

Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

Sebastian Iwanowski
FH Wedel

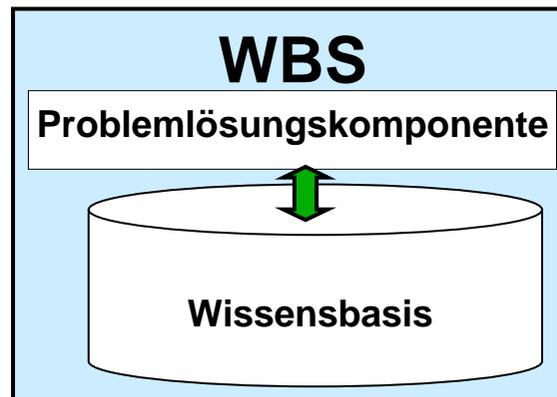
Kap. 3:
Algorithmische Grundlagen der KI

Suchstrategien

Bedeutung von Suchstrategien für logisch formulierte Probleme:

Suche nach Lösung fürs Erfüllbarkeitsproblem

Bedeutung von Suchstrategien für Wissensbasierte Systeme:



Die Problemlösungskomponente muss fast immer ein Belegungsproblem für Constraints aus der Wissensbasis lösen !

➔ *All problem solvers search*

Constraint Satisfaction Problem (CSP)

Spezifikation eines CSP:

- **Variablenmenge**
- **Definitionsbereiche (Domains)**
- **Constraints: Beziehungen zwischen den Variablen**
(in der Regel Gleichungen oder Ungleichungen)

häufig auch noch dabei:

- **weiche Constraints**
(Constraints dürfen verletzt werden)
- **Optimierungskriterium**
(in der Regel Funktion der Variablen, die minimiert oder maximiert werden soll)

gültige Lösung:

Belegung aller Variablen mit Werten, sodass alle harten Constraints erfüllt sind

optimale Lösung:

gültige Lösung, die das Optimierungskriterium optimiert

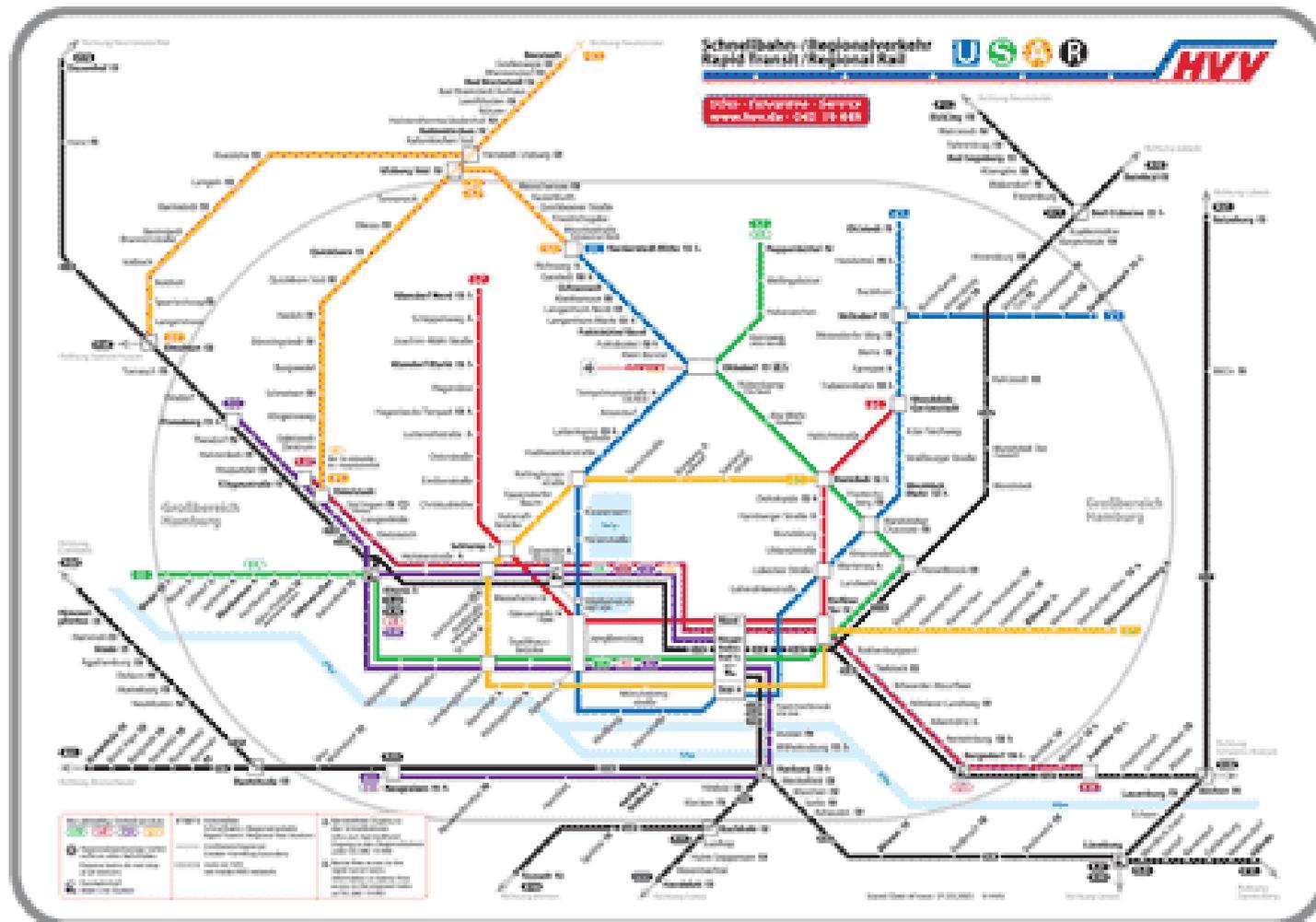
Constraint Satisfaction Problem (CSP)

Anwendungsbeispiele von CSP:

- Technische Diagnose
- Technische Konfiguration
- Problem des Handelsreisenden (TSP)
- Schedulingprobleme
- Routing in Verkehrsnetzen
- Gewinnspiele

Bsp.: Routing in Verkehrsnetzen

KI-Problem: Wie bewertet man die Umsteigevorgänge?



