Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

33. Handlungsplanung: Delete-Relaxierungs-Heuristiken

Malte Helmert

Universität Basel

9. Mai 2014

Handlungsplanung: Überblick

Kapitelüberblick:

- 30. Einführung
- 31. Planungsformalismen
- 32.–33. Planungsheuristiken: Delete-Relaxierung
  - 32. Delete-Relaxierung
  - 33. Delete-Relaxierungs-Heuristiken
- 34.–35. Planungsheuristiken: Abstraktion
- 36.–37. Planungsheuristiken: Landmarken

Relaxierte Planungsgraphen

Relaxierte Planungsgraphen

- relaxierte Planungsgraphen: repräsentieren, welche Variablen in Π^+ wie erreicht werden können
- Graphen mit Variablenebenen V^i und Aktionsebenen A^i
  - Variablenebene V^0 enthält Knoten v^0 für jedes $v \in I$
  - Aktionsebene A^{i+1} enthält Knoten a^{i+1} für Aktion a, wenn V^i den Knoten v^i für alle $v \in pre(a)$ enthält
  - Variablenebene V^{i+1} enthält Knoten v^{i+1} wenn vorige Variablenebene v^i enthält oder vorige Aktionsebene ein a^{i+1} mit $v \in add(a)$ enthält

Relaxierte Planungsgraphen (Fortsetzung)

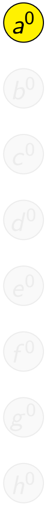
- Zielknoten G^i, wenn $v^i \in V^i$ für alle $v \in G$
- Graph kann für beliebig viele Ebenen konstruiert werden, wird aber nach endlich vielen Ebenen stabil
  $\rightsquigarrow V^{i+1} = V^i$ und $A^{i+1} = A^i$ (Warum?)
- gerichtete Kanten:
  - von v^i zu a^{i+1} wenn $v \in pre(a)$ (Vorbedingungskanten)
  - von a^i zu v^i, wenn $v \in add(a)$ (Effektkanten)
  - von v^i zu G^i, wenn $v \in G$ (Zielkanten)
  - von v^i zu v^{i+1} (No-Op-Kanten)

Illustrierendes Beispiel

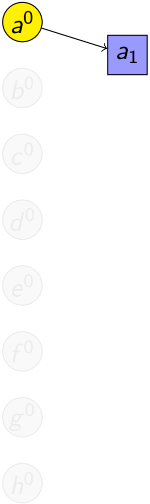
Schreibe im Folgenden Aktionen a mit $pre(a) = \{p_1, \ldots, p_k\}$, $add(a) = \{a_1, \ldots, a_l\}$, $del(a) = \emptyset$ und $cost(a) = c$ als $\langle p_1, \ldots, p_k \to a_1, \ldots, a_l \rangle_c$

$$
\begin{aligned}
V &= \{a, b, c, d, e, f, g, h\} \\
I &= \{a\} \\
G &= \{c, d, e, f, g\} \\
A &= \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \\
a_1 &= \langle a \to b, c \rangle_3 \\
a_2 &= \langle a, c \to d \rangle_1 \\
a_3 &= \langle b, c \to e \rangle_1 \\
a_4 &= \langle b \to f \rangle_1 \\
a_5 &= \langle d \to e, f \rangle_1 \\
a_6 &= \langle d \to g \rangle_1
\end{aligned}
$$

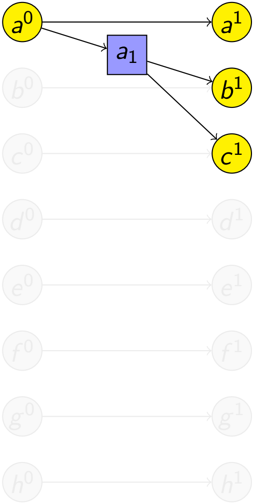
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



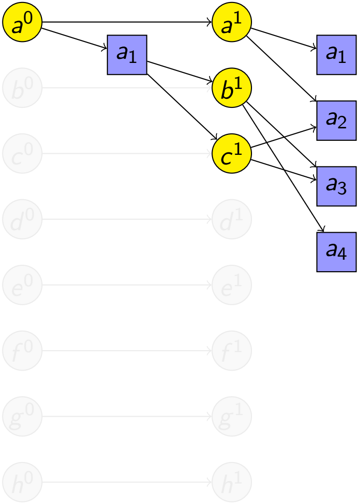
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



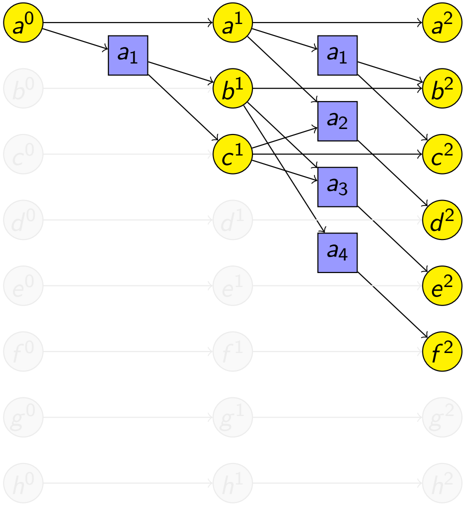
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



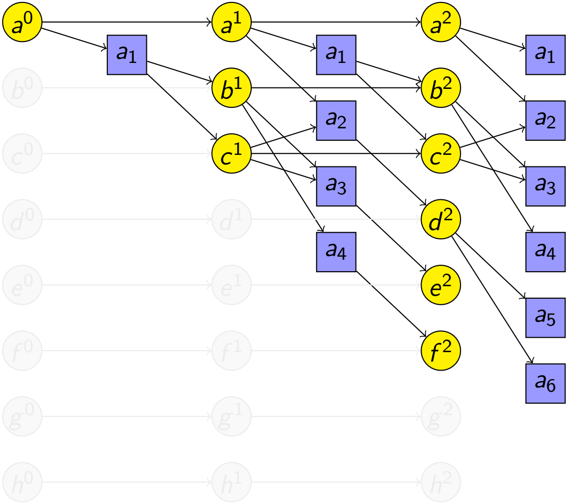
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



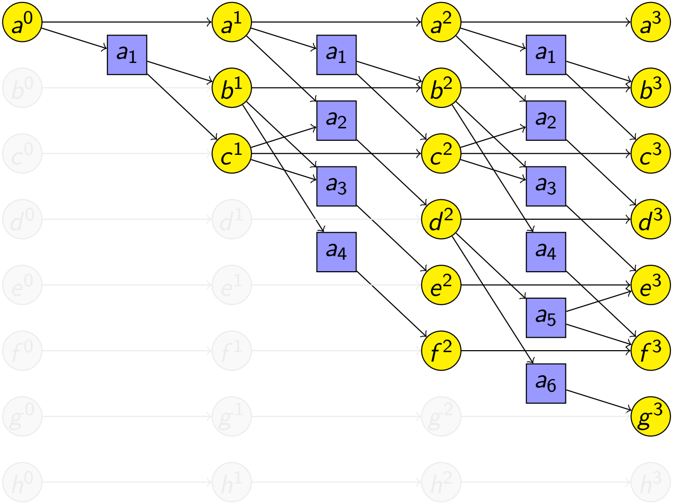
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



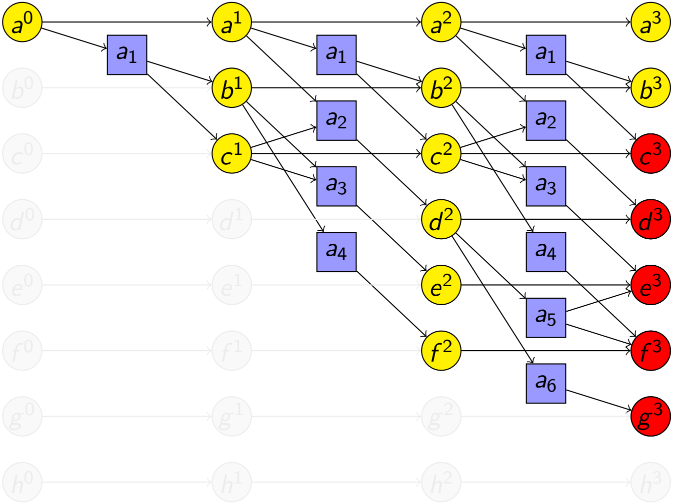
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



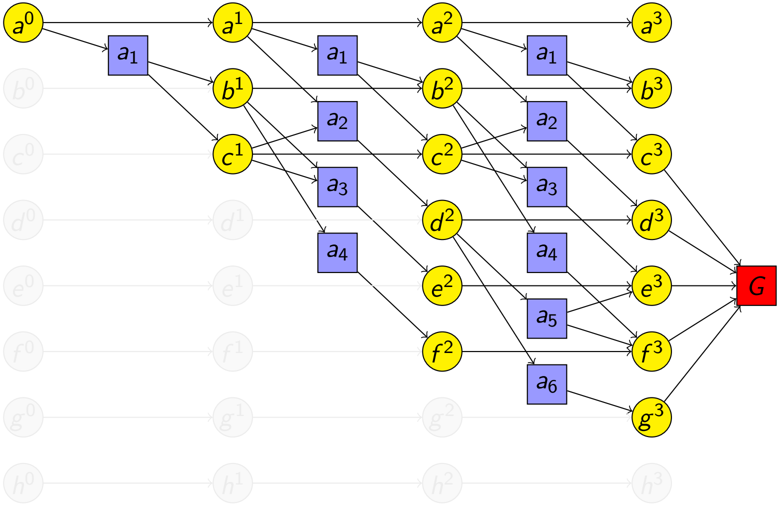
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



Generische Relaxierter-Planungsgraph-Heuristik

Heuristikwerte aus relaxierten Planungsgraphen

function *generic-rpg-heuristic*($\langle V, I, G, A \rangle, s$):
    $\Pi^+ := \langle V, s, G, A^+ \rangle$
    for $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$:
        $rpg := RPG_k(\Pi^+)$ [relaxed planning graph to layer k]
        if *rpg* contains a goal node:
            Annotate nodes of *rpg*.
            if termination criterion is true:
                return heuristic value from annotations
        else if graph has stabilized:
            return ∞

- $\rightsquigarrow$ allgemeines Muster für RPG-Heuristiken
- $\rightsquigarrow$ für konkrete Heuristik: hervorgehobene Stellen ausfüllen

Konkrete Beispiele für die generische RPG-Heuristik

Viele Planungsheuristiken passen in dieses allgemeine Muster.

