

Formale Systeme

Prof. Dr. Bernhard Beckert, WS 2014/2015

Aussagenlogik: Normalformen

KIT – INSTITUT FÜR THEORETISCHE INFORMATIK

Disjunktive und Konjunktive Normalform

Definition

Disjunktive und Konjunktive Normalform

Definition

- ▶ Ein **Literal** ist ein Atom oder ein negiertes Atom

Disjunktive und Konjunktive Normalform

Definition

- ▶ Ein **Literal** ist ein Atom oder ein negiertes Atom
- ▶ Eine Formel ist in **disjunktiver Normalform** (DNF), wenn sie Disjunktion von Konjunktionen von Literalen ist.

Disjunktive und Konjunktive Normalform

Definition

- ▶ Ein **Literal** ist ein Atom oder ein negiertes Atom
- ▶ Eine Formel ist in **disjunktiver Normalform** (DNF), wenn sie Disjunktion von Konjunktionen von Literalen ist.
- ▶ Eine Formel ist in **konjunktiver Normalform** (KNF), wenn sie Konjunktion von Disjunktionen von Literalen ist.

1. Zu jeder aussagenlogischen Formel A gibt es eine logisch äquivalente in disjunktiver Normalform und ebenso eine logisch äquivalente in konjunktiver Normalform.

1. Zu jeder aussagenlogischen Formel A gibt es eine logisch äquivalente in disjunktiver Normalform und ebenso eine logisch äquivalente in konjunktiver Normalform.
2. Die Algorithmen zur Herstellung beider Normalformen ergeben sich unmittelbar aus elementaren Tautologien.

1. Zu jeder aussagenlogischen Formel A gibt es eine logisch äquivalente in disjunktiver Normalform und ebenso eine logisch äquivalente in konjunktiver Normalform.
2. Die Algorithmen zur Herstellung beider Normalformen ergeben sich unmittelbar aus elementaren Tautologien.
3. Ist die Wahrheitstafel einer Formel gegeben, so lassen sich disjunktive und konjunktive Normalform aus dieser „direkt“ ablesen.

1. Eine disjunktive Normalform $\bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ in der Signatur Σ heißt *vollständig* falls für jedes $P \in \Sigma$ in jeder Klausel $K \in \mathcal{K}$ eines der Literale P oder $\neg P$ in K vorkommt.

1. Eine disjunktive Normalform $\bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ in der Signatur Σ heißt *vollständig* falls für jedes $P \in \Sigma$ in jeder Klausel $K \in \mathcal{K}$ eines der Literale P oder $\neg P$ in K vorkommt.
2. Vollständige Normalformen sind eindeutig bis auf Umordnung.

Fakten (Fortsetzung)

1. Eine disjunktive Normalform $\bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ in der Signatur Σ heißt *vollständig* falls für jedes $P \in \Sigma$ in jeder Klausel $K \in \mathcal{K}$ eines der Literale P oder $\neg P$ in K vorkommt.
2. Vollständige Normalformen sind eindeutig bis auf Umordnung.
1. Eine disjunktive Normalform $D = \bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ heißt *minimal* falls jede *kürzere* Formel D' nicht äquivalent zu D ist.
 $D' = \bigvee_{K' \in \mathcal{K}'} K'$, heißt *kürzer* als D falls für alle $K' \in \mathcal{K}'$ ein $K \in \mathcal{K}$ existiert mit K' ist Teilformel von K .

Fakten (Fortsetzung)

1. Eine disjunktive Normalform $\bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ in der Signatur Σ heißt *vollständig* falls für jedes $P \in \Sigma$ in jeder Klausel $K \in \mathcal{K}$ eines der Literale P oder $\neg P$ in K vorkommt.
2. Vollständige Normalformen sind eindeutig bis auf Umordnung.

1. Eine disjunktive Normalform $D = \bigvee_{K \in \mathcal{K}} K$ heißt *minimal* falls jede *kürzere* Formel D' nicht äquivalent zu D ist.
 $D' = \bigvee_{K' \in \mathcal{K}'} K'$, heißt *kürzer* als D falls für alle $K' \in \mathcal{K}'$ ein $K \in \mathcal{K}$ existiert mit K' ist Teilformel von K .
2. Minimale disjunktive und konjunktive Normalformen einer Formel sind nicht eindeutig.

1. Die Erfüllbarkeit einer Formel in DNF sowie
 2. die Allgemeingültigkeit einer Formel in KNF
- lassen sich in polynomieller Zeit überprüfen.

Beispiel zur exponentiellen Länge der KNF

Sei

$$A_n = (P_{1,1} \wedge P_{1,2}) \vee \dots \vee (P_{n,1} \wedge P_{n,2})$$

Beispiel zur exponentiellen Länge der KNF

Sei

$$A_n = (P_{1,1} \wedge P_{1,2}) \vee \dots \vee (P_{n,1} \wedge P_{n,2})$$

Die konjunktive Normalform von A_n ist:

$$\bigwedge \{P_{1,f(1)} \vee \dots \vee P_{n,f(n)} \mid f: \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, 2\}\}.$$

Für $n = 3$ ist das:

$$\begin{aligned} & (P_{1,1} \vee P_{2,1} \vee P_{3,1}) \wedge (P_{1,1} \vee P_{2,1} \vee P_{3,2}) \wedge \\ & (P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1}) \wedge (P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,2}) \wedge \\ & (P_{1,2} \vee P_{2,1} \vee P_{3,1}) \wedge (P_{1,2} \vee P_{2,1} \vee P_{3,2}) \wedge \\ & (P_{1,2} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1}) \wedge (P_{1,2} \vee P_{2,2} \vee P_{3,2}) \end{aligned}$$

In A_n treten $2 * n$ Literale auf, in der KNF $n * 2^n$.