Suchen in Suchgraphen

Suchgraph:

- **Knoten: beschreibt Zustand in der Suchdomäne**
- **Kante: Übergang von einem Zustand in einen Folgezustand**
(in der Regel mit Richtung)
 - **Zustand: Belegung von Variablen mit Werten**
 - **Folgezustand: Belegung einer weiteren Variable mit einem Wert unter Beibehaltung der Werte für die bisher belegten Variablen**
- **Startknoten: Anfangszustand**
(ist immer eindeutig)
 - **Startknoten: keine Variable hat einen Wert.**
- **Zielknoten: gewünschter Endzustand (Lösung des Problems)**
(es darf mehrere geben)
 - **Zielknoten: Alle gewünschten Variablen haben zulässige Werte**

Suchen in Suchgraphen

Verschiedene Suchziele:

- 1) Irgendeine Lösung eines Problems finden bzw. herausfinden, dass es keine gibt.
 - 2) Weitere Lösungen finden bzw. herausfinden, dass es keine weiteren mehr gibt.
 - 3) Alle Lösungen finden
- Expansion eines Knotens: Berechnung aller Folgeknoten

Verschiedene Suchstrategien unterscheiden sich in:

Welcher Knoten wird als nächstes expandiert ?

Spezialfall:

- **Suchgraph ist Suchbaum**
(Pfad vom Startknoten zu jedem Zielknoten ist eindeutig)

Bsp. für Suchbäume in CSP

Constraint-System:

- 1) $(2 < x < 4)$
- 2) $(0 < y < 6)$
- 3) $(x + y > 7)$
- 4) $(x \cdot y < 10,5)$

Definitionsbereich für zulässige Lösungen:

$x, y \in \mathbf{Q}$,
maximal k Stellen nach dem Komma

Optimierungskriterium:

Minimiere $|y - x|$

Suchbaum:

- Jeder Knoten hat festen x- und y-Wert, Knoten können zulässig oder unzulässig sein, für jeden Knoten gibt es eindeutigen Wert für Optimierungsfunktion
- In Ebene i hat jeder x-Wert nur i Stellen nach dem Komma, der y-Wert ist nach Constraint 3) minimal dazu.

Expansionsstrategien:

- Nur zulässige Knoten werden expandiert
- Es wird immer der rechteste zulässige Knoten expandiert
- ...

Bsp. für Suchbäume in CSP

Constraint-System:

- 1) $(2 < x < 4)$
- 2) $(0 < y < 6)$
- 3) $(x + y > 7)$
- 4) $(x \cdot y < 10,5)$

**Definitionsbereich für
zulässige Lösungen:**

$x, y \in \mathbf{Q}$,
maximal k Stellen nach dem Komma

**Optimierungs-
kriterium:**

Minimiere $|y - x|$

Für festes k :

- Suchraum endlich
- Mehrere zulässige Lösungen
- Immer genau 1 optimale Lösung

Für k unbeschränkt:

- Suchraum unendlich
- Unendlich viele zulässige Lösungen
- keine optimale Lösung

Uninformierte Suchstrategien

Im allgemeinen ist nur *blinde (uninformierte) Suche* möglich:

Es gibt keine Information über günstige Suchrichtungen (das Ziel wird erst bei Erreichen erkannt)

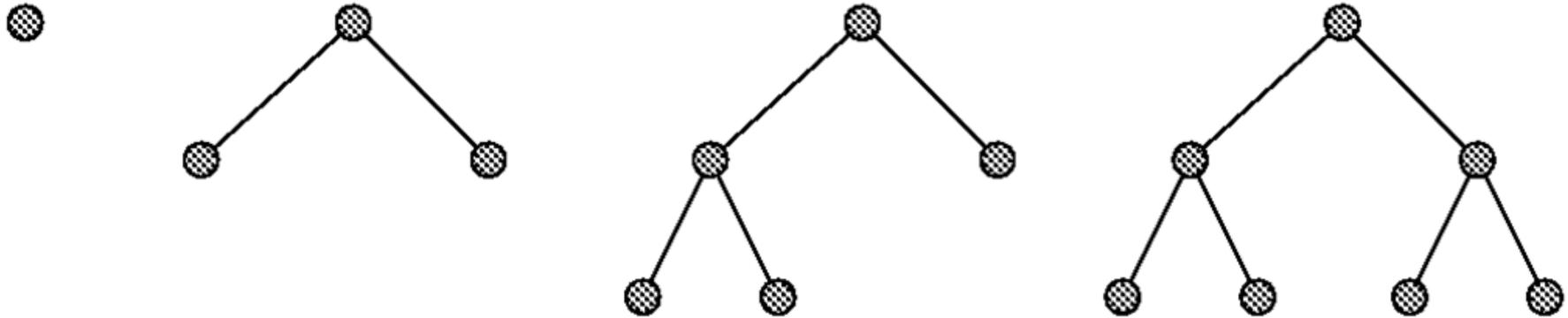
Die wichtigsten Suchstrategien:

1. Breitensuche (breadth-first-search)
2. Tiefensuche (depth-first-search)
3. Bestensuche (best-first-search)

Weitere Infos zum Thema Suchen: Seminarvortrag und Ausarbeitung von Sven Schmidt, SS 2005, Nr. 4
<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Uninformierte Suchstrategien

Breitensuche (breadth-first-search):