In dieser Vorlesung:

- Maximums-Heuristik h^{max} (Bonet & Geffner, 1999)
- additive Heuristik h^{add} (Bonet, Loerincs & Geffner, 1997)
- FF-Heuristik h^{FF} (Hoffmann & Nebel, 2001) in der Variante von Keyder & Geffner (2008)

Anmerkung:

- Die effizientesten Implementierungen dieser Heuristiken verwenden keine relaxierten Planungsgraphen, sondern alternative (äquivalente) Definitionen.

Maximums- und additive Heuristik

Maximums- und additive Heuristik

- $h^{\max}$ und h^{add} sind die einfachsten RPG-Heuristiken
- Knotenannotationen sind Kostenwerte (= Zahlen)
- Die Kosten eines Knoten schätzen, wie teuer es ist,
  - eine gegebene Variable wahr zu machen
  - eine gegebene Aktion zu erreichen und auszuführen
  - das Ziel zu erreichen

Maximums- und additive Heuristik: ausgefülltes Muster

$h^{\max}$ und h^{add}

Berechnung der Annotationen:

- Kosten von Variablenknoten:
  0 in Ebene 0; sonst Minimum der Kosten der Vorgängerknoten
- Kosten von Aktions- und Zielknoten:
  Maximum ($h^{\max}$) bzw. Summe (h^{add})
  der Kosten der Vorgängerknoten;
  bei Aktionsknoten a^i addiere zusätzlich $cost(a)$

Terminierungskriterium:

- Stabilität: terminiere, wenn $V^i = V^{i-1}$ und Kosten aller Knoten in V^i gleich Kosten entsprechender Knoten in V^{i-1}

Heuristikwert:

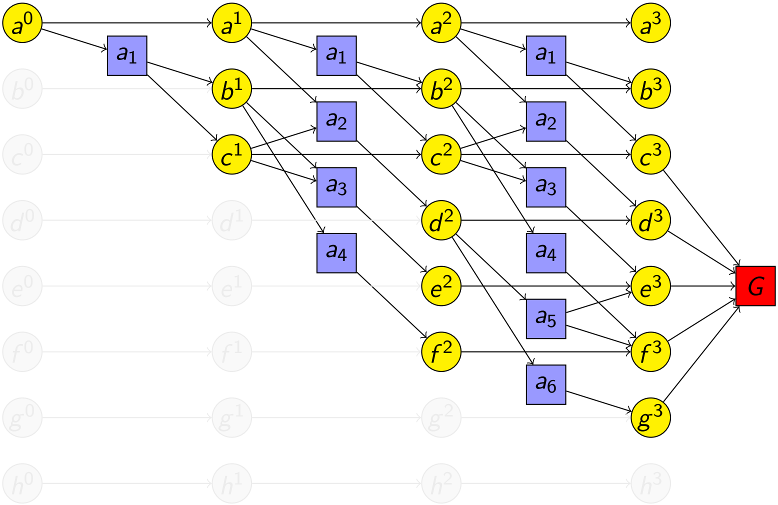
- der Wert des Zielknotens in der letzten Ebene

Maximums- und additive Heuristik: Intuition

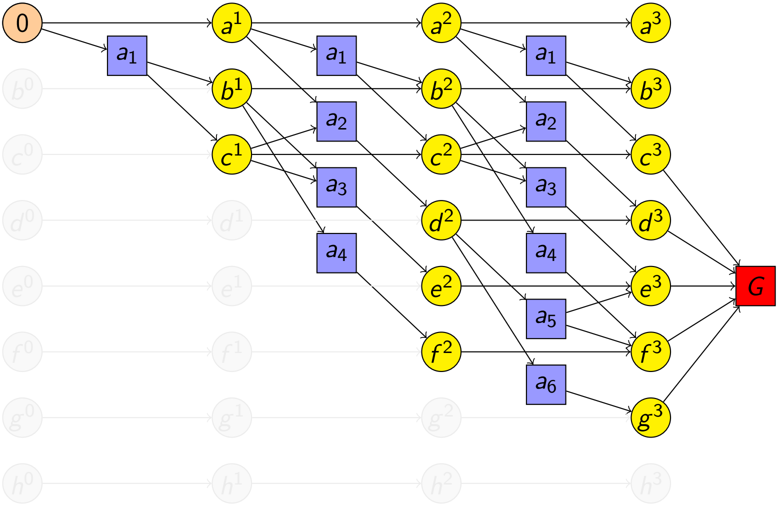
Intuition:

- Variablenknoten:
  - wähle billigste Möglichkeit, die Variable zu erreichen
- Aktionsknoten/Zielknoten:
  - $h^{\max}$ ist optimistisch:
    wenn wir die teuerste Vorbedingung erreichen,
    können wir nebenbei die anderen Vorbedingungen erreichen
    (daher Maximierung über Kosten)
  - h^{add} ist pessimistisch:
    alle Bedingungen müssen komplett unabhängig voneinander
    erreicht werden (daher Summierung über Kosten)

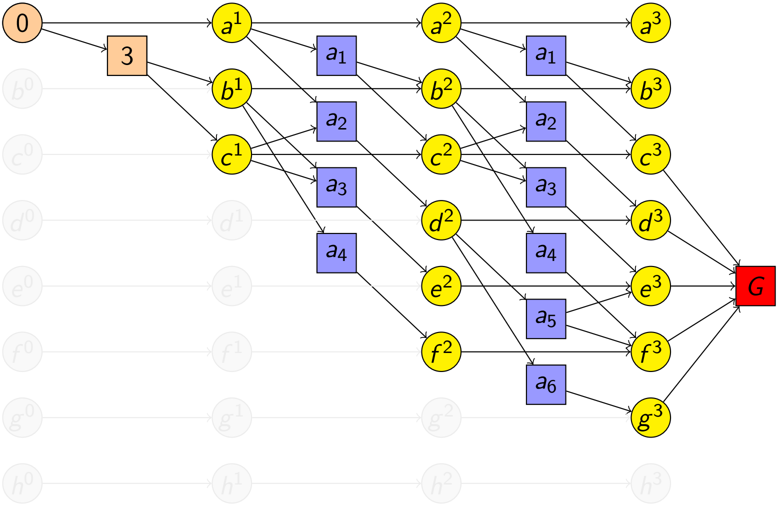
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



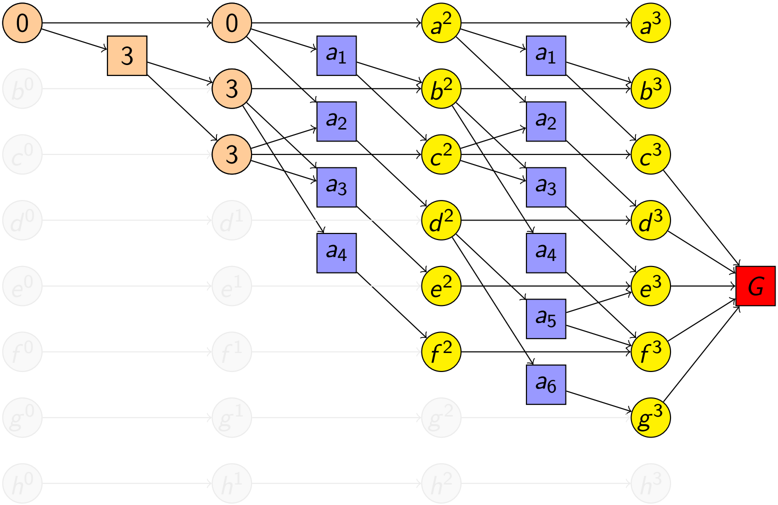
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



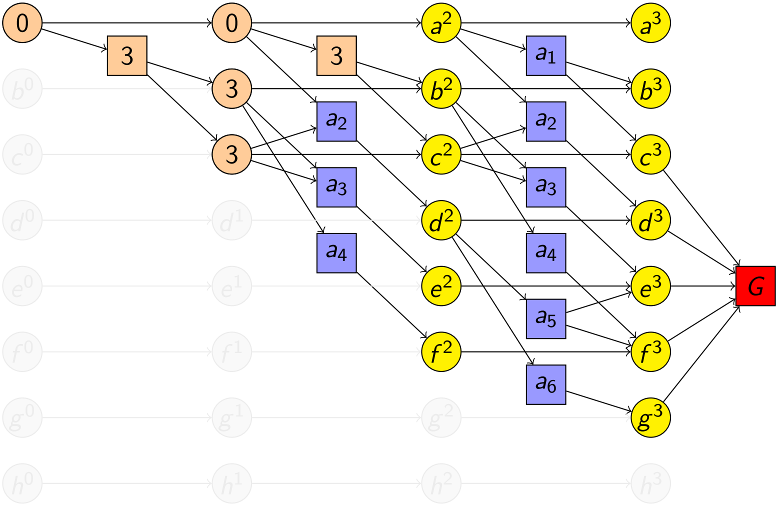
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



