

Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

36. Handlungsplanung: Delete-Relaxierungs-Heuristiken

Malte Helmert

Universität Basel

11. Mai 2015

Handlungsplanung: Überblick

Kapitelüberblick:

- 33. Einführung
- 34. Planungsformalismen
- 35.–36. Planungsheuristiken: Delete-Relaxierung
 - 35. Delete-Relaxierung
 - 36. Delete-Relaxierungs-Heuristiken
- 37.–38. Planungsheuristiken: Abstraktion
- 39.–40. 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 $v \in \text{pre}(a)$ enthält
 - Variablenebene V^{i+1} enthält Knoten v^{i+1} wenn vorige Variablenebene v^i enthält oder vorige Aktionsebene ein a^{i+1} mit $v \in \text{add}(a)$ 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 $v \in \text{pre}(a)$ (**Vorbedingungskanten**)
 - von a^i zu v^i , wenn $v \in \text{add}(a)$ (**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 $pre(a) = \{p_1, \dots, p_k\}$,
 $add(a) = \{a_1, \dots, a_l\}$, $del(a) = \emptyset$ und $cost(a) = c$
als $\langle p_1, \dots, p_k \rightarrow a_1, \dots, a_l \rangle_c$

$$V = \{a, b, c, d, e, f, g, h\}$$

$$I = \{a\}$$

$$G = \{c, d, e, f, g\}$$

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$$

$$a_1 = \langle a \rightarrow b, c \rangle_3$$

$$a_2 = \langle a, c \rightarrow d \rangle_1$$

$$a_3 = \langle b, c \rightarrow e \rangle_1$$

$$a_4 = \langle b \rightarrow f \rangle_1$$

$$a_5 = \langle d \rightarrow e, f \rangle_1$$

$$a_6 = \langle d \rightarrow g \rangle_1$$

Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph

a^0

b^0

c^0

d^0

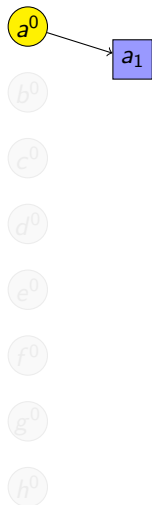
e^0

f^0

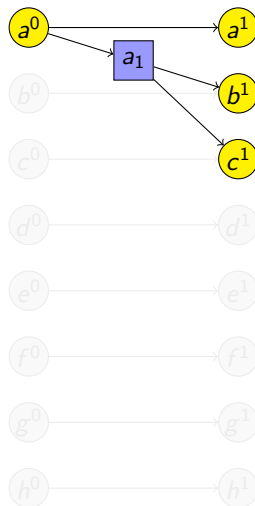
g^0

h^0

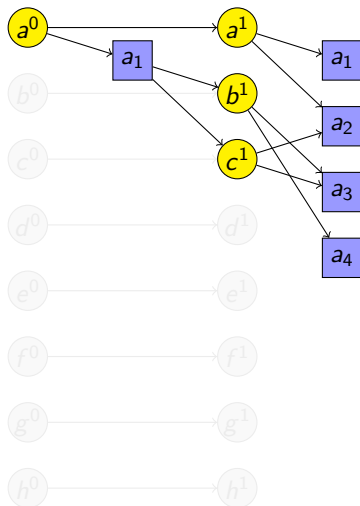
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



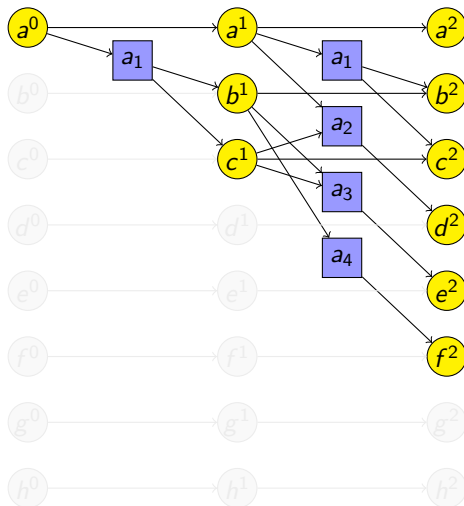
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



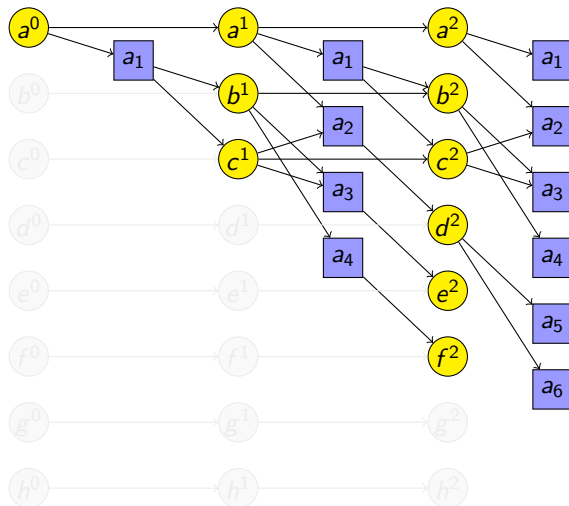
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



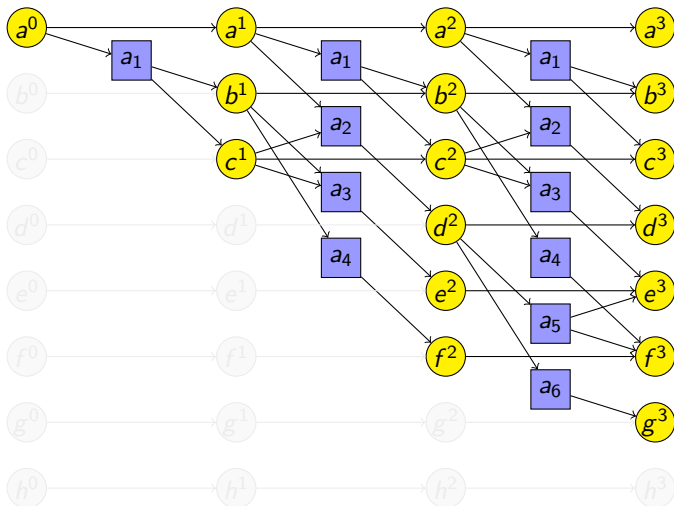
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



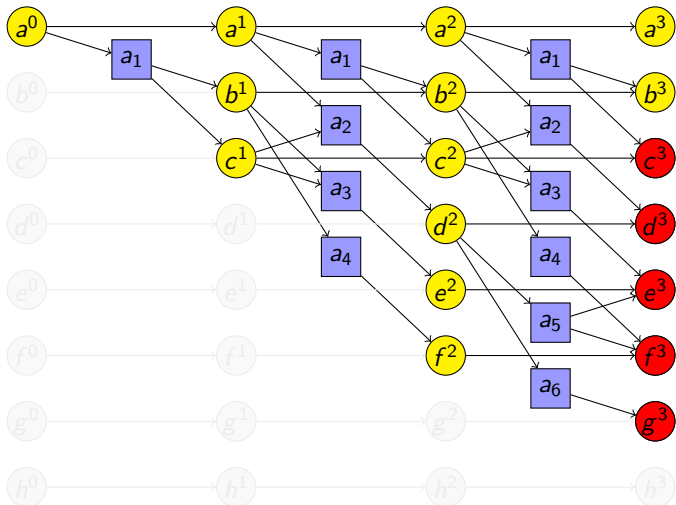
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