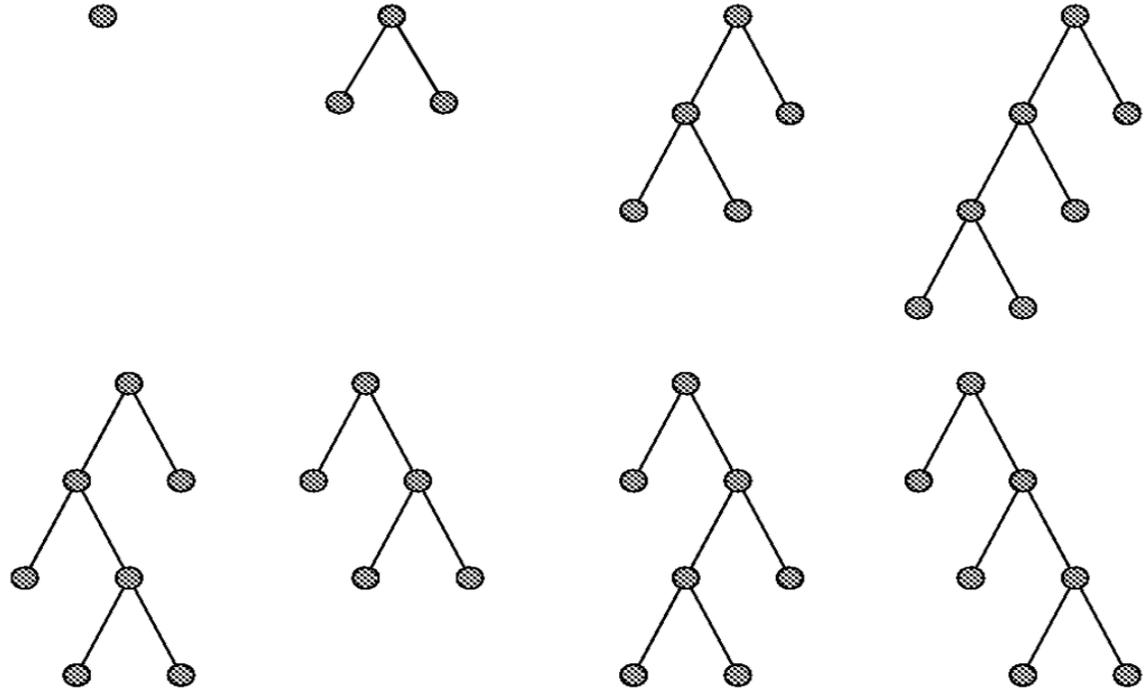
Problemgröße: Tiefe des Suchbaums

Exponentieller Aufwand für Zeit und Platz

Für Suchprobleme in den meisten Fällen nicht relevant

Uninformierte Suchstrategien

Tiefensuche (depth-first-search)



Exponentieller Aufwand für Zeit

Problemgröße: Tiefe des Suchbaums

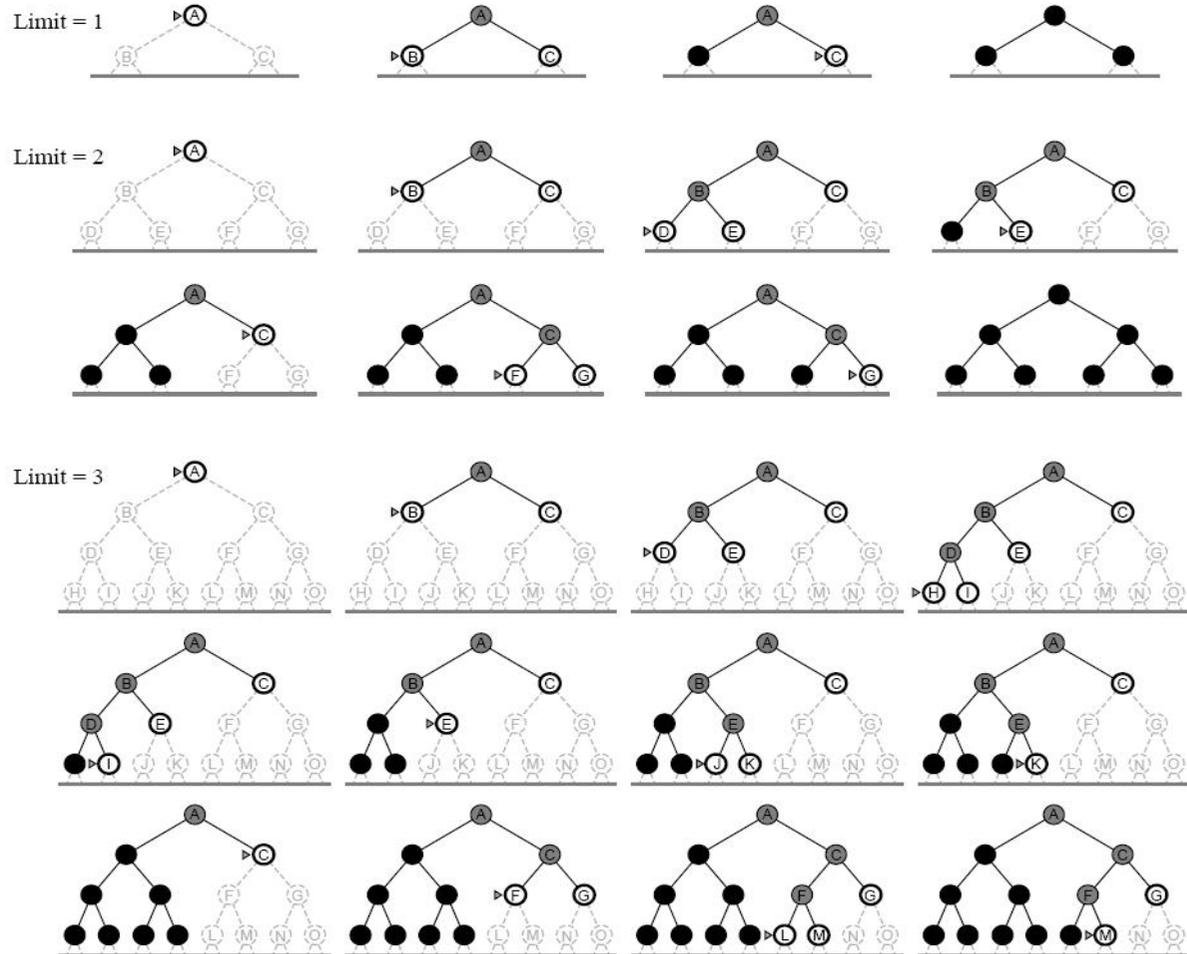
Linearer Aufwand für Platz

Der „Normalfall“ für allgemeine Suchprobleme

Uninformierte Suchstrategien

Beschränkte Tiefensuche

- Tiefensuche wird nur bis zu vorgegebener Suchtiefe durchgeführt.