Konstruktion der kurzen KNF

Allgemeines Verfahren

1. Führe für jede Teilformel, deren oberster Operator binär ist, ein Kürzel (neues Atom) ein.
2. Für jedes dieser Kürzel stelle die Definition gemäß der entspr. Teilformel und unter Berücksichtigung „tieferer“ Kürzel auf.
3. Löse die Äquivalenzen in den Definitionen auf.
4. Forme die Definitionen in KNF um.

Die Konjunktion der Definitionen mit dem Top-Level-Kürzel ist die kurze KNF.

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

Konstruktion der kurzen KNF

Beispiel

Berechne kKNF für die folgende Formel (äquivalent zu A_3)

$$\neg((\neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}) \wedge (\neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}) \wedge (\neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}))$$

1. und 2. Schritt:

$$Q_1 \leftrightarrow \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_2 \leftrightarrow \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_3 \leftrightarrow \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_4 \leftrightarrow Q_1 \wedge Q_2$$

$$Q_5 \leftrightarrow Q_4 \wedge Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

$$(\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2)$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

$$(\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

Konstruktion der kurzen KNF (Forts.)

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

$$(\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$(\neg Q_5 \vee Q_4) \wedge (\neg Q_5 \vee Q_3)$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

$$(\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$(\neg Q_5 \vee Q_4) \wedge (\neg Q_5 \vee Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

3. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2})$$

$$\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

4. Schritt:

$$\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2}$$

$$(Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2})$$

$$\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2}$$

$$(Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2})$$

$$\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2}$$

$$(Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2})$$

$$(\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2)$$

$$Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2$$

$$(\neg Q_5 \vee Q_4) \wedge (\neg Q_5 \vee Q_3)$$

$$Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3$$

$$\neg Q_5$$

Konstruktion der kurzen KNF (Forts.)

3. Schritt:

$$\begin{aligned}
 &\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2} \\
 &\quad Q_1 \vee (P_{1,1} \wedge P_{1,2}) \\
 &\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2} \\
 &\quad Q_2 \vee (P_{2,1} \wedge P_{2,2}) \\
 &\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2} \\
 &\quad Q_3 \vee (P_{3,1} \wedge P_{3,2}) \\
 &\neg Q_4 \vee (Q_1 \wedge Q_2) \\
 &\quad Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2 \\
 &\neg Q_5 \vee (Q_4 \wedge Q_3) \\
 &\quad Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3 \\
 &\neg Q_5
 \end{aligned}$$

4. Schritt:

$$\begin{aligned}
 &\neg Q_1 \vee \neg P_{1,1} \vee \neg P_{1,2} \\
 &\quad (Q_1 \vee P_{1,1}) \wedge (Q_1 \vee P_{1,2}) \\
 &\neg Q_2 \vee \neg P_{2,1} \vee \neg P_{2,2} \\
 &\quad (Q_2 \vee P_{2,1}) \wedge (Q_2 \vee P_{2,2}) \\
 &\neg Q_3 \vee \neg P_{3,1} \vee \neg P_{3,2} \\
 &\quad (Q_3 \vee P_{3,1}) \wedge (Q_3 \vee P_{3,2}) \\
 &\quad (\neg Q_4 \vee Q_1) \wedge (\neg Q_4 \vee Q_2) \\
 &\quad Q_4 \vee \neg Q_1 \vee \neg Q_2 \\
 &\quad (\neg Q_5 \vee Q_4) \wedge (\neg Q_5 \vee Q_3) \\
 &\quad Q_5 \vee \neg Q_4 \vee \neg Q_3 \\
 &\neg Q_5
 \end{aligned}$$

Konjunktion dieser Zeilen
ist in KNF und erfüllbar-
keitsäquivalent zu A_3

Theorem

Zu jeder aussagenlogischen Formel A mit n Literalvorkommen gibt es eine konjunktive Normalform A_{kknf} , so dass

Theorem

Zu jeder aussagenlogischen Formel A mit n Literalvorkommen gibt es eine konjunktive Normalform A_{kknf} , so dass

- A ist erfüllbar gdw A_{kknf} erfüllbar ist,*

Theorem

Zu jeder aussagenlogischen Formel A mit n Literalvorkommen gibt es eine konjunktive Normalform A_{kknf} , so dass

- ▶ *A ist erfüllbar gdw A_{kknf} erfüllbar ist,*
- ▶ *A_{kknf} enthält höchstens $c * n$ Literalvorkommen für eine von n unabhängige Konstante c ,*

Theorem

Zu jeder aussagenlogischen Formel A mit n Literalvorkommen gibt es eine konjunktive Normalform A_{kknf} , so dass

- ▶ *A ist erfüllbar gdw A_{kknf} erfüllbar ist,*
- ▶ *A_{kknf} enthält höchstens $c * n$ Literalvorkommen für eine von n unabhängige Konstante c ,*
- ▶ *A_{kknf} effektiv aus A in polynomieller (sogar linearer) Zeit konstruiert werden kann.*