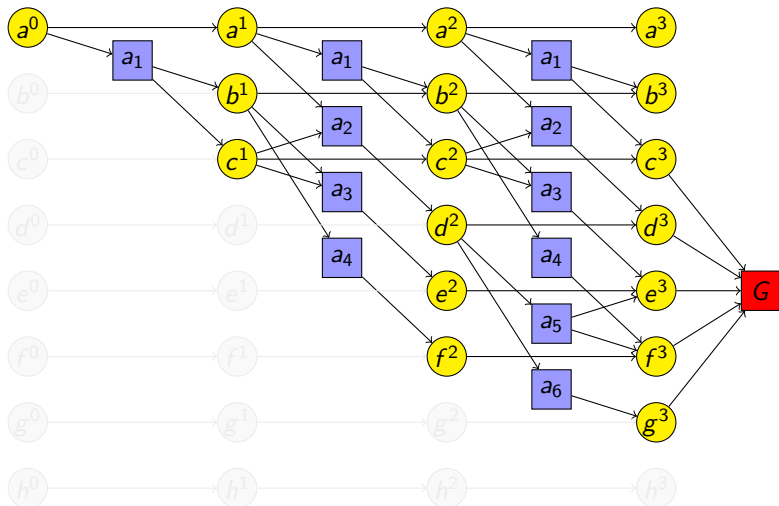
Illustrierendes Beispiel: relaxierter Planungsgraph



