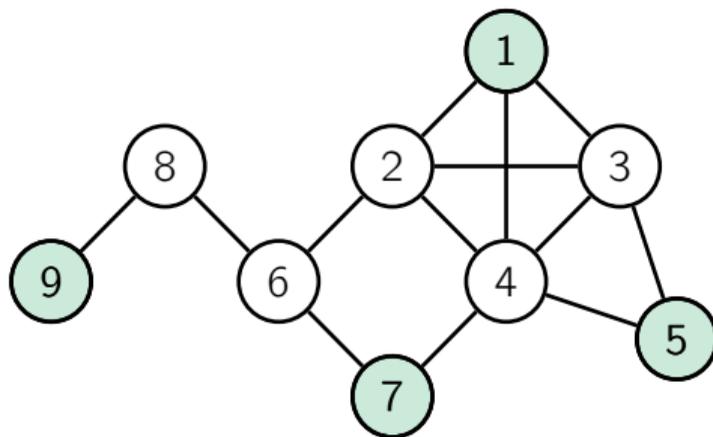
Beispiele für unabhängige Knotenmengen



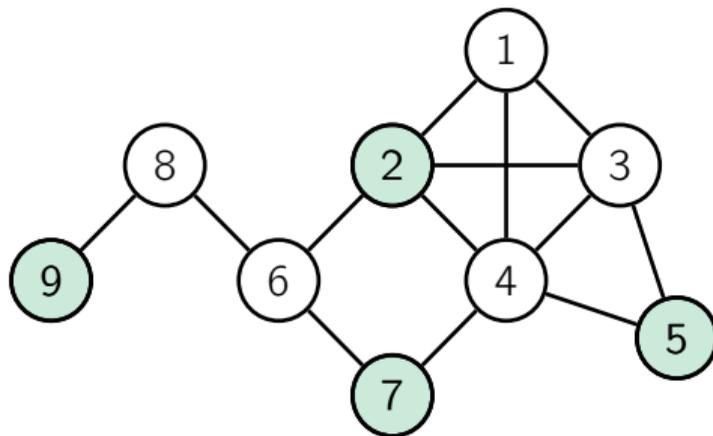
Beispiele für unabhängige Knotenmengen



Beispiele für unabhängige Knotenmengen



Beispiele für unabhängige Knotenmengen

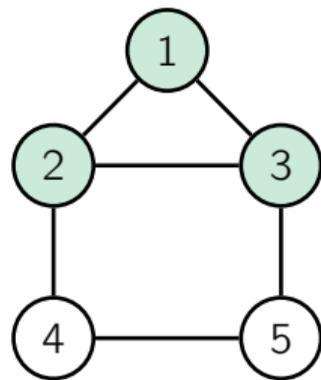


Komplementgraph

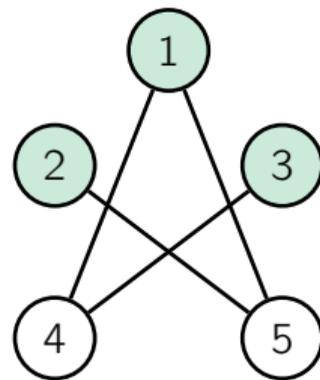
Für einen Graphen $G = (V, E)$ ist der **Komplementgraph zu G** der Graph $\bar{G} = (V, \bar{E})$ mit

$$\bar{E} := \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v, \{u, v\} \notin E\}$$