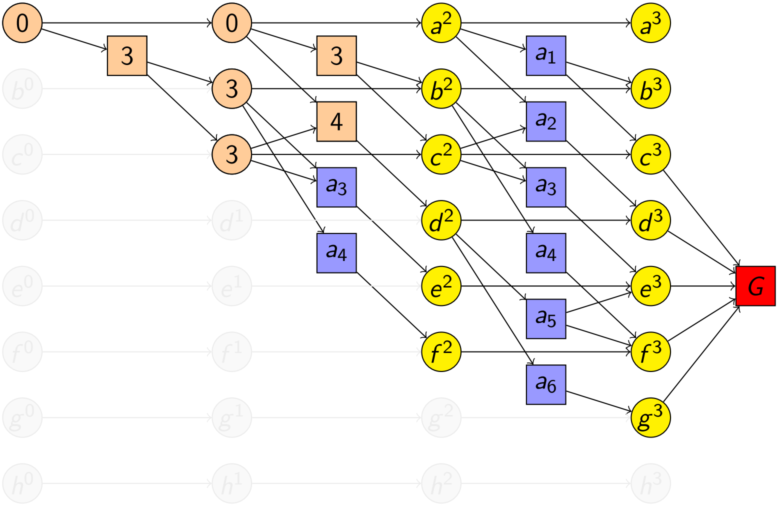
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



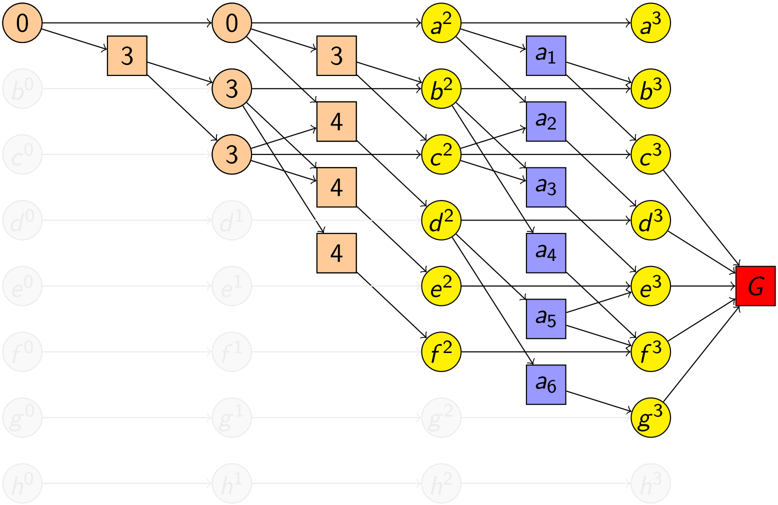
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



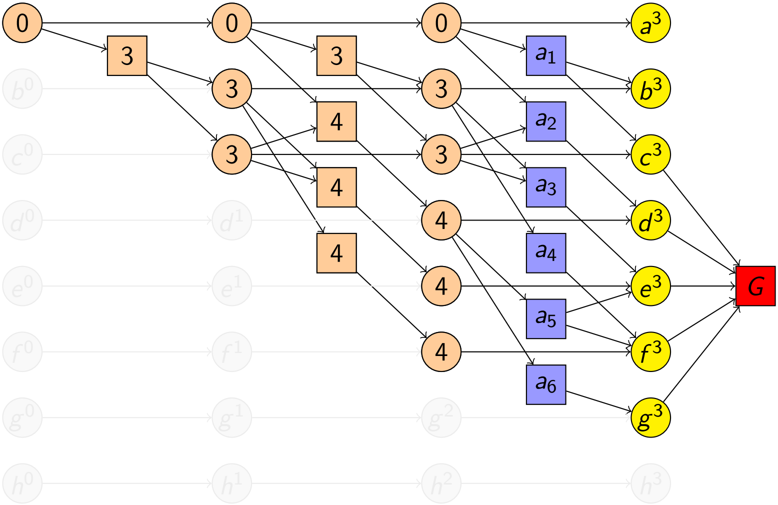
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



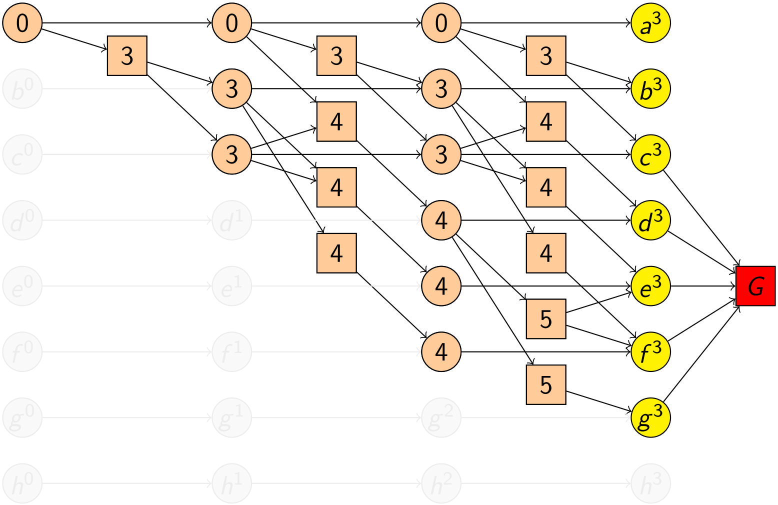
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



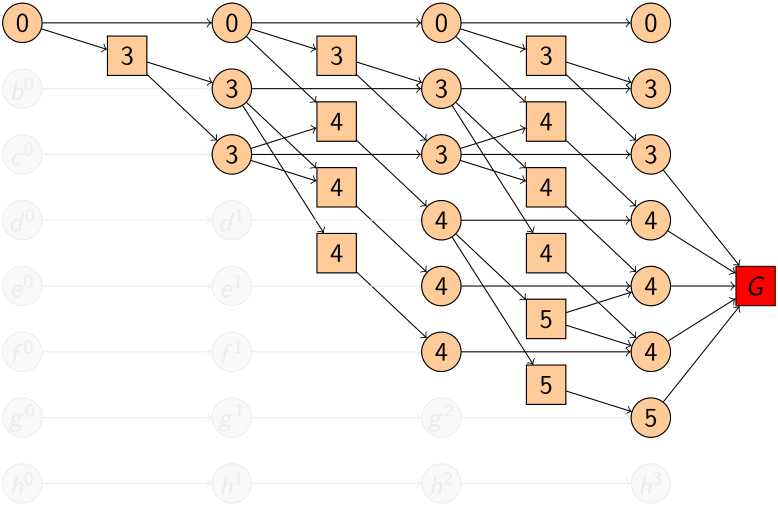
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



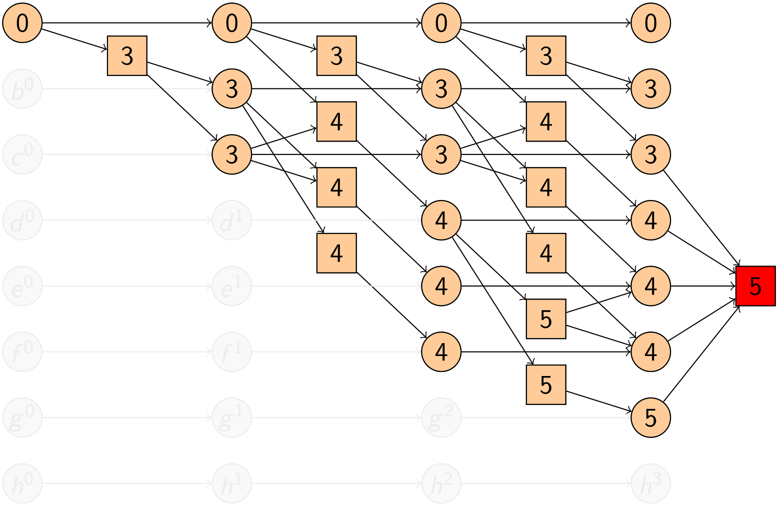
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$