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  $\infty$ 
```

~> **allgemeines Muster** für RPG-Heuristiken

~> 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 $\text{cost}(a)$

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:

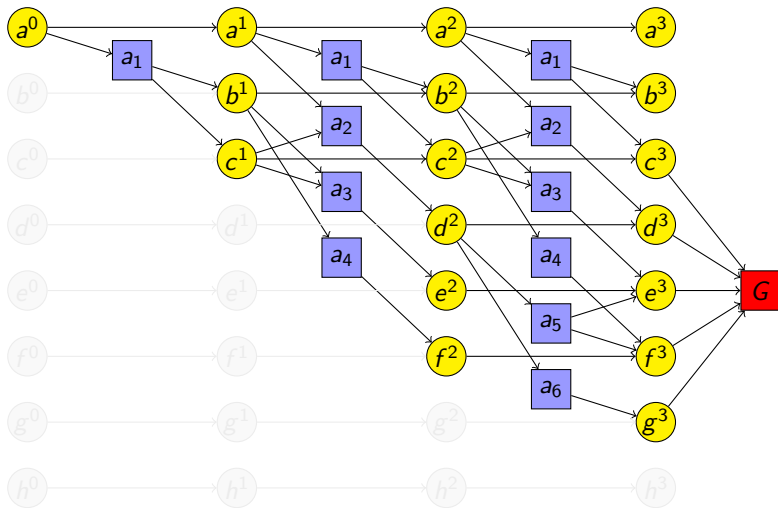
- der Wert des Zielknotens in der letzten Ebene

Maximums- und additive Heuristik: Intuition

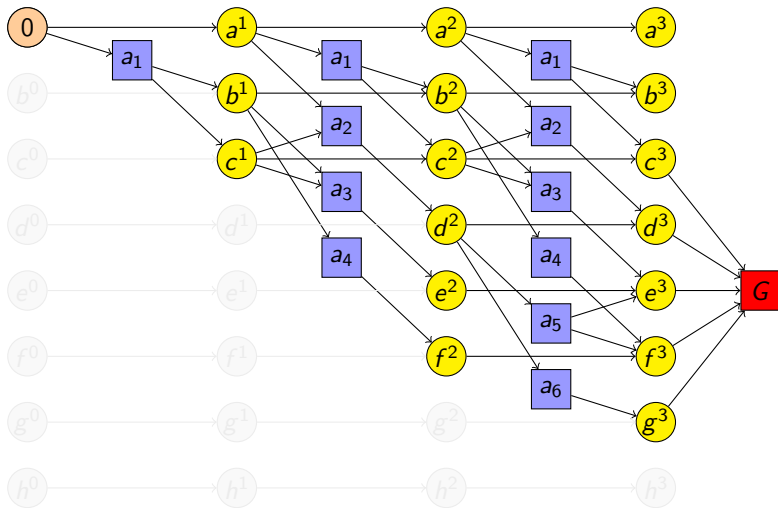
Intuition:

- 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)

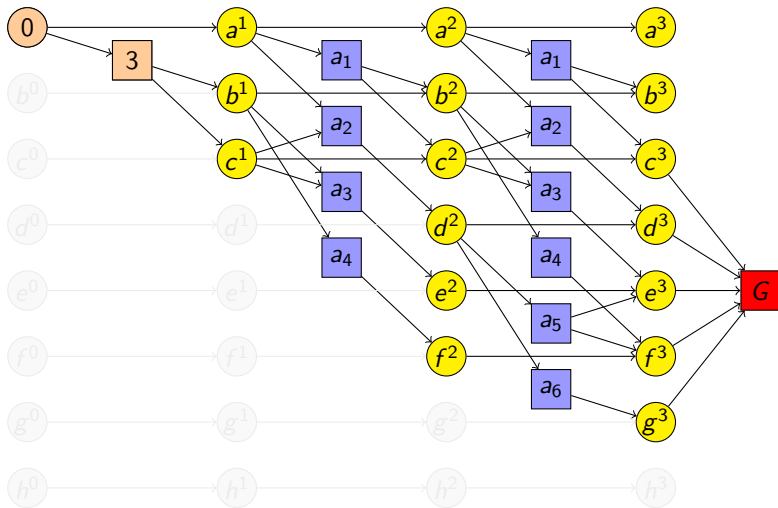
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



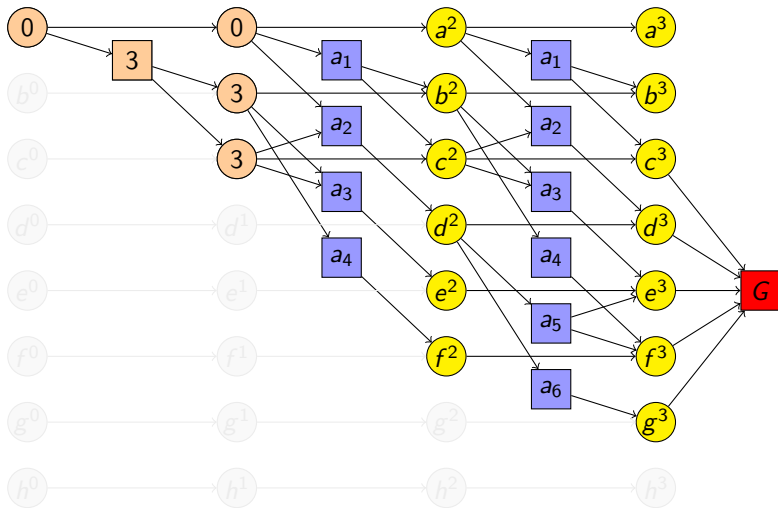
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



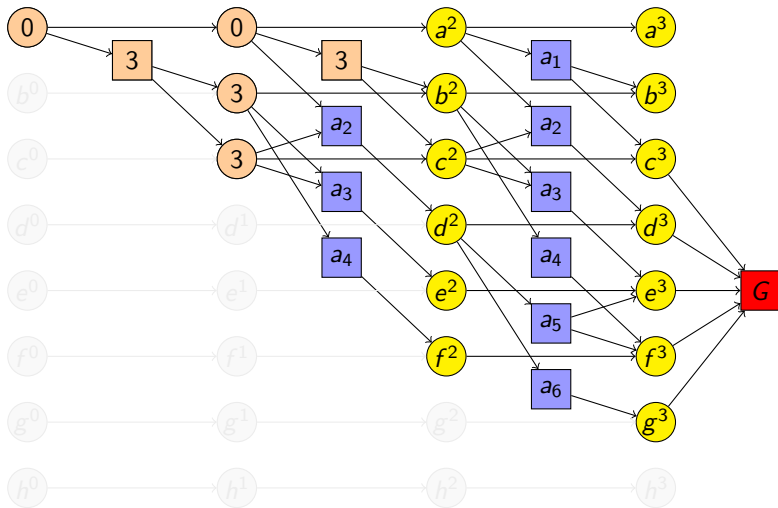