Beispiel für den Komplementgraphen

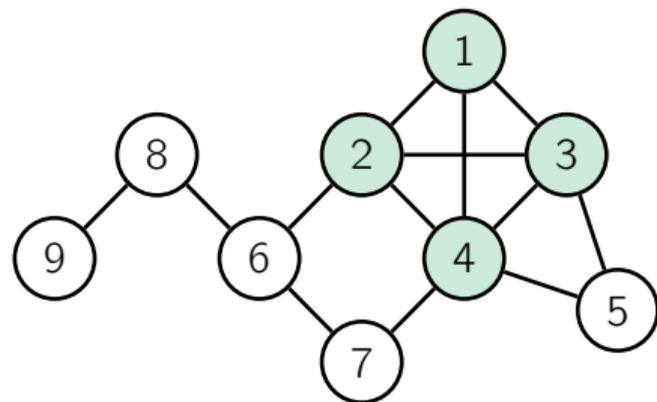


Graph

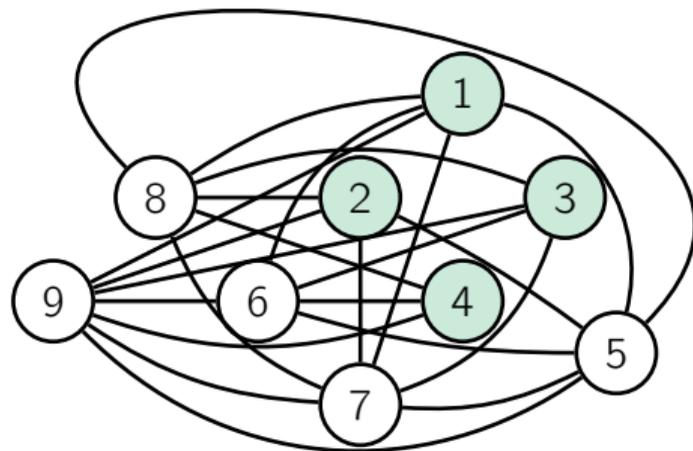


Komplementgraph

Weiteres Beispiel für den Komplementgraphen



Graph



Komplementgraph

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \overline{G} eine Clique der Größe k hat.

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \overline{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \overline{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge der Größe k

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \bar{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge der Größe k
g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für $u, v \in V'$ und $|V'| = k$

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \overline{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge der Größe k
g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für $u, v \in V'$ und $|V'| = k$

V' ist eine Clique der Größe k in \overline{G}

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \bar{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge der Größe k

g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für $u, v \in V'$ und $|V'| = k$

$\{u, v\} \in \bar{E}$ für $u, v \in V'$, $u \neq v$ und $|V'| = k$

g.d.w. V' ist eine Clique der Größe k in \bar{G}

□

Unabhängige Knotenmengen vs. Cliques

Lemma

Für jeden ungerichteten Graphen G gilt: G hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w. \bar{G} eine Clique der Größe k hat.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge der Größe k

g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für $u, v \in V'$ und $|V'| = k$

g.d.w. $\{u, v\} \in \bar{E}$ für $u, v \in V'$, $u \neq v$ und $|V'| = k$

g.d.w. V' ist eine Clique der Größe k in \bar{G}



Definition

Das **INDEPENDENT-SET-Problem** lässt sich wie folgt formulieren.

gegeben: ein ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und eine Zahl $k \in \mathbb{N}$

gefragt: Besitzt G eine unabhängige Knotenmenge der Größe k ?

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Satz

INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -vollständig.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Satz

INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -vollständig.

Beweis

1. INDEPENDENT-SET $\in \mathcal{NP}$:

Rate nichtdeterministisch eine Menge $V' \subseteq V$ von k Knoten.

Verifiziere deterministisch, ob für jedes Paar $\{u, v\} \in V'$ gilt: $\{u, v\} \notin E$.

Dies geht in Polynomialzeit.

Daher kann INDEPENDENT-SET in Polynomialzeit auf einer NTM entschieden werden.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Beweis

2. INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Beweis

2. INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

Sei $f((V, E), m) = ((V, \bar{E}), m)$ mit $\bar{E} = \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v, \{u, v\} \notin E\}$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Beweis

2. INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

Sei $f((V, E), m) = ((V, \bar{E}), m)$ mit $\bar{E} = \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v, \{u, v\} \notin E\}$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Beweis

2. INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

Sei $f((V, E), m) = ((V, \bar{E}), m)$ mit $\bar{E} = \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v, \{u, v\} \notin E\}$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

Dann gilt: (V, E) hat eine Clique der Größe m g.d.w.

(V, \bar{E}) eine unabhängige Knotenmenge der Größe m hat.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von INDEPENDENT-SET

Beweis

2. INDEPENDENT-SET ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

Sei $f((V, E), m) = ((V, \bar{E}), m)$ mit $\bar{E} = \{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v, \{u, v\} \notin E\}$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

Dann gilt: (V, E) hat eine Clique der Größe m g.d.w.

(V, \bar{E}) eine unabhängige Knotenmenge der Größe m hat.