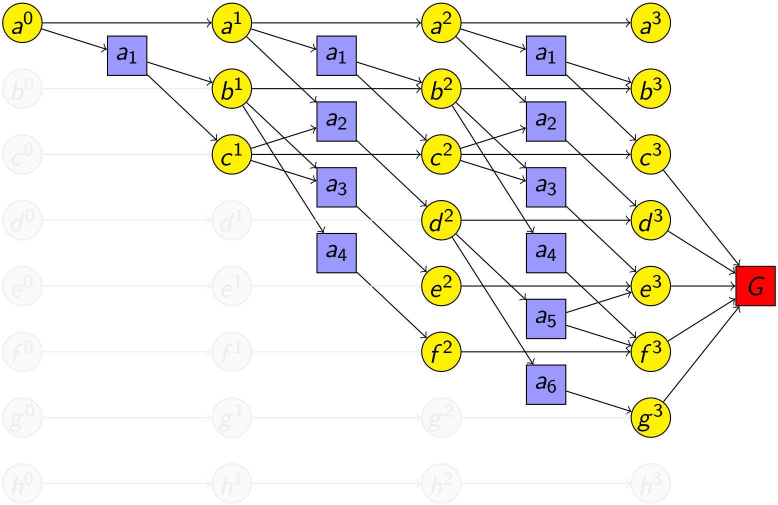


Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$

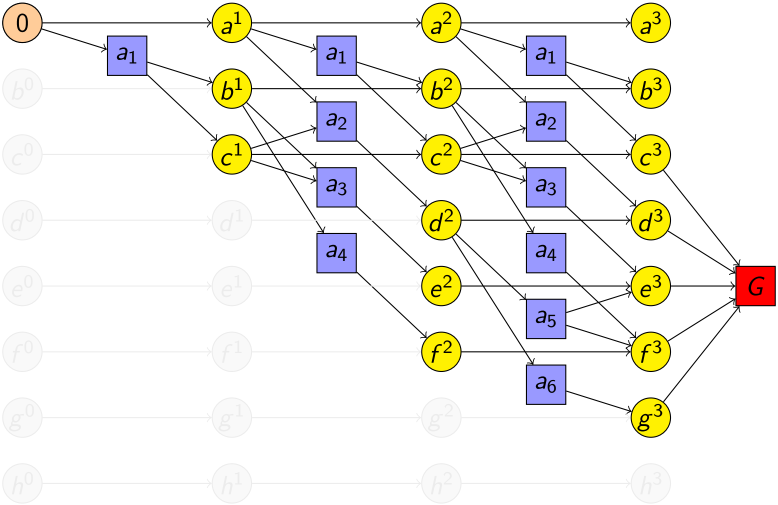


$$h^{\max}(\{a\}) = 5$$

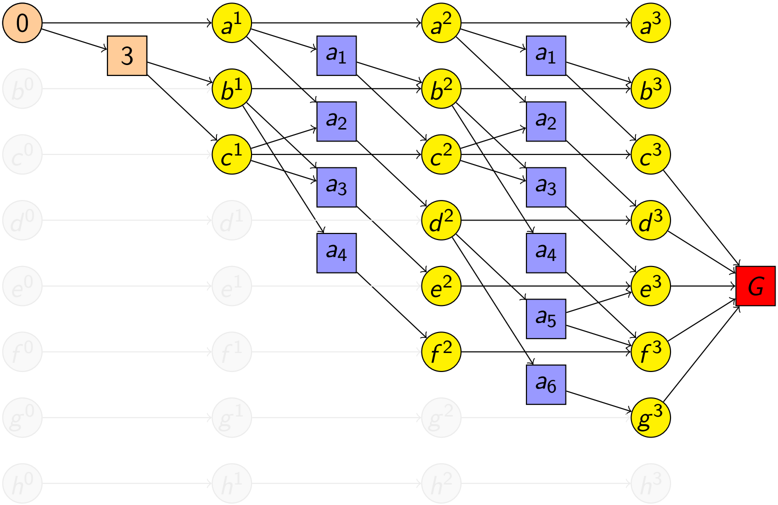
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



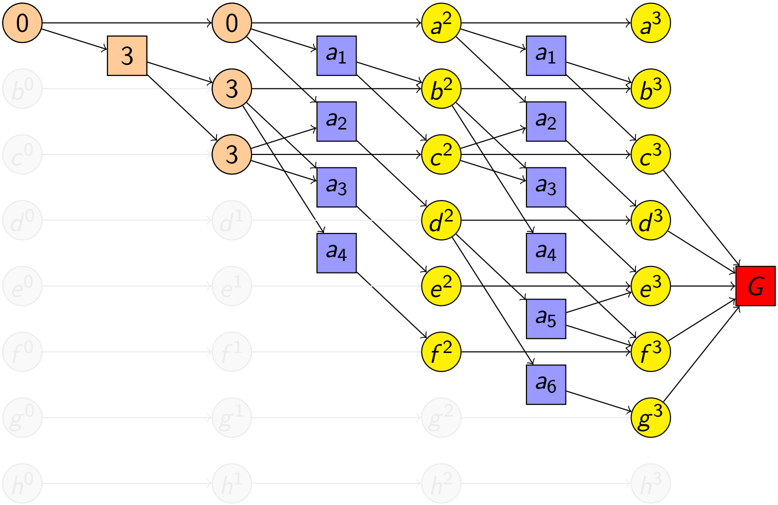
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



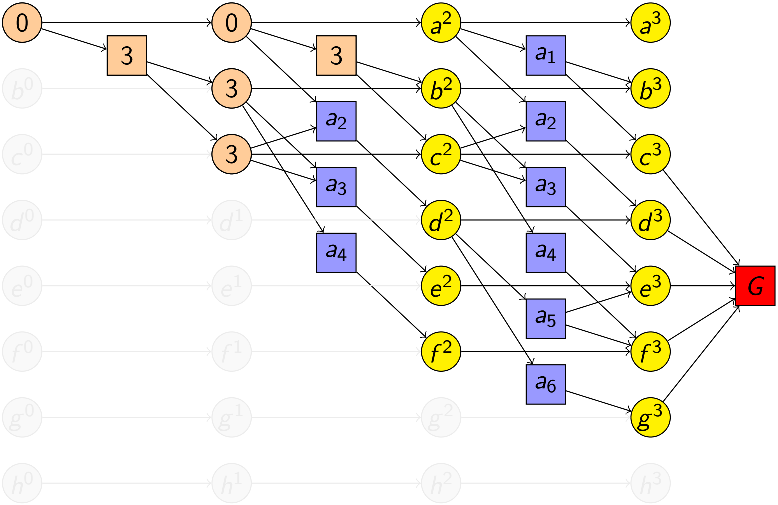
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



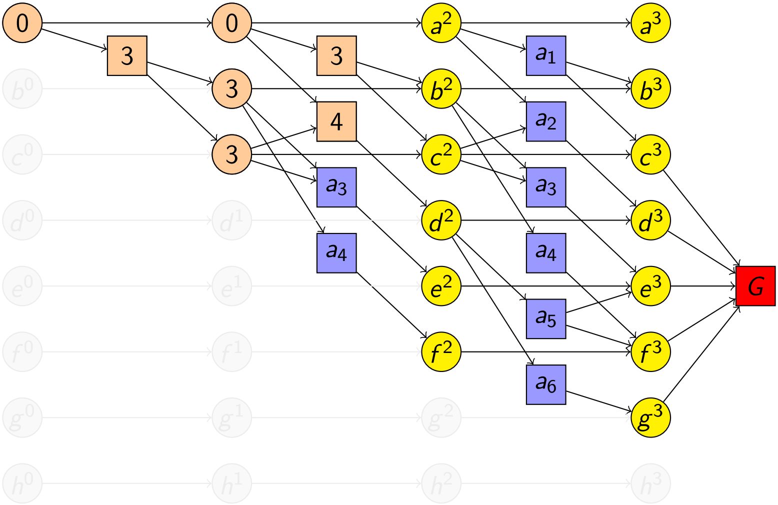
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



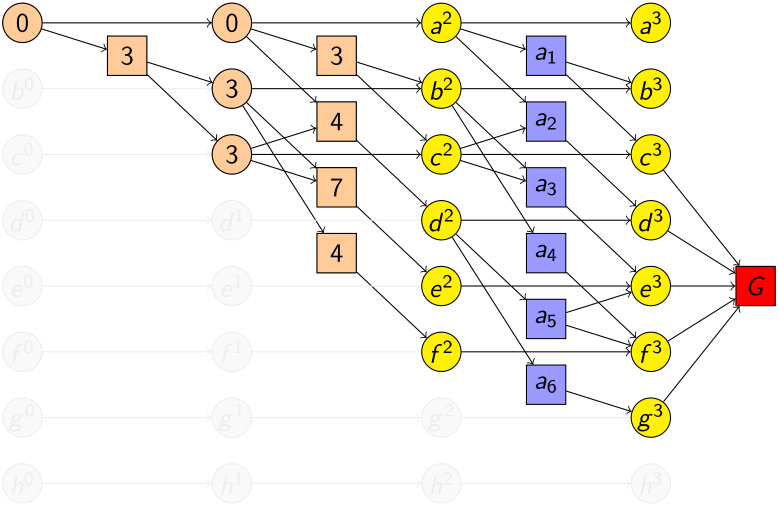
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



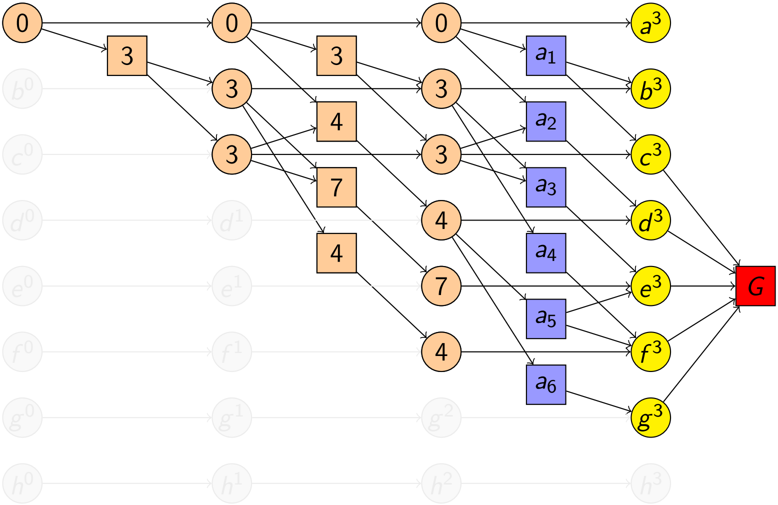
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