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



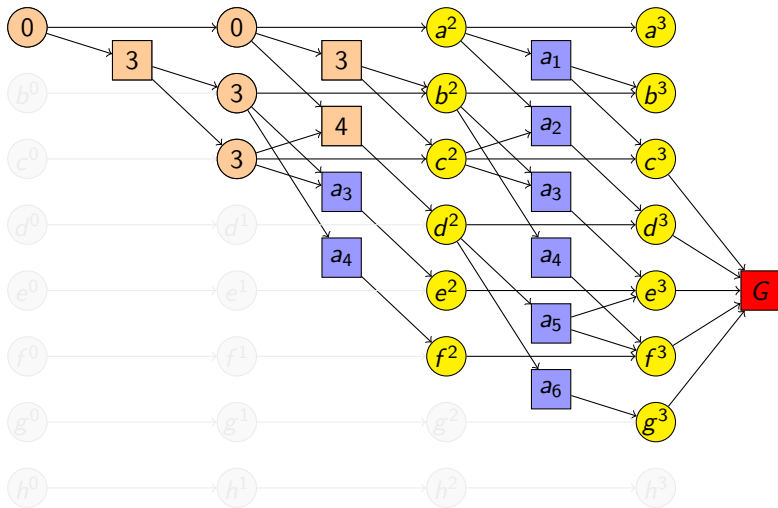
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



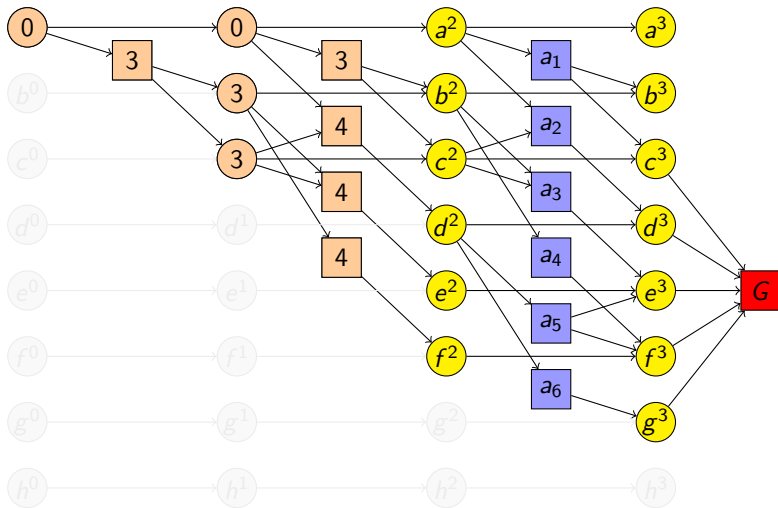
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



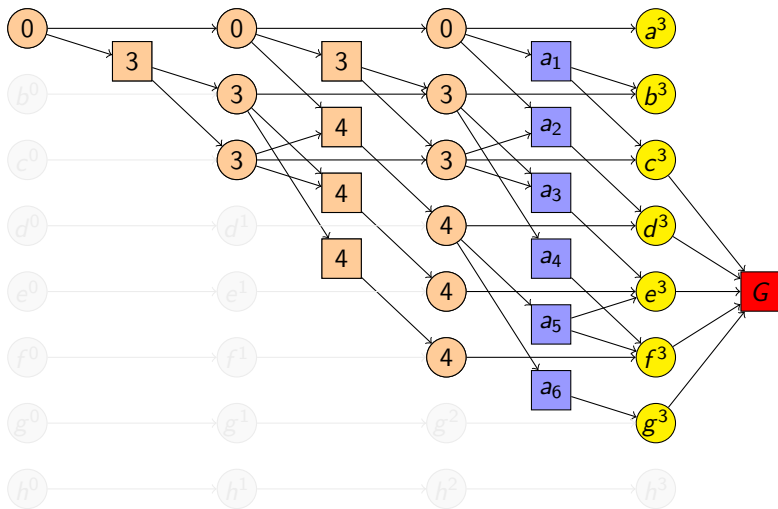
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



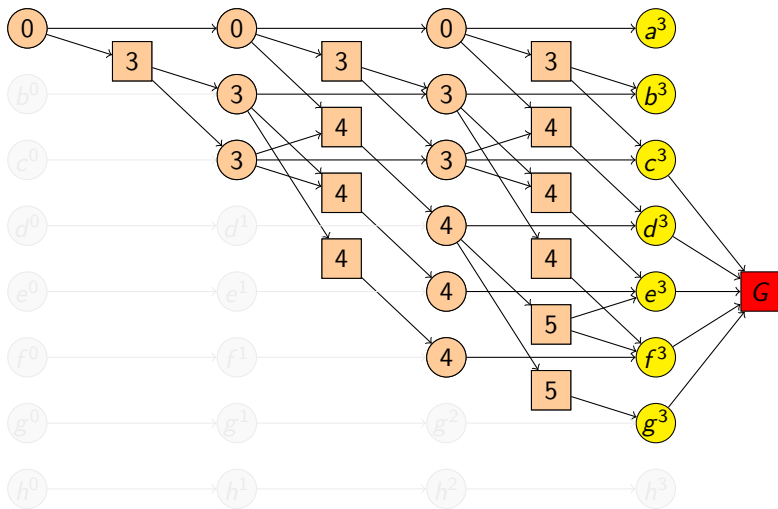
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



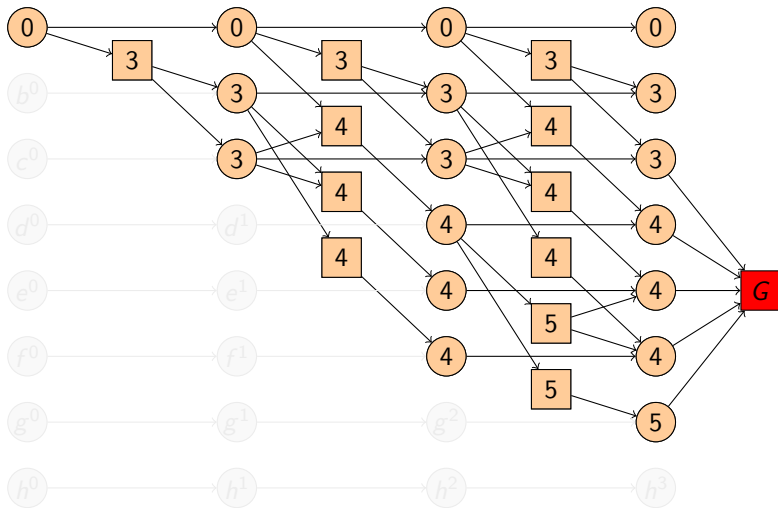
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



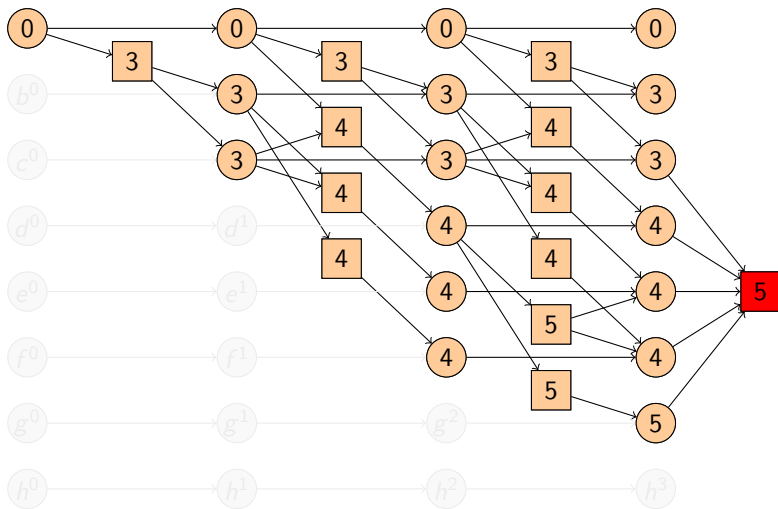
Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$



Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$

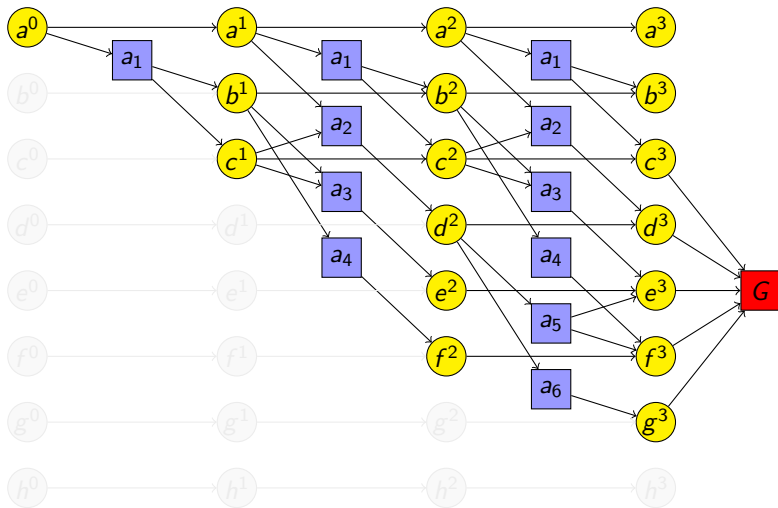


Illustrierendes Beispiel: $h^{\max}$