Daher: $\text{CLIQUE} \leq_p \text{INDEPENDENT-SET}$.

Da CLIQUE \mathcal{NP} -schwer ist, folgt dass INDEPENDENT-SET \mathcal{NP} -schwer ist. □

Überdeckende Knotenmenge

Definition

Für einen Graphen $G = (V, E)$ ist $V' \subseteq V$ eine **überdeckende Knotenmenge** (*vertex cover*), wenn jede Kante aus E mindestens einen Knoten in V' hat, d.h. für alle Knoten $u, v \in V$: $\{u, v\} \in E$ impliziert $u \in V' \vee v \in V'$.

Überdeckende Knotenmenge

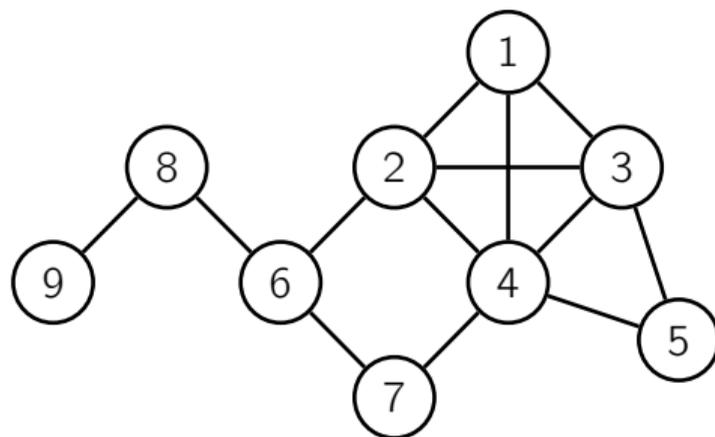
Definition

Für einen Graphen $G = (V, E)$ ist $V' \subseteq V$ eine **überdeckende Knotenmenge** (*vertex cover*), wenn jede Kante aus E mindestens einen Knoten in V' hat, d.h. für alle Knoten $u, v \in V$: $\{u, v\} \in E$ impliziert $u \in V' \vee v \in V'$.

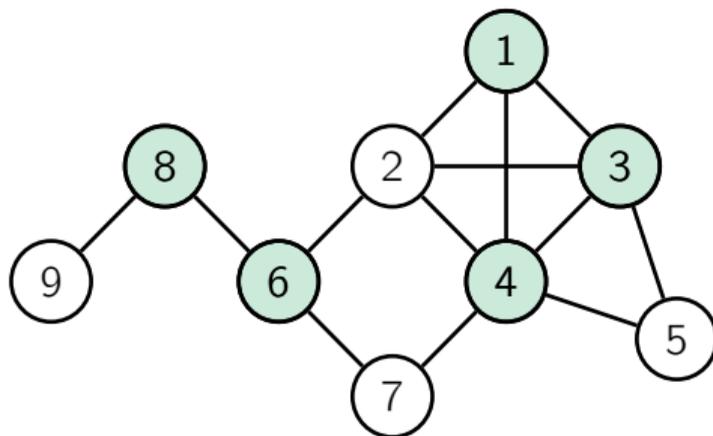
Beachte:

- ▶ V ist immer eine überdeckende Knotenmenge.
- ▶ Man möchte typischerweise eine kleine Menge V' finden.