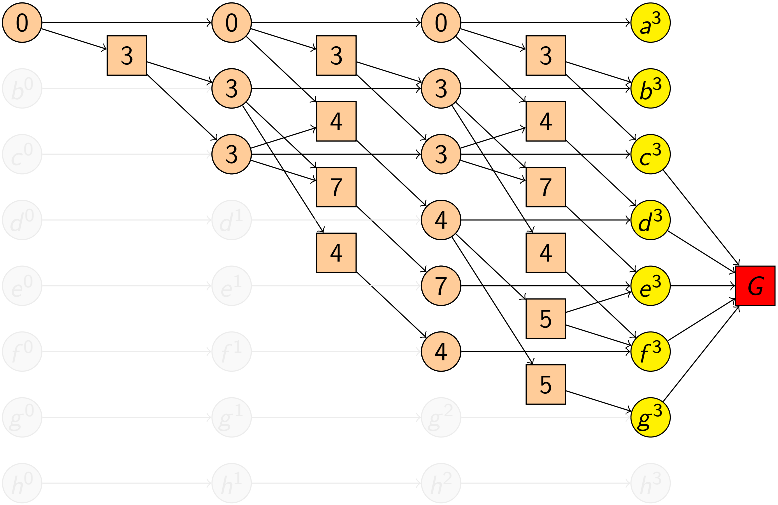
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



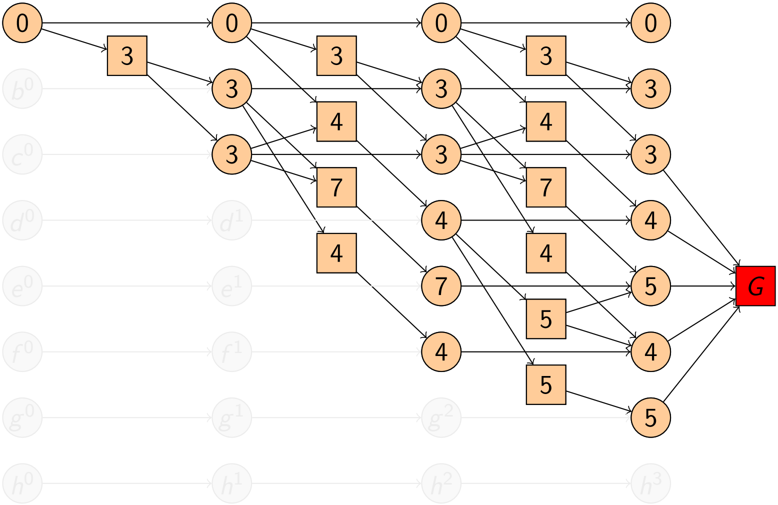
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



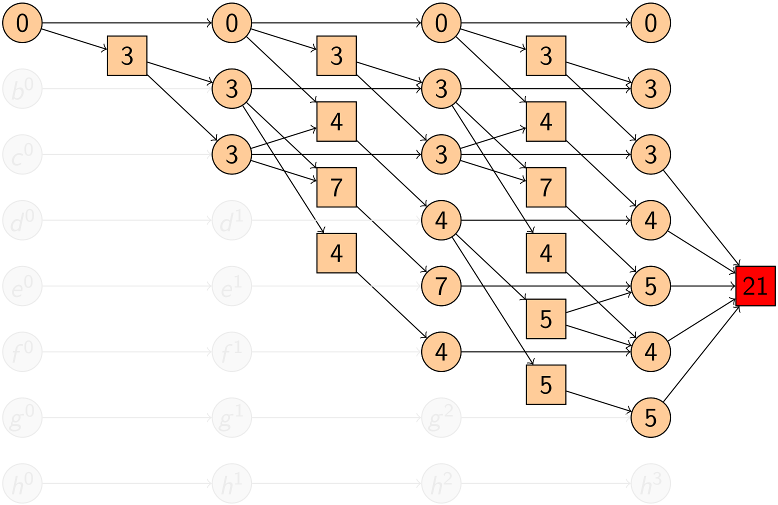
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



Illustrierendes Beispiel: h^{add}



Illustrierendes Beispiel: h^{add}



$$h^{\text{add}}(\{a\}) = 21$$

Bemerkungen zu $h^{\max}$ und h^{add}

Vergleich von $h^{\max}$ und h^{add}:

- beide sind sicher und zielerkennend
- $h^{\max}$ ist zulässig und konsistent; h^{add} nicht

$\rightsquigarrow$ h^{add} nicht für optimale Handlungsplanung geeignet

Bemerkungen zu $h^{\max}$ und h^{add}

Vergleich von $h^{\max}$ und h^{add}:

- beide sind sicher und zielerkennend
- $h^{\max}$ ist zulässig und konsistent; h^{add} nicht

$\rightsquigarrow$ h^{add} nicht für optimale Handlungsplanung geeignet

- Dafür ist h^{add} meist sehr viel informativer als $h^{\max}$.
  Gierige Bestensuche mit h^{add} ist ein brauchbarer Algorithmus.

Bemerkungen zu $h^{\max}$ und h^{add}

Vergleich von $h^{\max}$ und h^{add}:

- beide sind sicher und zielerkennend
- $h^{\max}$ ist zulässig und konsistent; h^{add} nicht

$\rightsquigarrow$ h^{add} nicht für optimale Handlungsplanung geeignet

- Dafür ist h^{add} meist sehr viel informativer als $h^{\max}$.
  Gierige Bestensuche mit h^{add} ist ein brauchbarer Algorithmus.
- Neben der mangelnden Zulässigkeit ist ein Problem von h^{add},
  dass es oft sehr stark die Kosten überschätzt,
  weil es positive Synergien zwischen Teilzielen nicht erkennt.

Bemerkungen zu $h^{\max}$ und h^{add}

Vergleich von $h^{\max}$ und h^{add}:

- beide sind sicher und zielerkennend
- $h^{\max}$ ist zulässig und konsistent; h^{add} nicht

$\rightsquigarrow$ h^{add} nicht für optimale Handlungsplanung geeignet

- Dafür ist h^{add} meist sehr viel informativer als $h^{\max}$.
  Gierige Bestensuche mit h^{add} ist ein brauchbarer Algorithmus.
- Neben der mangelnden Zulässigkeit ist ein Problem von h^{add},
  dass es oft sehr stark die Kosten überschätzt,
  weil es positive Synergien zwischen Teilzielen nicht erkennt.

$\rightsquigarrow$ FF-Heuristik

FF-Heuristik

FF-Heuristik

Die FF-Heuristik

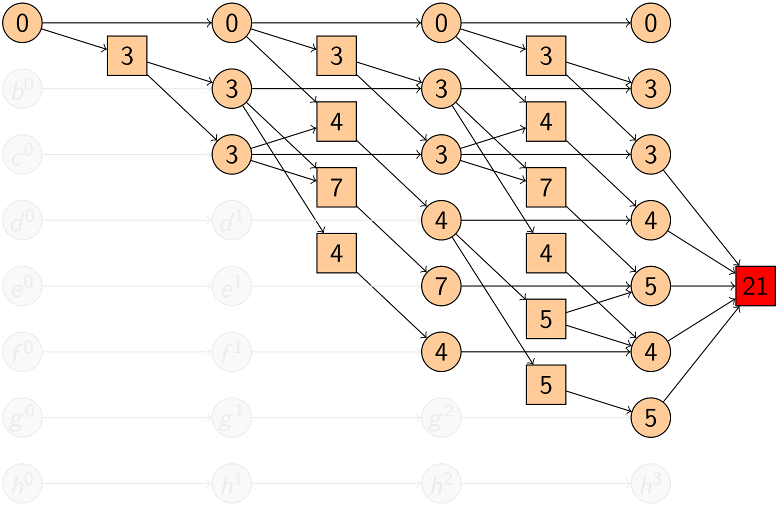
identisch zu h^{add}, aber zusätzliche Schritte am Ende:

- Markiere Zielknoten der letzten Graphebene.
- Wende folgende Markierungsregeln an, bis nichts mehr zu tun:
  - Aktions- oder Zielknoten markiert?
    $\rightsquigarrow$ markiere alle Vorgänger
  - Variablenknoten v^i in Ebene $i \geq 1$ markiert?
    $\rightsquigarrow$ markiere einen Vorgänger mit minimalem h^{add}-Wert
    (Tie-Breaking: bevorzuge Variablenknoten; sonst beliebig)

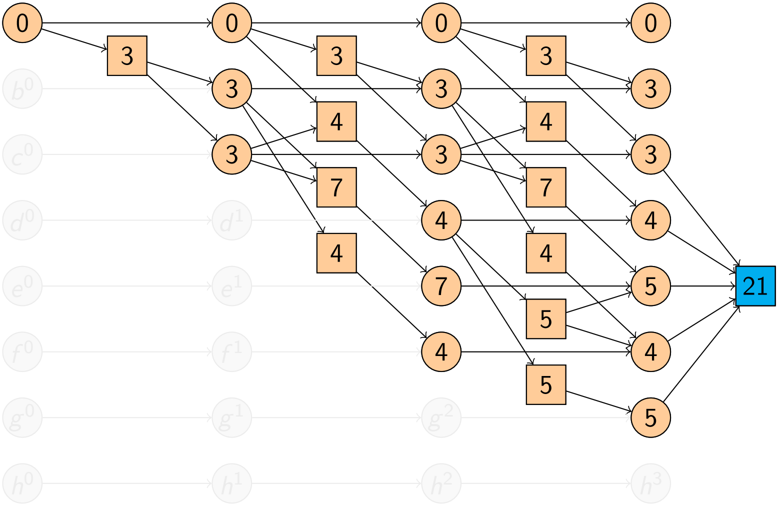
Heuristikwert:

- Die zu den markierten Aktionsknoten gehörigen Aktionen bilden einen relaxierten Plan.
- Die Kosten dieses Plans bilden den Heuristikwert.