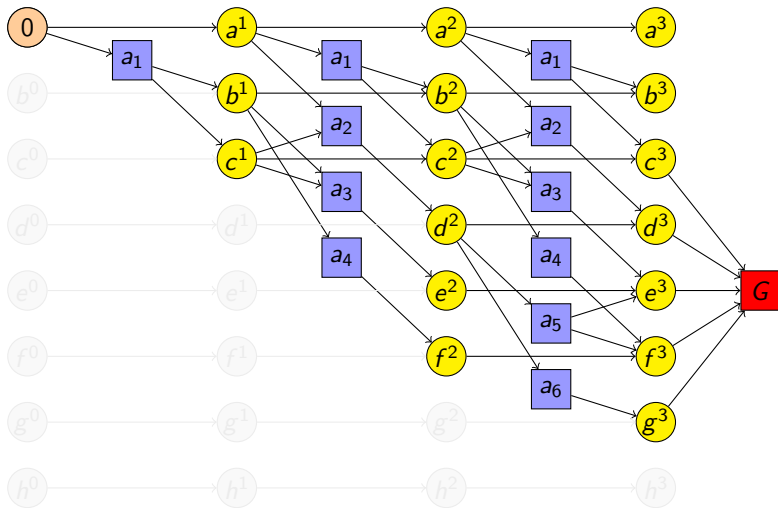


$$h^{\max}(\{a\}) = 5$$

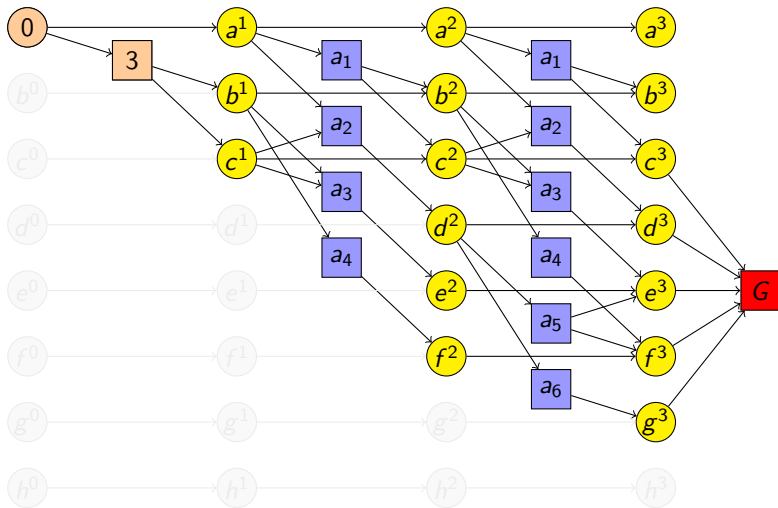
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



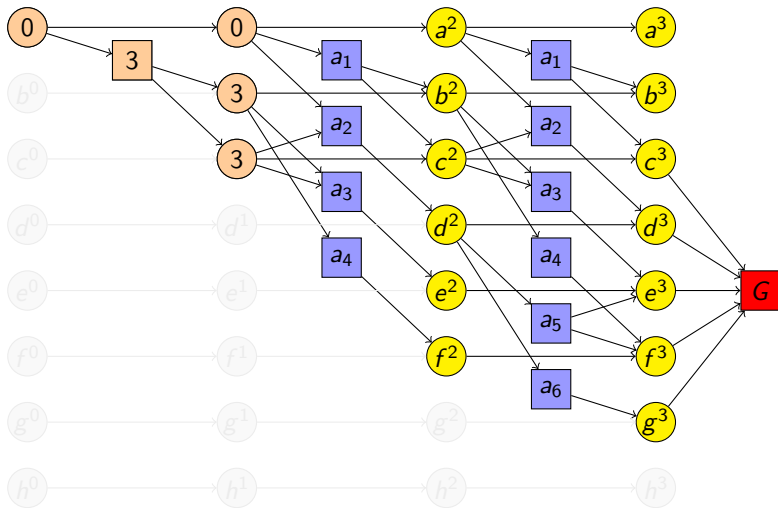
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



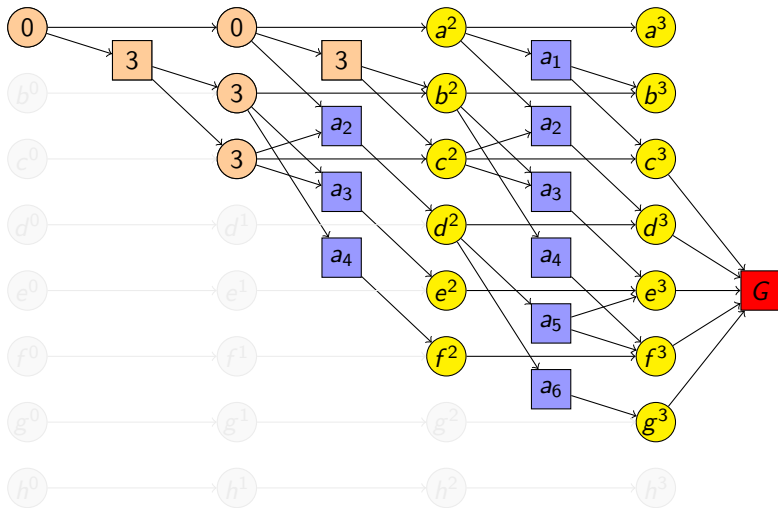
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



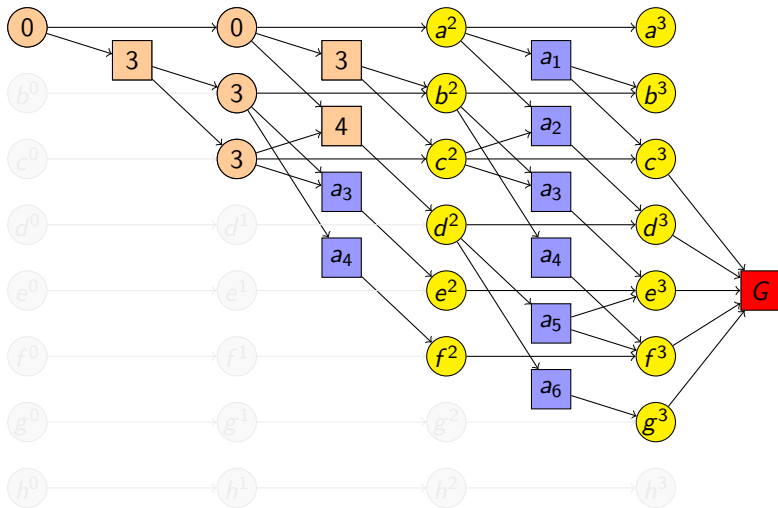
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



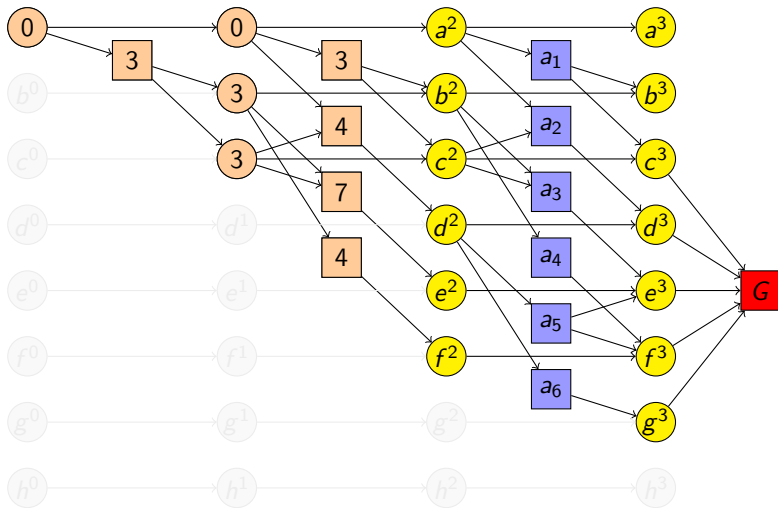
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



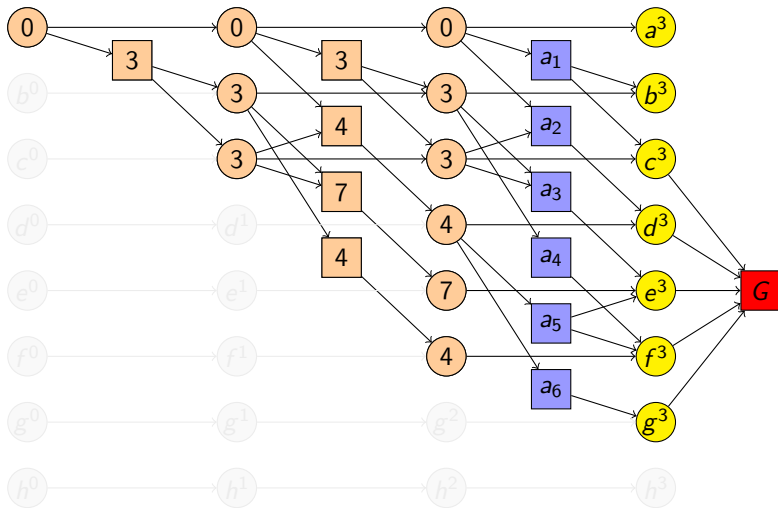
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



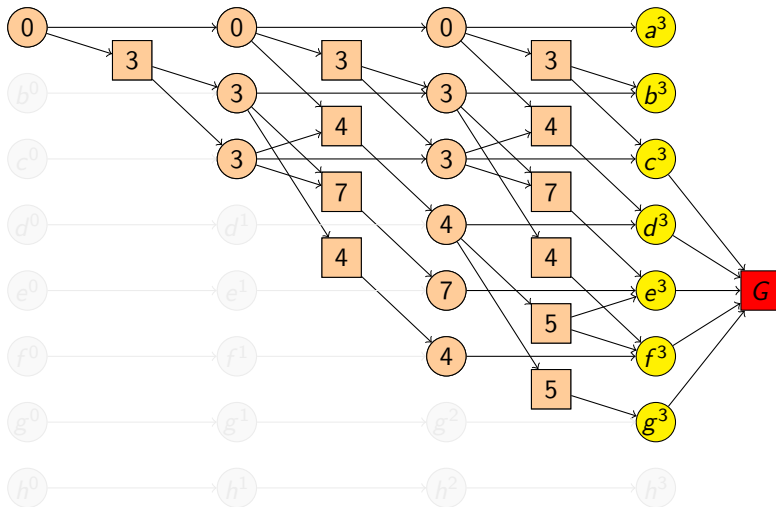
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