- Bei Misserfolg kann die Suchtiefe nachträglich erhöht werden und die Tiefensuche neu starten.

Uninformierte Suchstrategien

Bestensuche (best-first-search)

- zusätzlich sei gegeben: Bewertungsfunktion für die Zustände
- Suchziel: Finde die beste Lösung (und dann erst andere).
- Expandiere jeweils den Zustand mit bester Kostenbewertung

→ *Mischung zwischen Tiefen- und Breitensuche*

Im *schlechtesten Fall* ist das nicht besser als Breitensuche:

Exponentieller Aufwand für Zeit und Platz

*Problemgröße:
Tiefe des Suchbaums*

Bei guten Bewertungsfunktionen ist das *Durchschnittsverhalten* viel besser!

Bei speziellen Problemen ist sogar der schlechteste Fall viel besser:

Bsp.: Spezialfall „Kürzeste-Wege-Problem“:

Algorithmus von Dijkstra (**quadratischer** Aufwand für Zeit, **linearer** für Platz)

Problemgröße: Anzahl der Knoten

Uninformierte Suchstrategien

Der Algorithmus von Dijkstra auf kantenbewerteten Graphen

(Spezialfall von Best-First-Search)

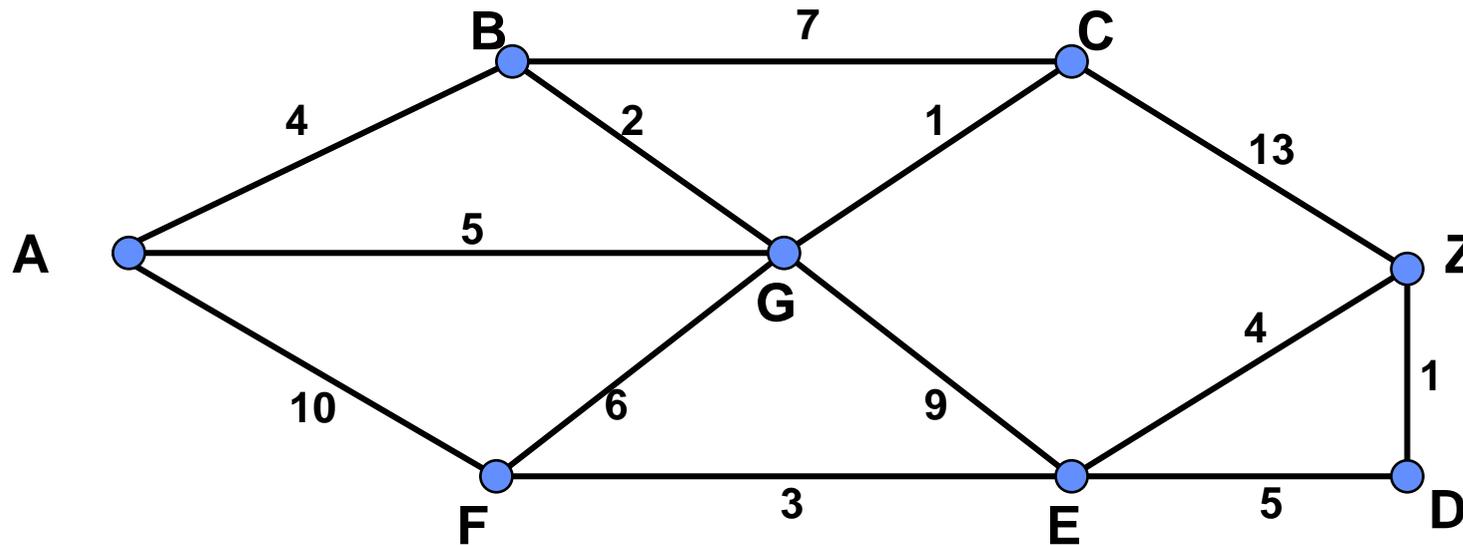
Für alle Kanten (u,v) gibt es Bewertungsfunktion:
 $Länge(u,v) :=$ Länge der Kante von Ecke u nach Ecke v

Voraussetzung an Kantenbewertung: Alle Kantenlängen müssen nichtnegativ sein.

Algorithmus für Suche des Weges von A nach B mit minimaler Kantenlänge:

- In der Menge **Berechnet** sei nur die Ecke A. Markiere A mit $Weglänge(A) := 0$.
In der Menge **Unberechnet** sind alle anderen Ecken des Graphen.
Markiere die Nachbarn N von A mit $Weglänge(N) := Länge(A,N)$
und alle anderen Ecken V mit $Weglänge(V) := \infty$.
 - Wiederhole:
 - Wähle die Ecke V aus **Unberechnet** mit der kleinsten $Weglänge(V)$
und verschiebe sie in die Menge **Berechnet**.
 - Betrachte alle Nachbarn N von V aus **Unberechnet**:
 $Weglänge(N) := \min \{Weglänge(N), Weglänge(V) + Länge(V,N)\}$.
- bis $V = B$