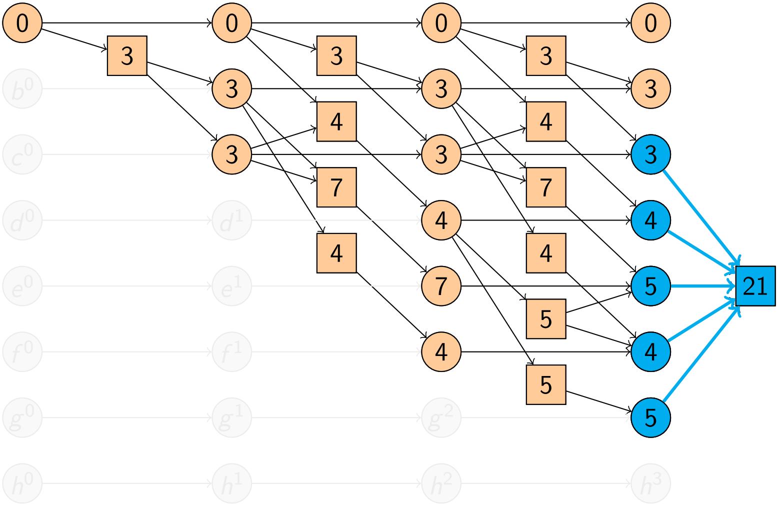
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



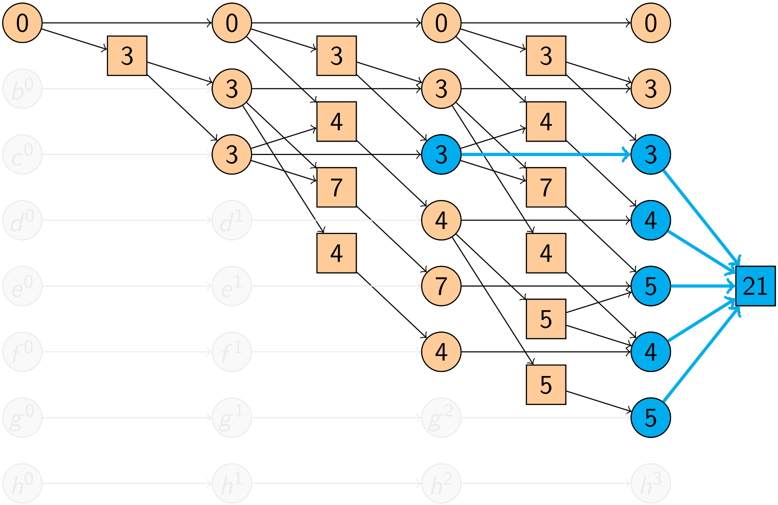
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



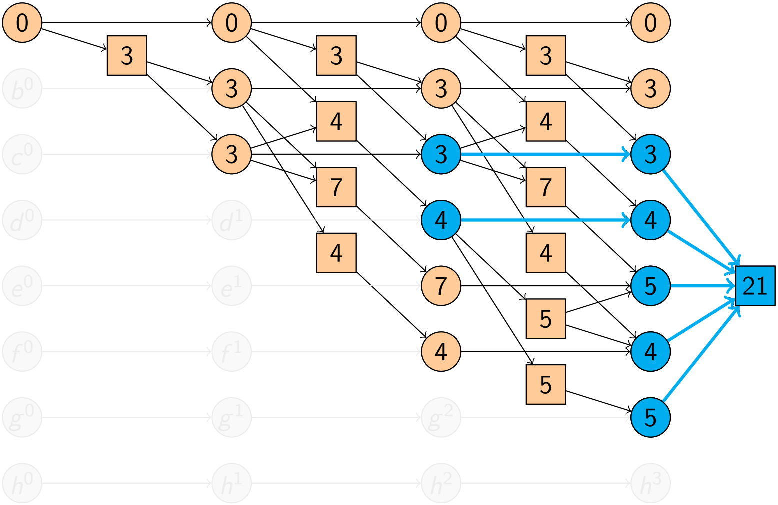
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



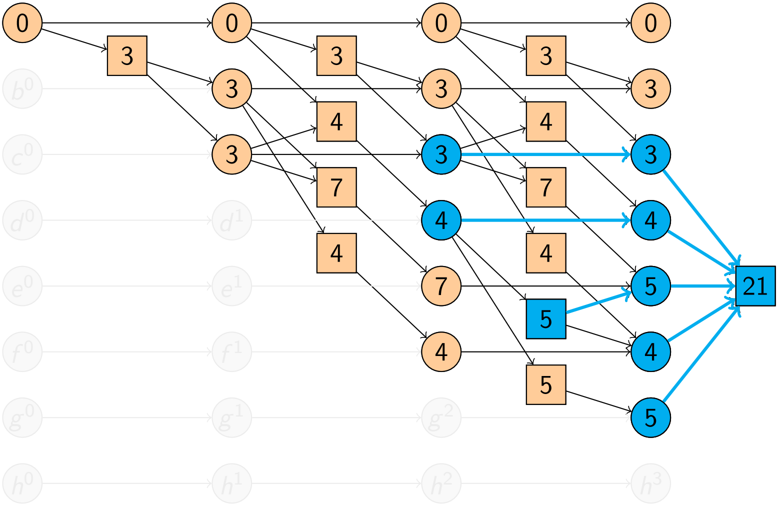
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



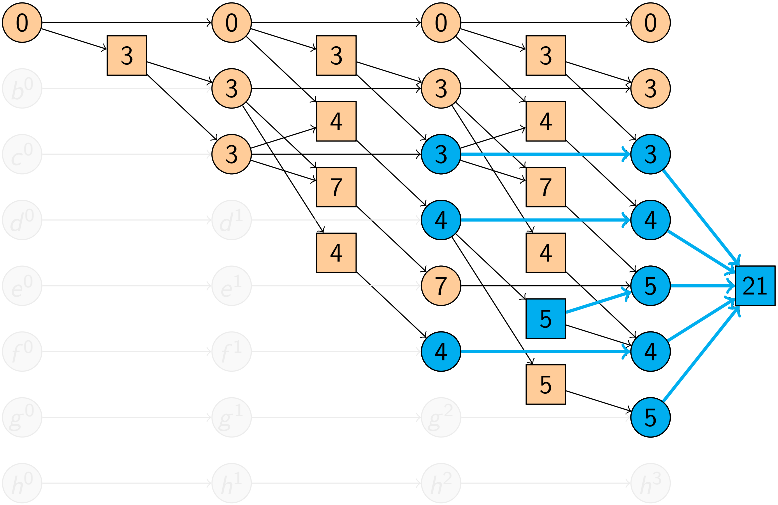
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



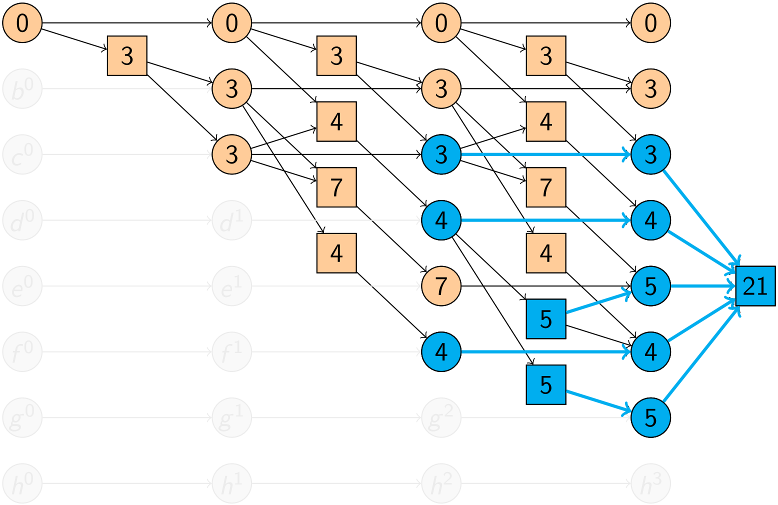
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



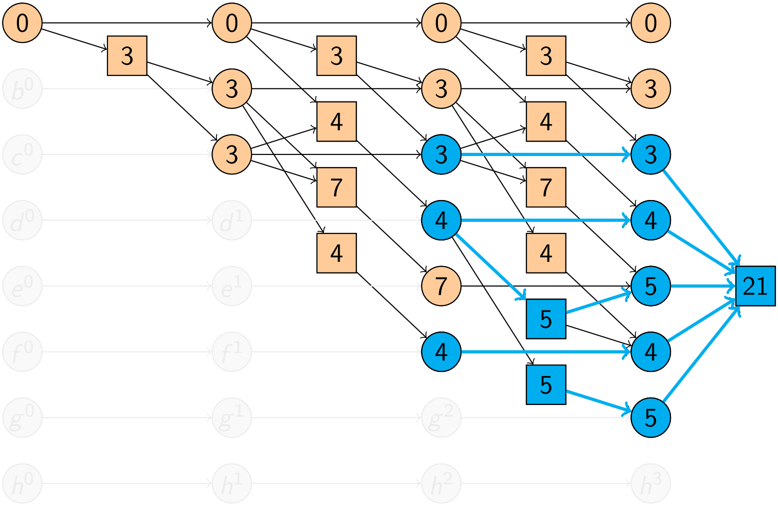
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