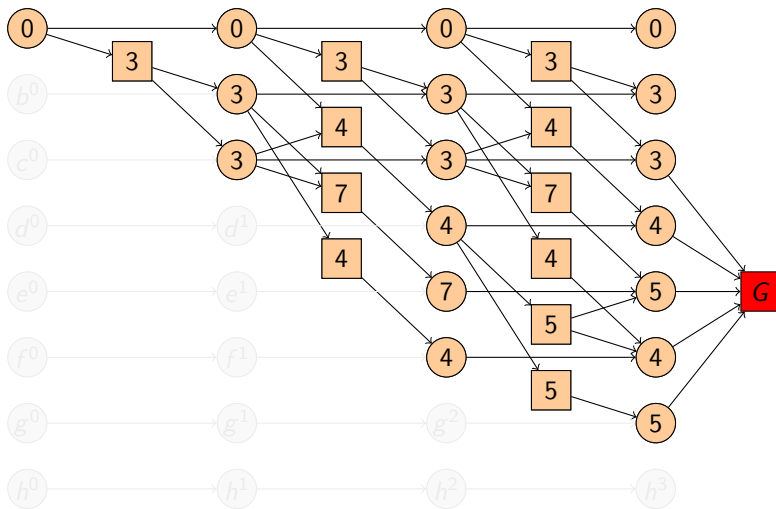
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



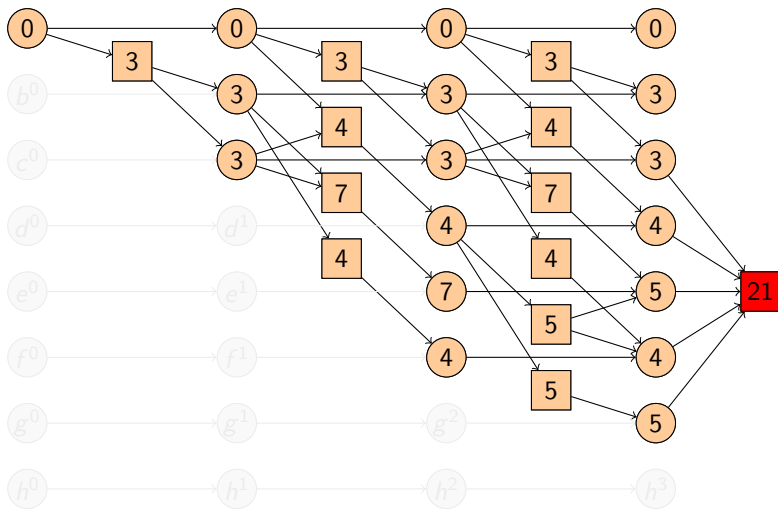
Illustrierendes Beispiel: h^{add}



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
- ⇒ 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
- ~> 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
- ~> 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
- ~> 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.
- ~> FF-Heuristik

FF-Heuristik

FF-Heuristik

Die FF-Heuristik

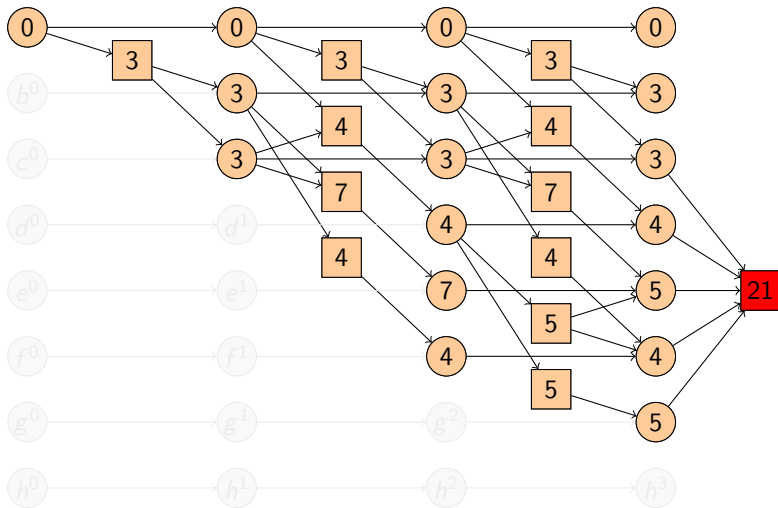
identisch zu h^{add} , aber **zusätzliche Schritte** am Ende:

- **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)

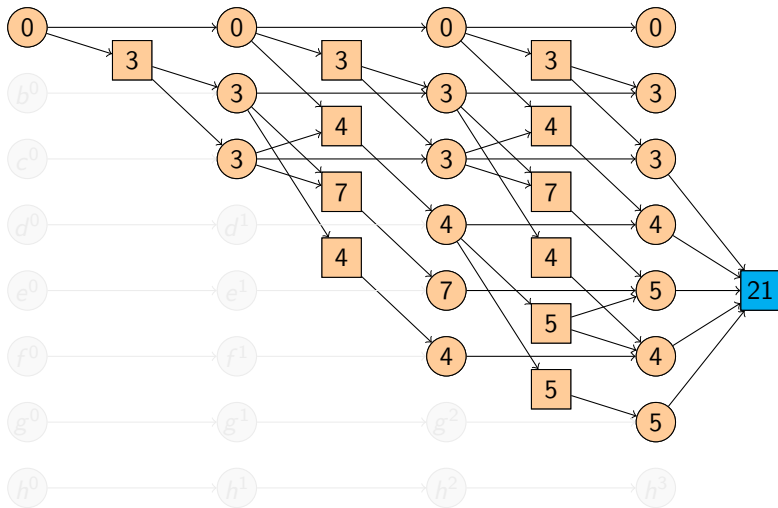
Heuristikwert:

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

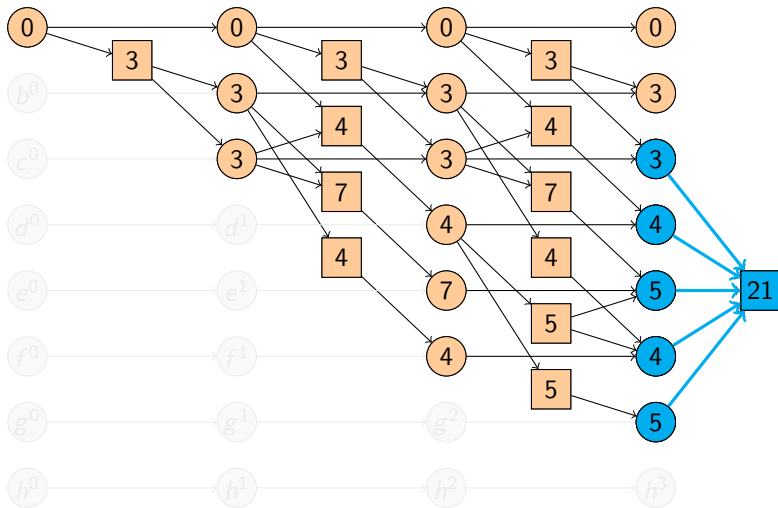
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



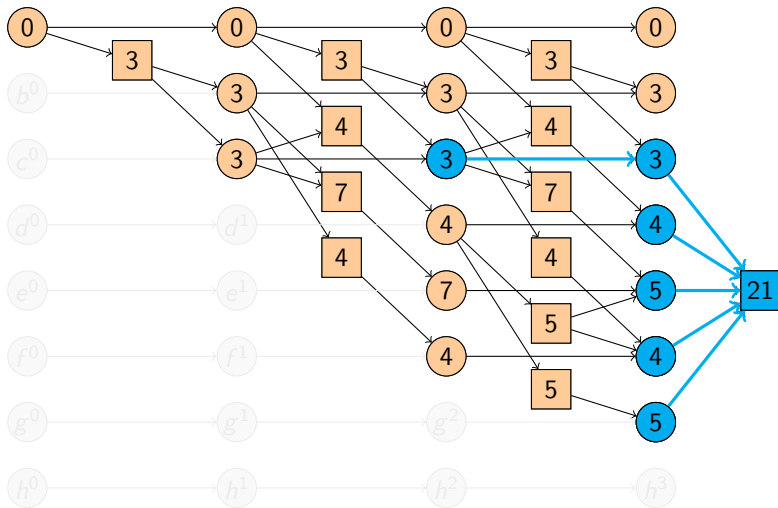
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



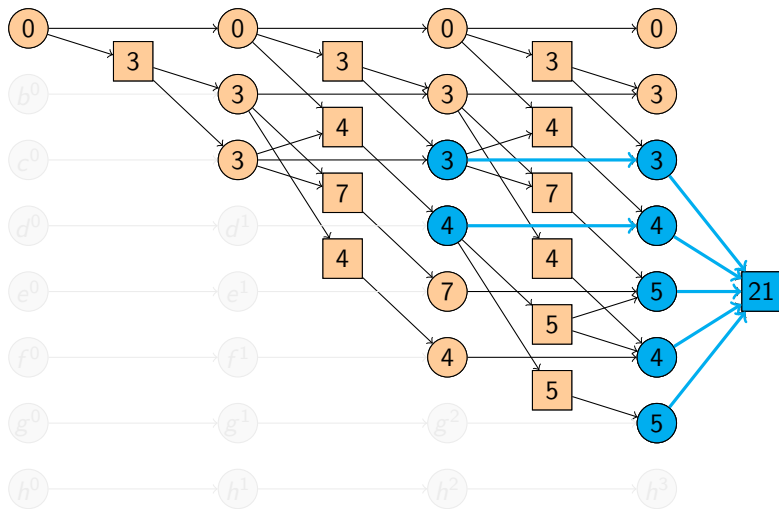
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



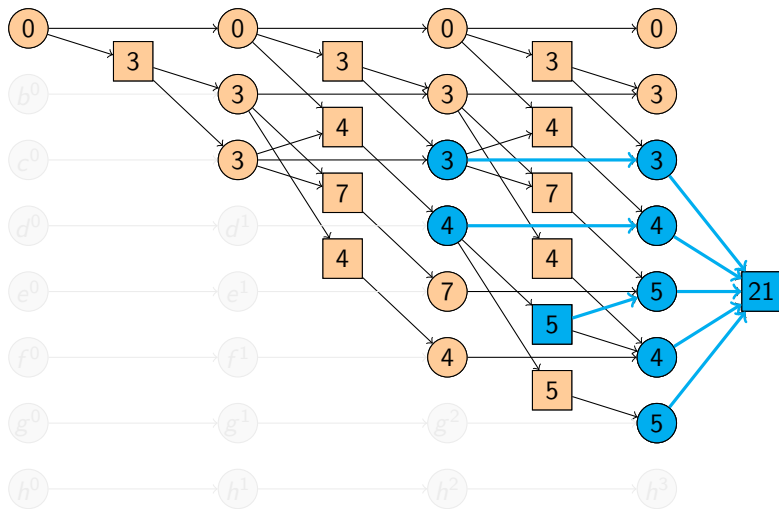
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



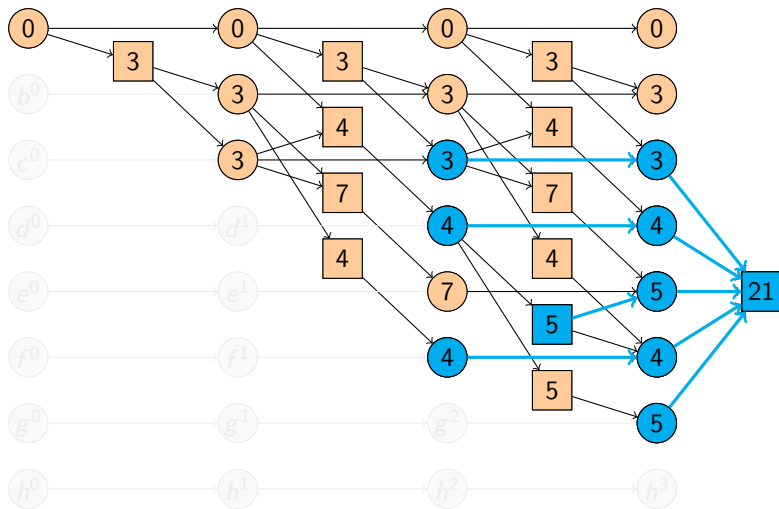
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



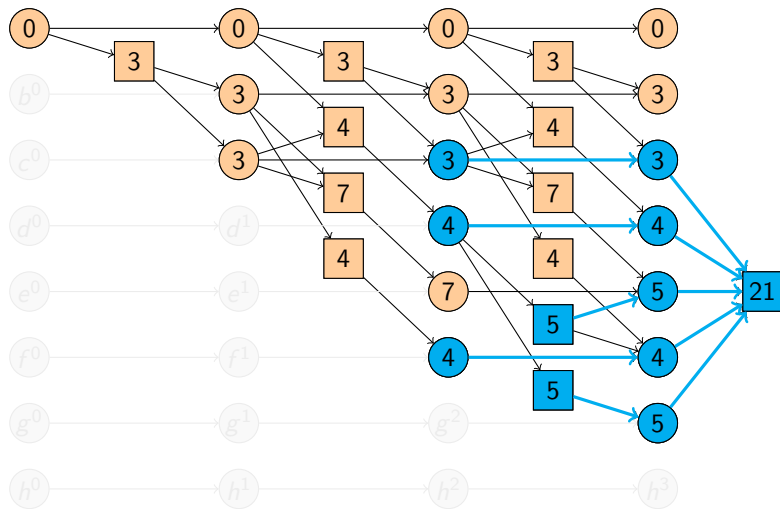
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



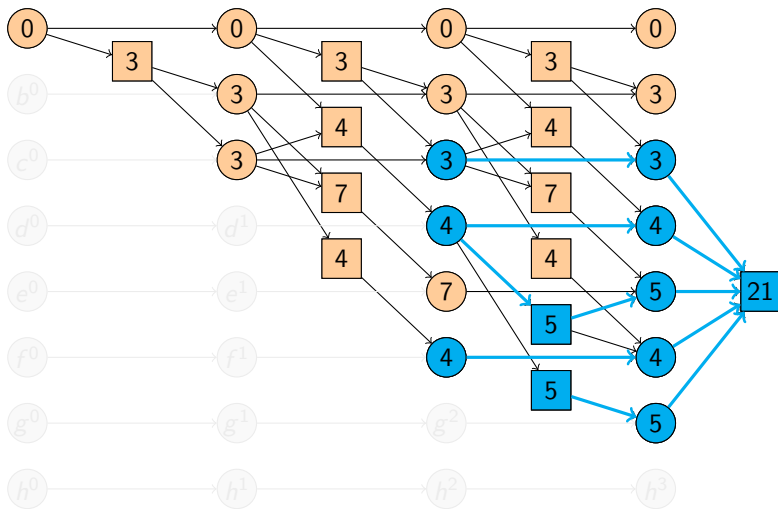
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



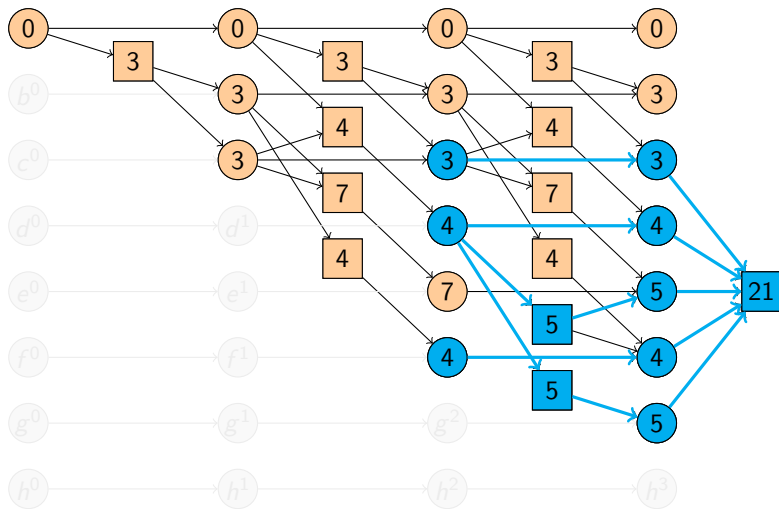