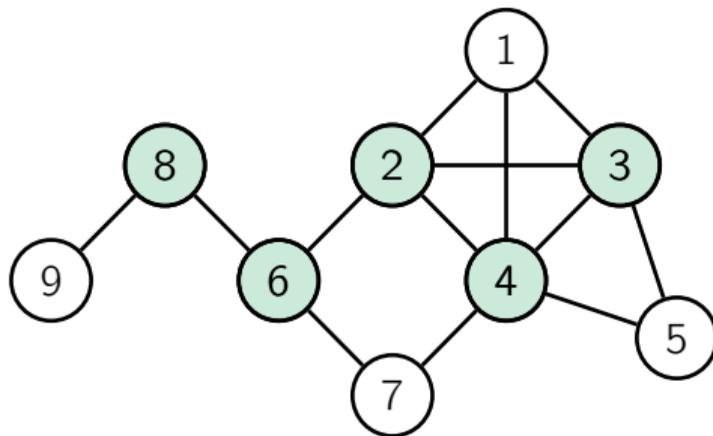
Beispiele für überdeckende Knotenmengen



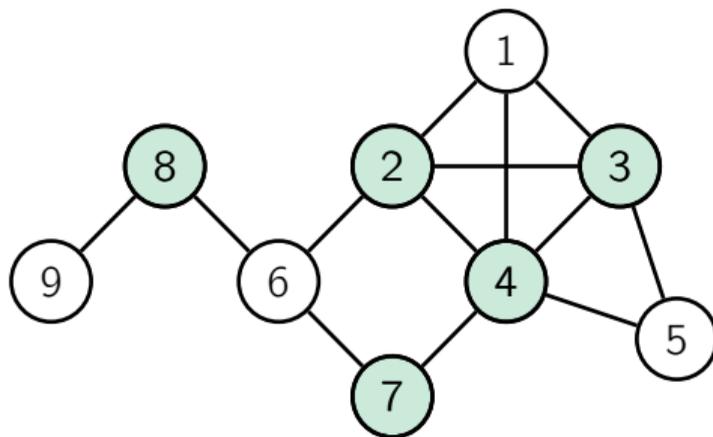
Beispiele für überdeckende Knotenmengen



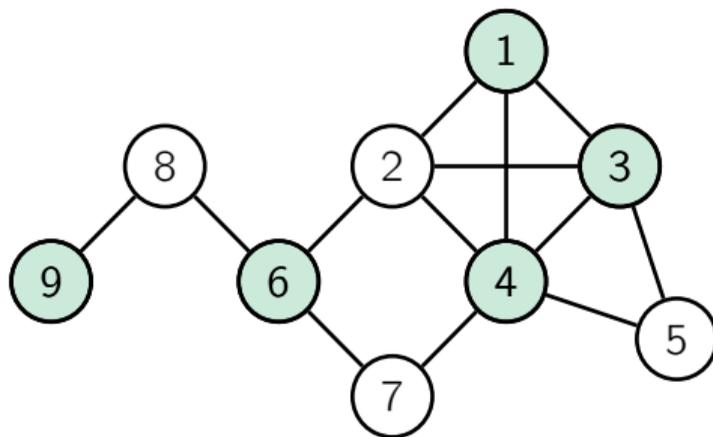
Beispiele für überdeckende Knotenmengen



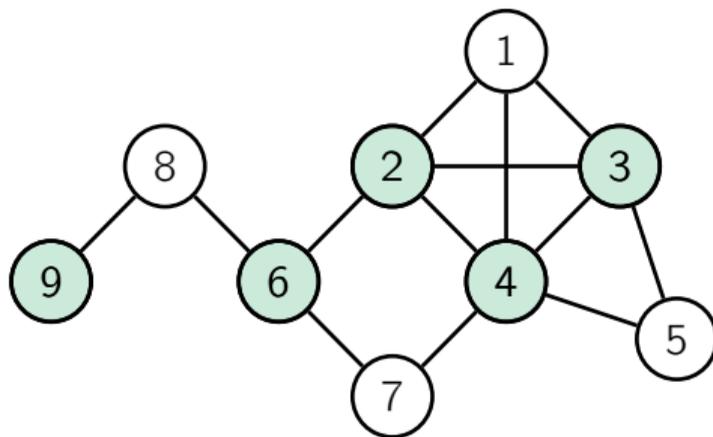
Beispiele für überdeckende Knotenmengen



Beispiele für überdeckende Knotenmengen



Beispiele für überdeckende Knotenmengen



Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge
g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für alle $u, v \in V'$

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge

g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für alle $u, v \in V'$

g.d.w. $u \notin V' \vee v \notin V'$ für alle $\{u, v\} \in E$

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge

g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für alle $u, v \in V'$

g.d.w. $u \notin V' \vee v \notin V'$ für alle $\{u, v\} \in E$

$V \setminus V'$ ist eine überdeckende Knotenmenge

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge

g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für alle $u, v \in V'$

g.d.w. $u \notin V' \vee v \notin V'$ für alle $\{u, v\} \in E$

$(u \in V \setminus V') \vee (v \in V \setminus V')$ für alle $\{u, v\} \in E$

g.d.w. $V \setminus V'$ ist eine überdeckende Knotenmenge

Überdeckende Knotenmengen vs. unabhängige Knotenmengen

Lemma

$G = (V, E)$ hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe k g.d.w.
 G hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - k$.