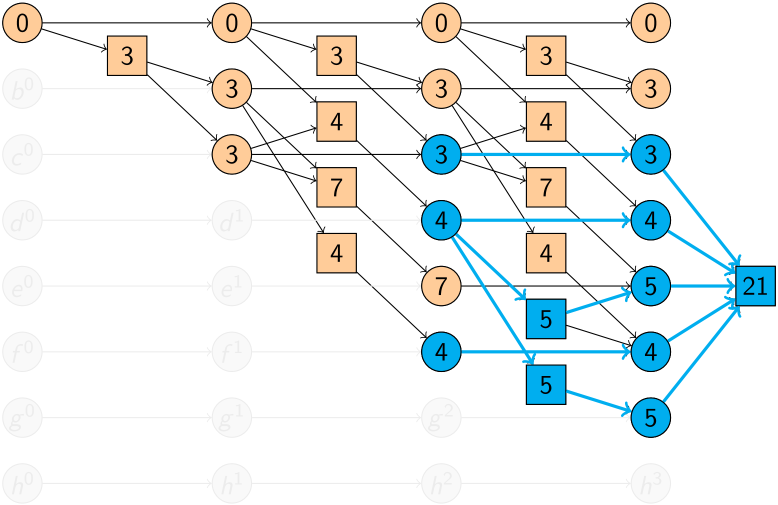
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



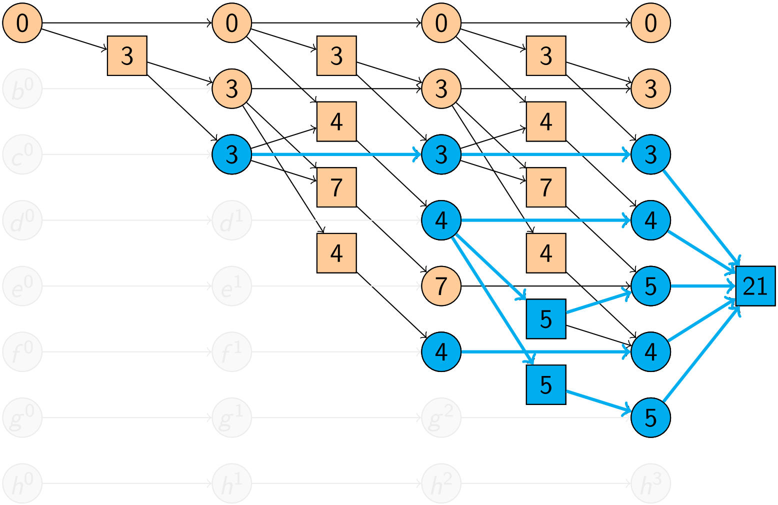
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



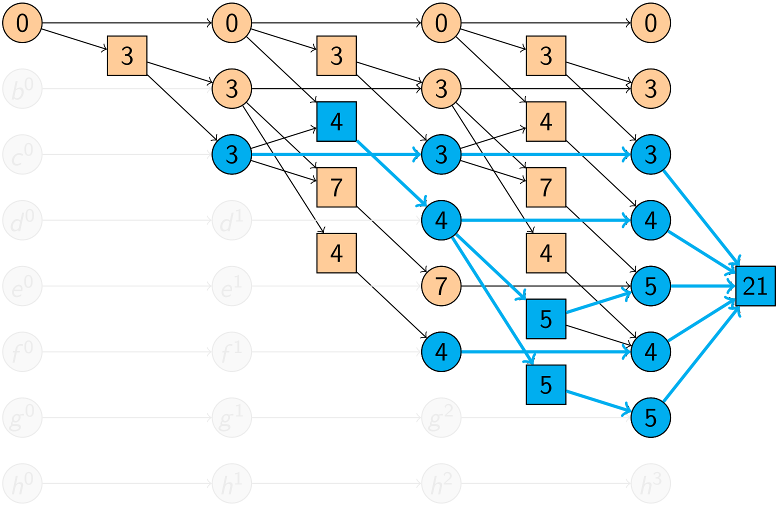
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



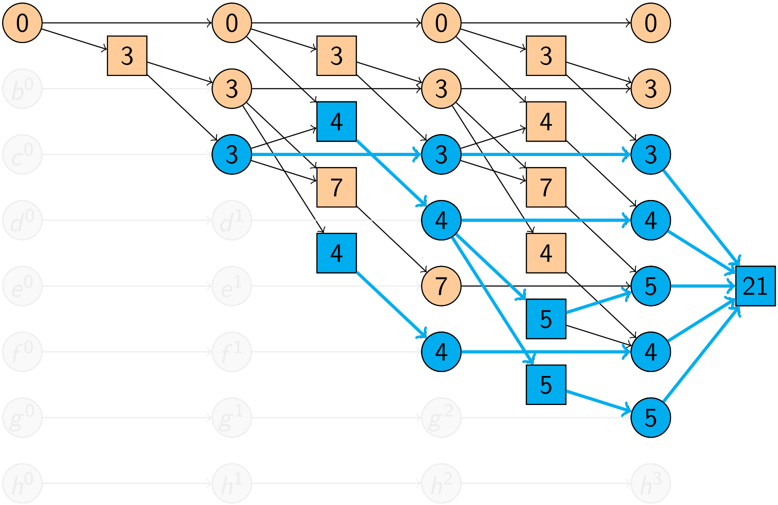
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



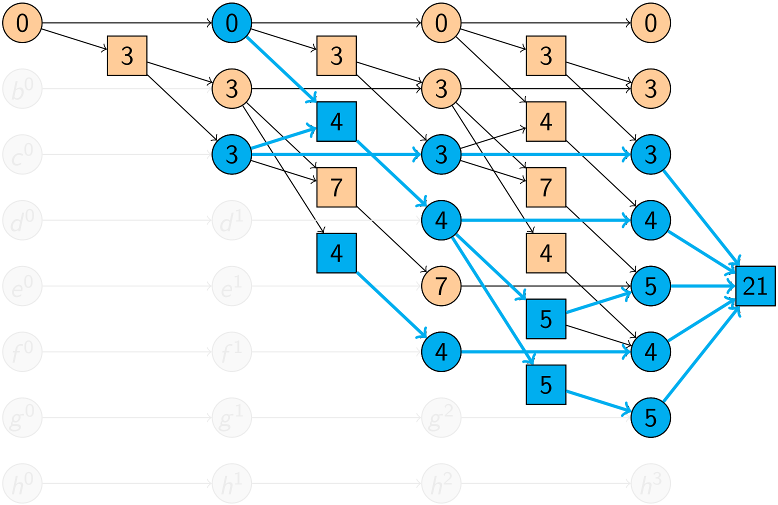
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



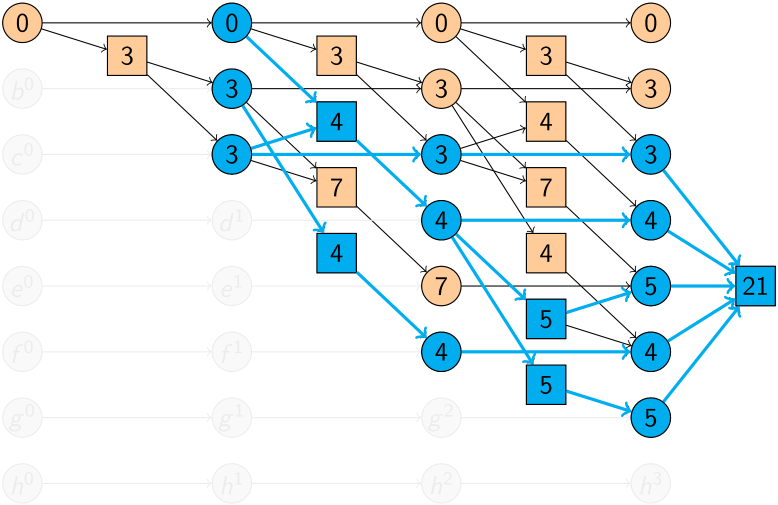
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



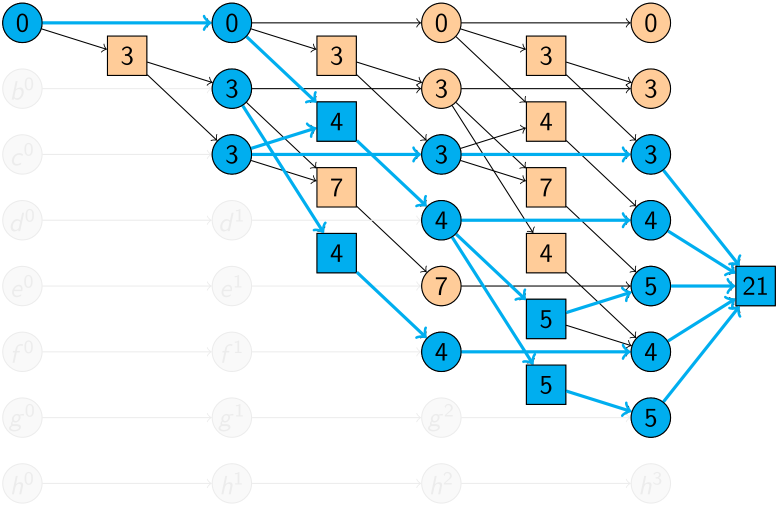
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