Beispiel für Algorithmus von Dijkstra



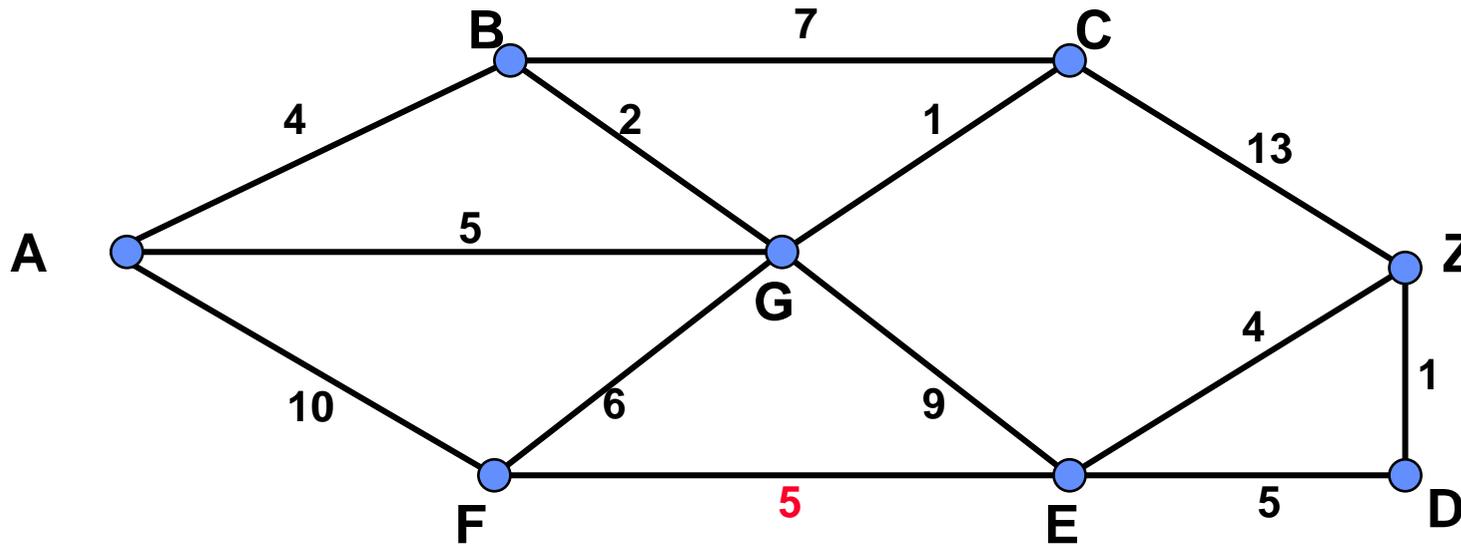
Kürzester Weg von A nach Z: $A \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow Z$ (17 Einheiten)

Animation dieser Aufgabe und weitere Infos zum Algorithmus von Dijkstra:

Seminarvortrag und Ausarbeitung von Alex Prentki, WS 2004, Nr. 14

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/WS2004/SeminarMC.html>

Beispiel für Algorithmus von Dijkstra



Kürzester Weg von G nach Z: G → E → Z (13 Einheiten)

Knoten (Wegstrecke von G, direkter Vorgänger):

A(5,G)

A(5,G)

A(5,G)

B(2,G)

B(2,G)

C(1,G)

D(∞)

→

D(14,E)

E(9,G)

E(9,G)

E(9,G)

E(9,G)

E(9,G)

F(6,G)

F(6,G)

F(6,G)

F(6,G)

Z(14,C)

Z(∞)

Z(14,C)

Z(14,C)

Z(14,C)

Z(14,C)

Z(13,E)

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Gegebene Zusatzinformation:

Schätzfunktion $h(\text{Zustand})$ als Maß für die Entfernung zu einem Zielknoten

- nicht zu aufwändig
- aber genau genug, um Suchfunktion nicht in die Irre zu führen

$h()$ liefert einen positiven Wert: Je kleiner der Wert, desto näher der Zielknoten

Anwendung: „Bergsteigen“

- Spezialform der Tiefensuche
- Es wird genau der Knoten expandiert, der den besten Schätzfunktionswert aufweist
- Beim Aufsteigen im Suchbaum wird der jeweils nächstbeste Knoten expandiert.

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Gegebene Zusatzinformation:

Schätzfunktion $h(\text{Zustand})$ als Maß für die Entfernung zu einem Zielknoten

- nicht zu aufwändig
- aber genau genug, um Suchfunktion nicht in die Irre zu führen

$h()$ liefert einen positiven Wert: Je kleiner der Wert, desto näher der Zielknoten

Anwendung: Optimistisches Bergsteigen

- Spezialform der Tiefensuche
- Es wird nur der Knoten berechnet, der den besten Schätzfunktionswert aufweist
- Zurücksetzen ist nicht möglich: Wenn Schätzfunktion Fehler macht, wird kein Ergebnis gefunden.

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Gegebene Zusatzinformation:

Schätzfunktion $h(\text{Zustand})$ als Maß für die Entfernung zu einem Zielknoten

- nicht zu aufwändig
- aber genau genug, um Suchfunktion nicht in die Irre zu führen

$h()$ liefert einen positiven Wert: Je kleiner der Wert, desto näher der Zielknoten

Anwendung: A*-Verfahren

- Spezialform der Bestensuche
- Es wird genau der Knoten expandiert, bei dem die Summe von Kostenbewertung und Schätzfunktionswert optimal ist.

Weitere Infos für die Anwendung von A* in öffentlichen Verkehrsnetzen:

Seminarvortrag und Ausarbeitung von Stefan Görlich, SS 2005, Nr. 5

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Der A*-Algorithmus auf kantenbewerteten Graphen

(Verallgemeinerung des Algorithmus von Dijkstra) (**Zustandsbewertung = Knotenbewertung**)

Voraussetzung an Kantenbewertung: Alle Kantenlängen müssen nichtnegativ sein

Voraussetzung an Heuristik $h_B(u)$ für die Abschätzung bzgl. Weglänge $w_B(u)$ zum Zielknoten B:

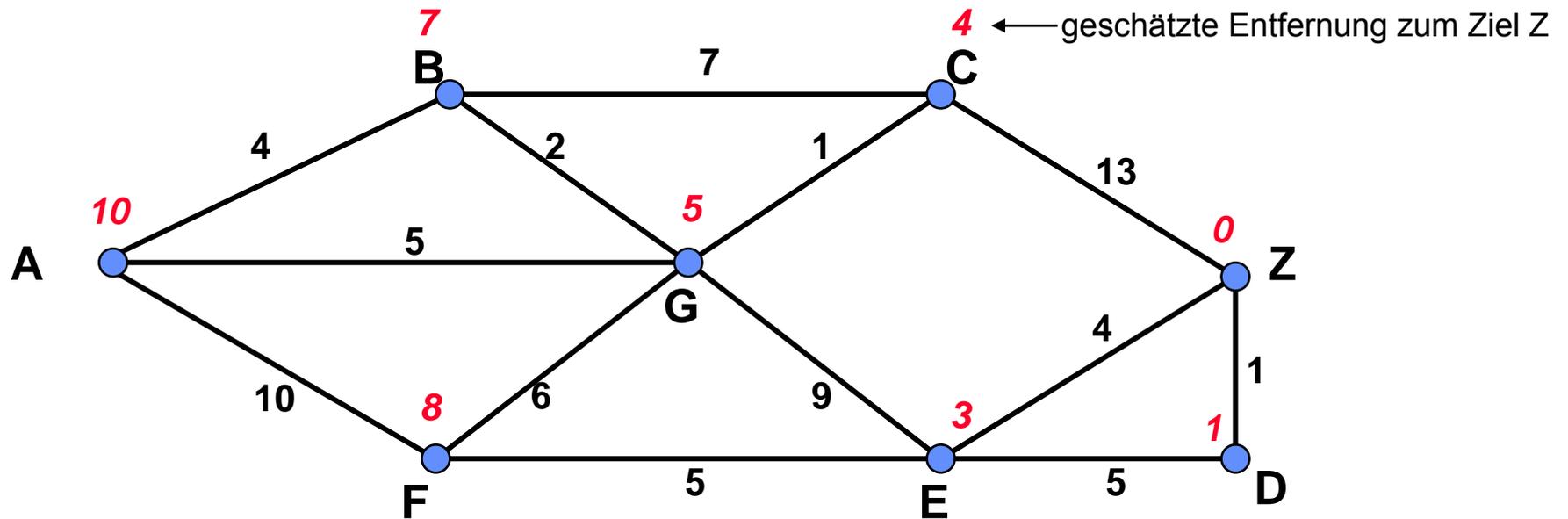
Zulässigkeitsbedingung: $h_B(u) \leq w_B(u)$

Monotoniebedingung: $h_B(u) \leq h_B(v) + \text{Länge}(u,v)$

Algorithmus für Suche des Weges von A nach B mit minimaler Kantenlänge:

- In der Menge **Berechnet** sei nur die Ecke A. Markiere A mit *Weglänge* (A) := 0. In der Menge **Unberechnet** sind alle anderen Ecken des Graphen. Markiere die Nachbarn N von A mit *Weglänge* (N) := *Länge* (A,N)
Schätzung (N) := *Weglänge* (N) + $h_B(N)$
und alle anderen Ecken V mit *Weglänge* (V) := ∞ und *Schätzung* (V) := ∞ .
 - Wiederhole:
 - Wähle die Ecke V aus **Unberechnet** mit der kleinsten *Schätzung* (V) und verschiebe sie in die Menge **Berechnet**.
 - Betrachte alle Nachbarn N von V aus **Unberechnet**:
Weglänge (N) := $\min \{ \text{Weglänge} (N), \text{Weglänge} (V) + \text{Länge} (V,N) \}$.
Schätzung (N) := *Weglänge* (N) + $h_B(N)$ (falls Aktualisierung notwendig).
- bis V = B

Beispiel für A*-Algorithmus



Kürzester Weg von G nach Z: G → E → Z (13 Einheiten)

Knoten (Wegstrecke von G, direkter Vorgänger, Schätzung zum Ziel):

A(5,G,15)		A(5,G,15)		A(5,G,15)		A(5,G,15)
B(2,G,9)		B(2,G,9)				
C(1,G,5)						
D(∞)	→	D(∞)	→	D(∞)	→	D(14,E,15)
E(9,G,12)		E(9,G,12)		E(9,G,12)		
F(6,G,13)		F(6,G,14)		F(6,G,14)		F(6,G,14)
Z(∞)		Z(14,C,14)		Z(14,C,14)		Z(13,E,13)

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Der A*-Algorithmus auf kantenbewerteten Graphen

(Verallgemeinerung des Algorithmus von Dijkstra) (Zustandsbewertung = Knotenbewertung)

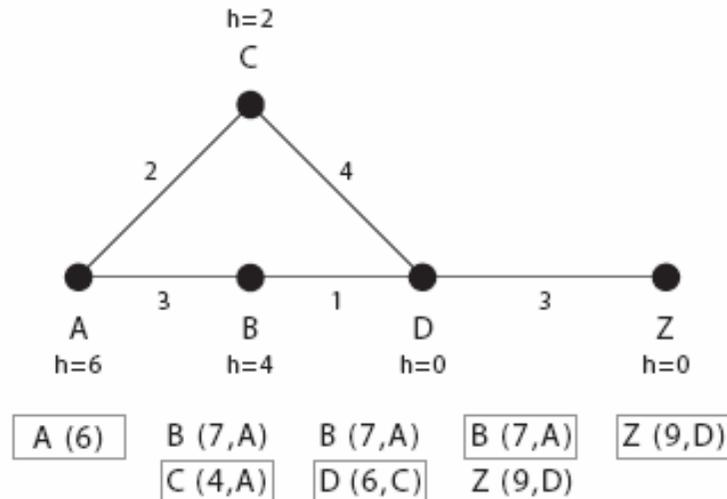
Voraussetzung an Kantenbewertung: Alle Kantenlängen müssen nichtnegativ sein

Voraussetzung an Heuristik $h_B(u)$ für die Abschätzung bzgl. Weglänge $w_B(u)$ zum Zielknoten B:

Zulässigkeitsbedingung: $h_B(u) \leq w_B(u)$

Was passiert bei Wegfall der Monotoniebedingung: $h_B(u) \leq h_B(v) + \text{Länge}(u,v)$

Beispiel:



Aus: Diplomarbeit Andre Keller (SS 2008)

Fehler: D wird nicht mehr aktualisiert, weil es schon in **Berechnet** ist.