Beweis Sei $V' \subseteq V$.

V' ist eine unabhängige Knotenmenge

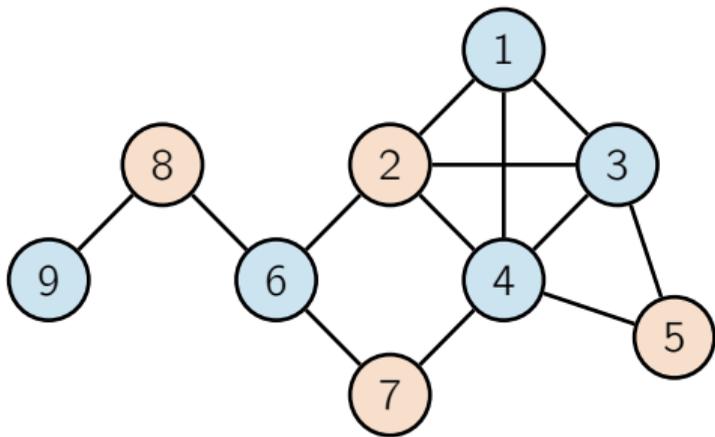
g.d.w. $\{u, v\} \notin E$ für alle $u, v \in V'$

g.d.w. $u \notin V' \vee v \notin V'$ für alle $\{u, v\} \in E$

g.d.w. $(u \in V \setminus V') \vee (v \in V \setminus V')$ für alle $\{u, v\} \in E$

g.d.w. $V \setminus V'$ ist eine überdeckende Knotenmenge □

Beispiel



unabhängige Knotenmenge



überdeckende Knotenmenge

Definition

Das **VERTEX-COVER-Problem** lässt sich wie folgt formulieren.

gegeben: ein ungerichteter Graph $G = (V, E)$ und eine Zahl $k \in \mathbb{N}$

gefragt: Besitzt G eine überdeckende Knotenmenge der Größe höchstens k ?

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Satz

VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -vollständig.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Satz

VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -vollständig.

Beweis

1. VERTEX-COVER $\in \mathcal{NP}$:

Sei $G = (V, E)$.

Rate nichtdeterministisch eine Menge $V' \subseteq V$ von k Knoten.

Prüfe deterministisch (in Polynomialzeit), ob für alle $\{u, v\} \in E: u \in V' \vee v \in V'$.

D.h. VERTEX-COVER wird in Polynomialzeit von einer NTM entschieden.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Beweis (Fortsetzung)

2. VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen $\text{INDEPENDENT-SET} \leq_p \text{VERTEX-COVER}$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Beweis (Fortsetzung)

2. VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen INDEPENDENT-SET \leq_p VERTEX-COVER.

Sei $f((V, E, m)) = (V, E, |V| - m)$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Beweis (Fortsetzung)

2. VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen INDEPENDENT-SET \leq_p VERTEX-COVER.

Sei $f((V, E, m)) = (V, E, |V| - m)$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Beweis (Fortsetzung)

2. VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen INDEPENDENT-SET \leq_p VERTEX-COVER.

Sei $f((V, E, m)) = (V, E, |V| - m)$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

Zudem gilt:

(V, E) hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe m g.d.w.

(V, E) hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - m$.

\mathcal{NP} -Vollständigkeit von VERTEX-COVER

Beweis (Fortsetzung)

2. VERTEX-COVER ist \mathcal{NP} -schwer:

Wir zeigen INDEPENDENT-SET \leq_p VERTEX-COVER.

Sei $f((V, E, m)) = (V, E, |V| - m)$.

Die Funktion f ist total und kann in Polynomialzeit berechnet werden.

Zudem gilt:

(V, E) hat eine unabhängige Knotenmenge der Größe m g.d.w.

(V, E) hat eine überdeckende Knotenmenge der Größe $|V| - m$.

Daher: INDEPENDENT-SET \leq_p VERTEX-COVER.

Da INDEPENDENT-SET \mathcal{NP} -schwer ist, folgt dass VERTEX-COVER \mathcal{NP} -schwer ist. □