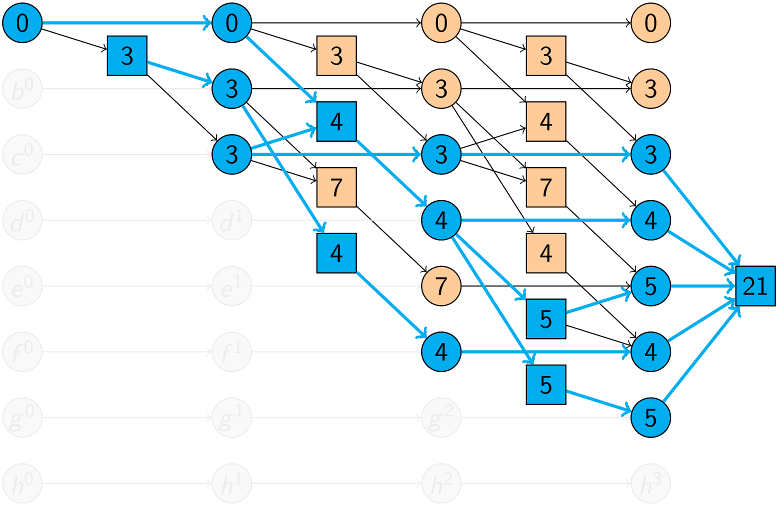
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



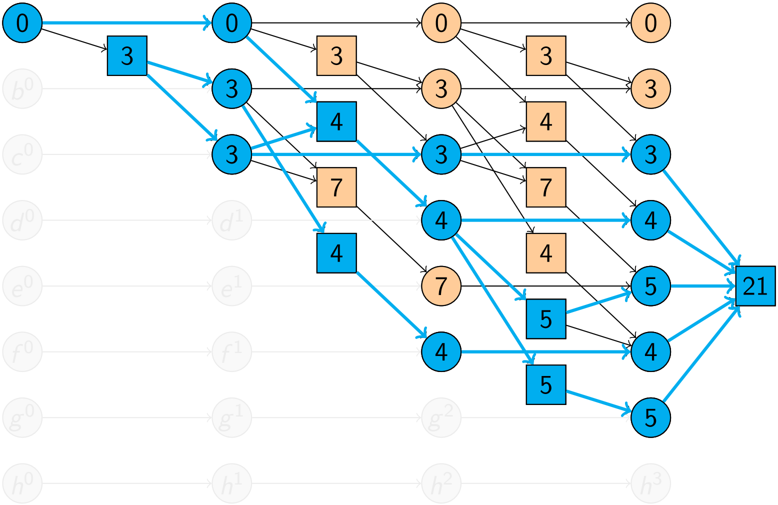
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



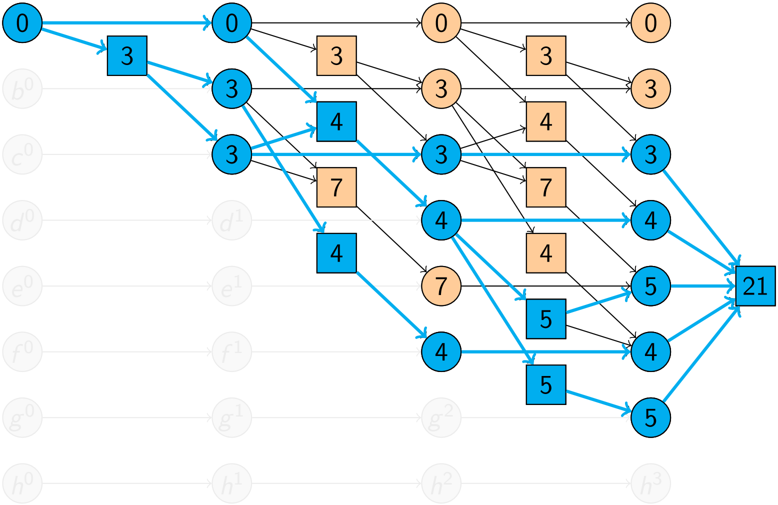
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



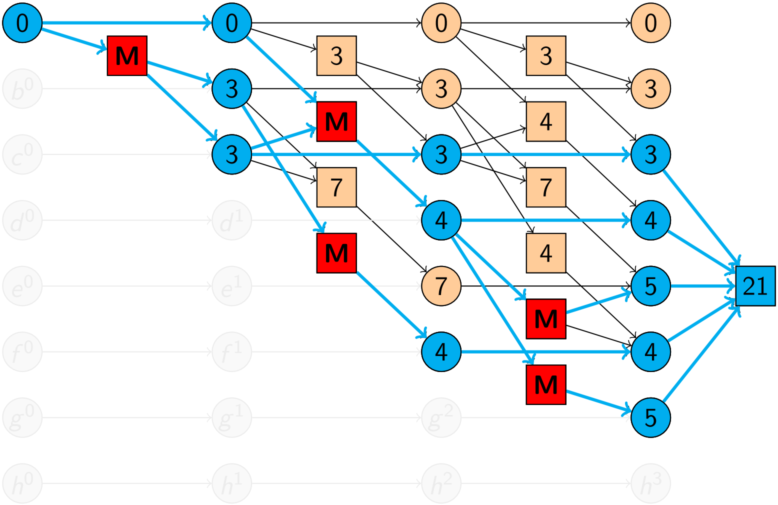
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



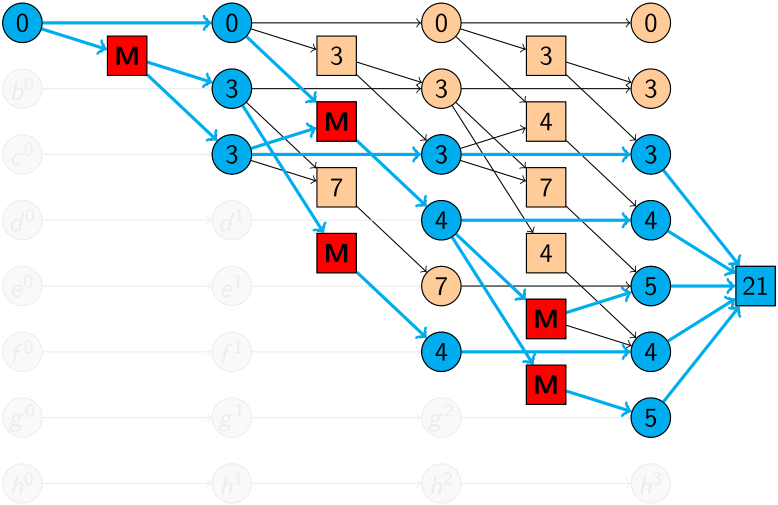
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



$$h^{\mathrm{FF}}(\{a\}) = 3 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7$$

Bemerkungen zur FF-Heuristik

- Wie h^{add} ist h^{FF} sicher und zielerkennend, aber weder zulässig noch konsistent.
- immer mindestens so gute Annäherung an h^+ wie h^{add}
- meistens deutlich besser
- kann in linearer Zeit in der Grösse der Beschreibung der Planungsaufgabe berechnet werden

Bemerkungen zur FF-Heuristik

- Wie h^{add} ist h^{FF} sicher und zielerkennend, aber weder zulässig noch konsistent.
- immer mindestens so gute Annäherung an h^{+} wie h^{add}
- meistens deutlich besser
- kann in linearer Zeit in der Grösse der Beschreibung der Planungsaufgabe berechnet werden
- berechneter Heuristik-Wert hängt von Tie-Breaking der Markierungsregeln ab (h^{FF} nicht wohldefiniert)
- eine der erfolgreichsten Planungsheuristiken

Vergleich der Relaxierungsheuristiken

Zusammenhänge zwischen den Relaxierungsheuristiken

Sei s ein Zustand der STRIPS-Planungsaufgabe $\langle V, I, G, A \rangle$.

Dann gilt:

- $h^{\max}(s) \leq h^{+}(s) \leq h^{*}(s)$
- $h^{\max}(s) \leq h^{+}(s) \leq h^{\mathrm{FF}}(s) \leq h^{\mathrm{add}}(s)$
- h^{*} und h^{FF} sind unvergleichbar
- h^{*} und h^{add} sind unvergleichbar

Anmerkungen:

- Für nicht zulässige Heuristiken ist es im Allgemeinen weder gut noch schlecht, grössere Werte zu berechnen als eine andere Heuristik.
- Bei Relaxierungsheuristiken ist das Ziel, möglichst nah an h^{+} zu kommen.

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Viele Delete-Relaxierungs-Heuristiken können als Berechnungen auf relaxierten Planungsgraphen (RPGs) verstanden werden.
- Beispiele in dieser Vorlesung: $h^{\max}$, h^{add}, h^{FF}
- $h^{\max}$ und h^{add} propagieren Zahlenwerte in den RPGs
  - Unterschied: $h^{\max}$ berechnet Maximum der Vorgängerkosten bei Aktions- und Zielknoten, h^{add} die Summe
- h^{FF} markiert Knoten und summiert die Kosten der markierten Aktionsknoten
- allgemein gilt: $h^{\max}(s) \leq h^{+}(s) \leq h^{\text{FF}}(s) \leq h^{\text{add}}(s)$