Informierte (Heuristische) Suchstrategien

Der A*-Algorithmus auf kantenbewerteten Graphen

(Verallgemeinerung des Algorithmus von Dijkstra) (Zustandsbewertung = Knotenbewertung)

Voraussetzung an Kantenbewertung: Alle Kantenlängen müssen nichtnegativ sein

Voraussetzung an Heuristik $h_B(u)$ für die Abschätzung bzgl. Weglänge $w_B(u)$ zum Zielknoten B:

Nur Zulässigkeitsbedingung: $h_B(u) \leq w_B(u)$

Algorithmus für Suche des Weges von A nach B mit minimaler Kantenlänge:

- In der Menge **Berechnet** sei nur die Ecke A. Markiere A mit *Weglänge* $(A) := 0$.
In der Menge **Unberechnet** sind alle anderen Ecken des Graphen.
Markiere die Nachbarn N von A mit *Weglänge* $(N) := \text{Länge}(A, N)$
Schätzung $(N) := \text{Weglänge}(N) + h_B(N)$
und alle anderen Ecken V mit *Weglänge* $(V) := \infty$ und *Schätzung* $(V) := \infty$.
- Wiederhole:
Wähle die Ecke V aus **Unberechnet** mit der kleinsten *Schätzung* (V)
und verschiebe sie in die Menge **Berechnet**.
Betrachte alle Nachbarn N von V aus **Berechnet** und **Unberechnet**:
Weglänge $(N) := \min \{ \text{Weglänge}(N), \text{Weglänge}(V) + \text{Länge}(V, N) \}$.
Schätzung $(N) := \text{Weglänge}(N) + h_B(N)$ (falls Aktualisierung notwendig).
Falls Aktualisierung bei Nachbarn N^* aus **Berechnet erfolgte:**
Verschiebe N^* wieder nach **Unberechnet.**

bis $V = B$

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Zurücksetzen (Backtracking)

- Teste alle Constraints auch bei unvollständigen Variablenbelegungen
- Zustände, die irgendwelche Constraints bereits verletzen, werden nicht weiter expandiert

Vorwärtstest (Forward Checking)

- Reduziere alle Domains für alle noch nicht belegten Variablen, sodass keine Konflikte zwischen Constraints mehr entstehen.
- Setze zurück, wenn die Domains dadurch leer werden.

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Idee:

- Start mit einer beliebigen Wertebelegung
- Auswählen von Variablen und Zuweisung neuer Werte, die weniger Konflikte verursachen solange, bis System gelöst

Vorteile:

- bei vielen Praxis-Problemen gutes Laufzeitverhalten
- „Reparieren“ bei kleinen Veränderungen des Systems

Nachteile:

- „Hängen bleiben“ in lokalen Minima
 - Gegenmaßnahmen: Random-Walk, Tabu-Liste, ...

Weitere Details zum Thema Constraintsysteme:

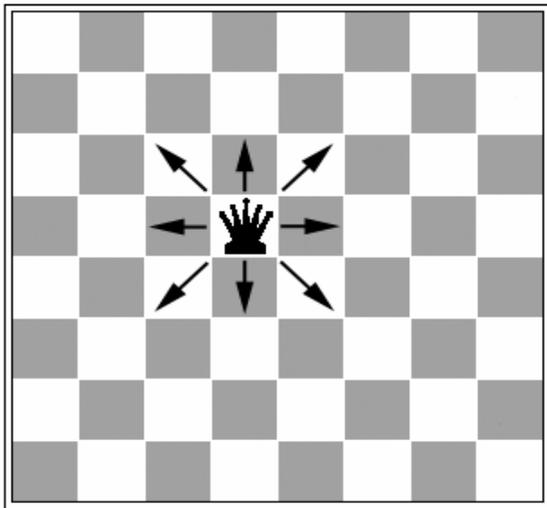
Seminarvortrag und Ausarbeitung von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem

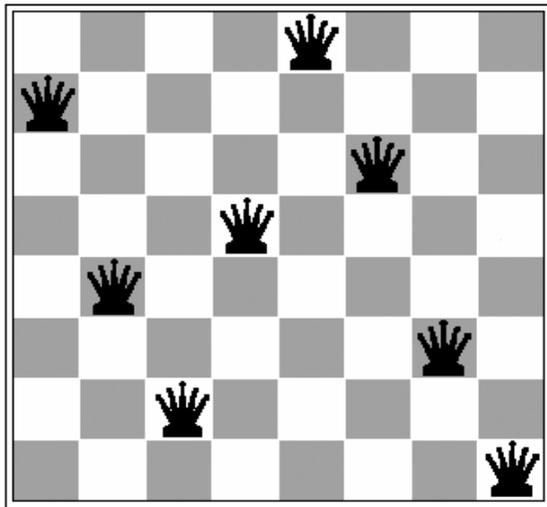


Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,
<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem

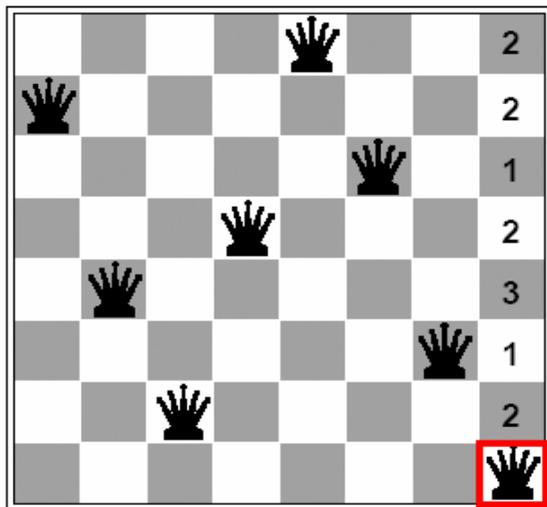


Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,
<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem

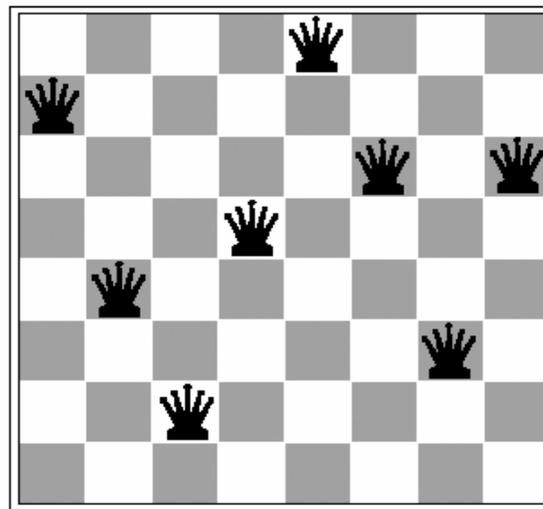
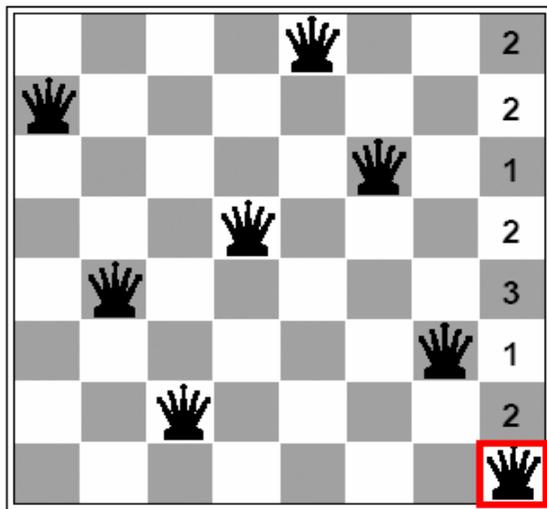


Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,
<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem



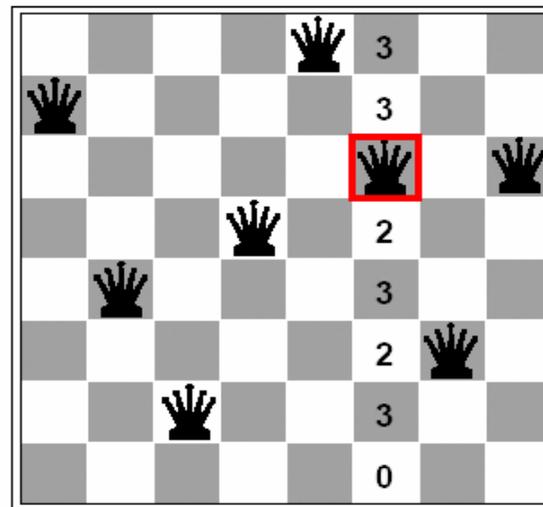
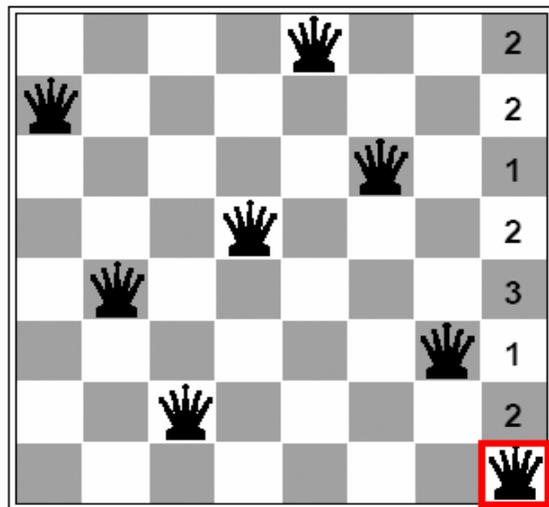
Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem



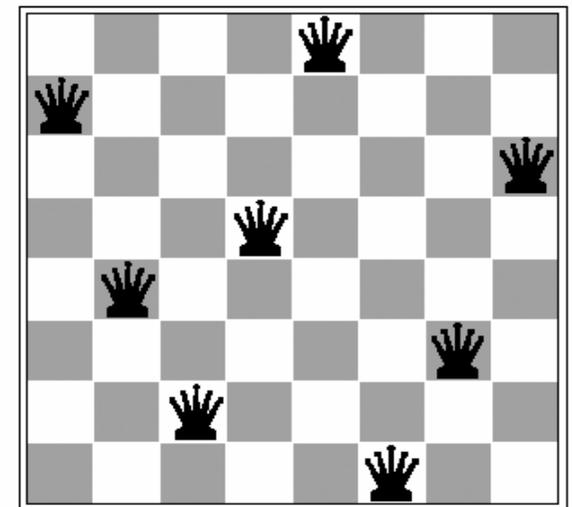
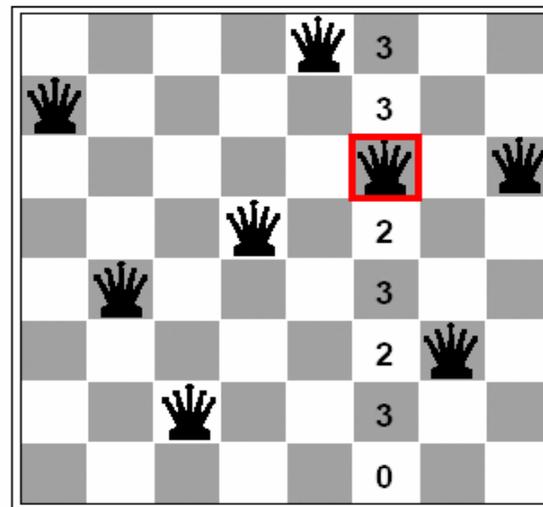
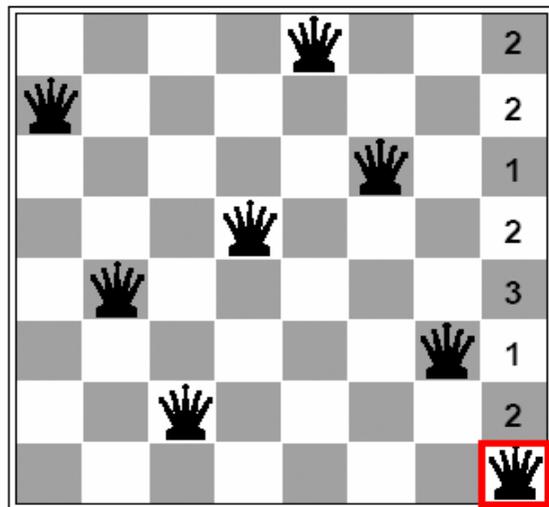
Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>

Allgemeine Optimierungsverfahren für CSP

Verfahren der minimalen Konflikte (Min-Conflicts)

Anwendungsbeispiel: 8-Damen-Problem



Quelle: Seminarvortrag von Stefan Schmidt, SS 2005, Nr. 6,

<http://www.fh-wedel.de/Archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2005/SeminarKI.html>