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



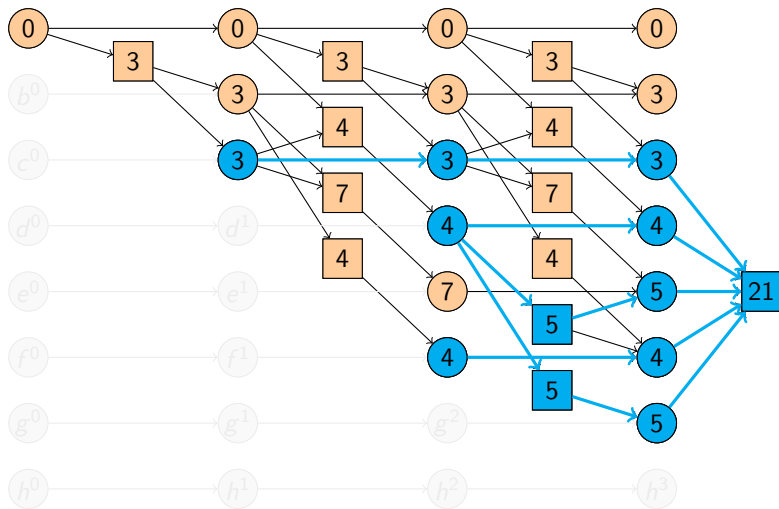
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



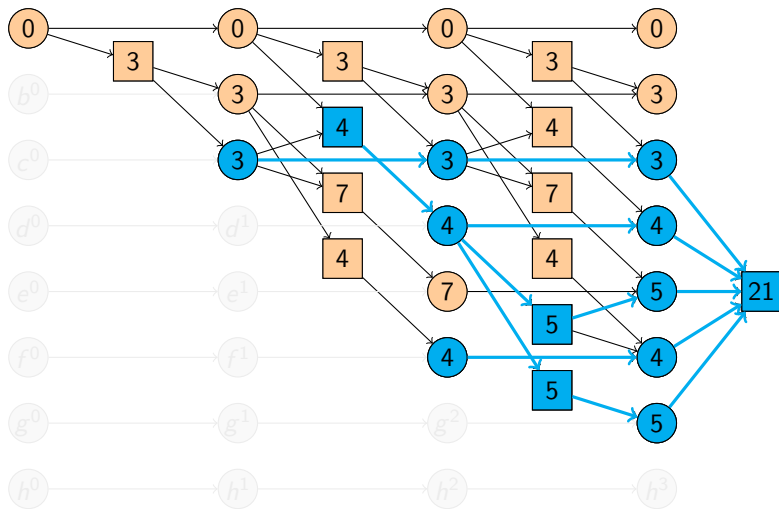
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



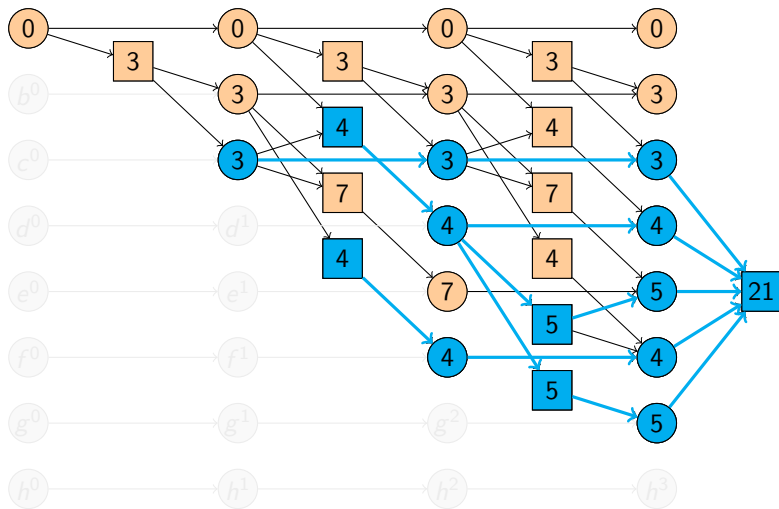
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



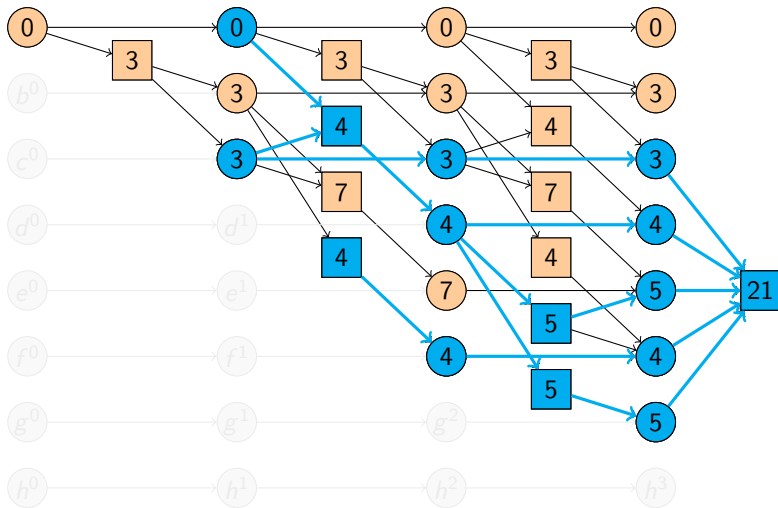
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



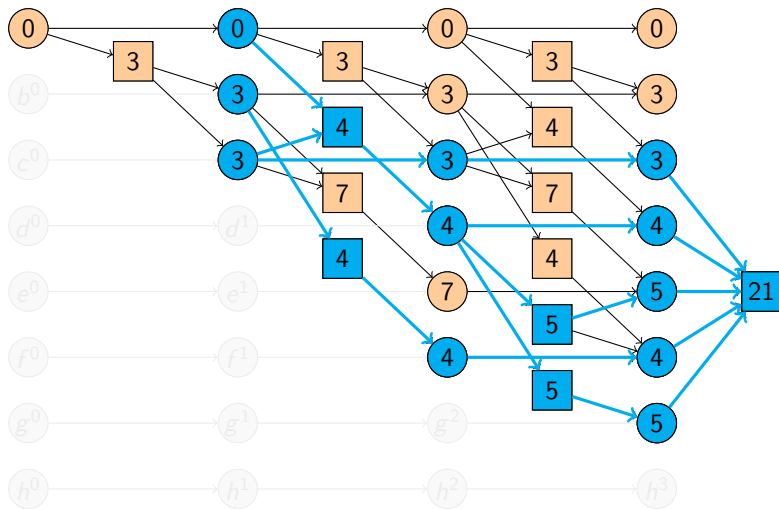
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



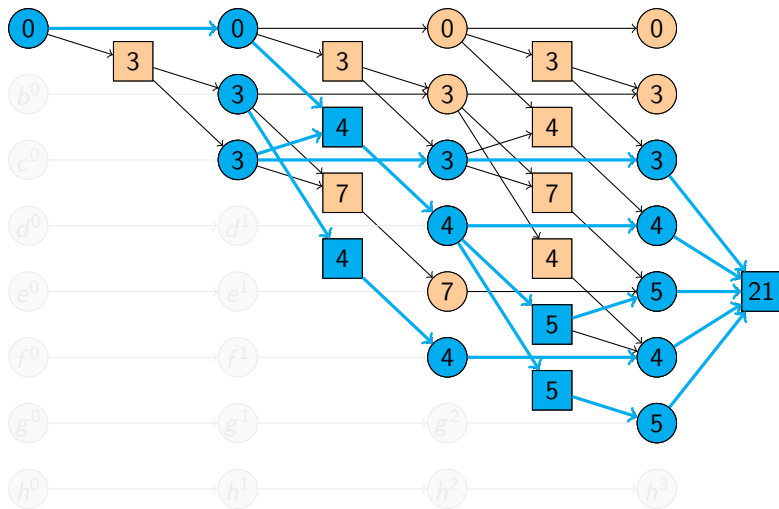
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



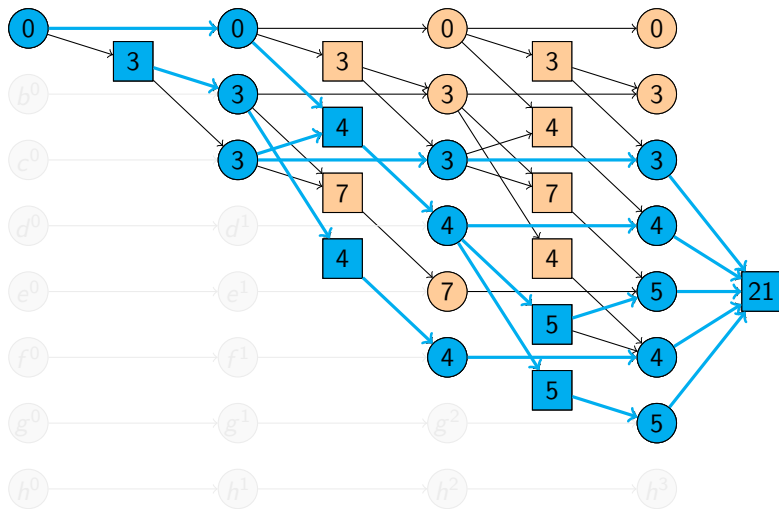
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



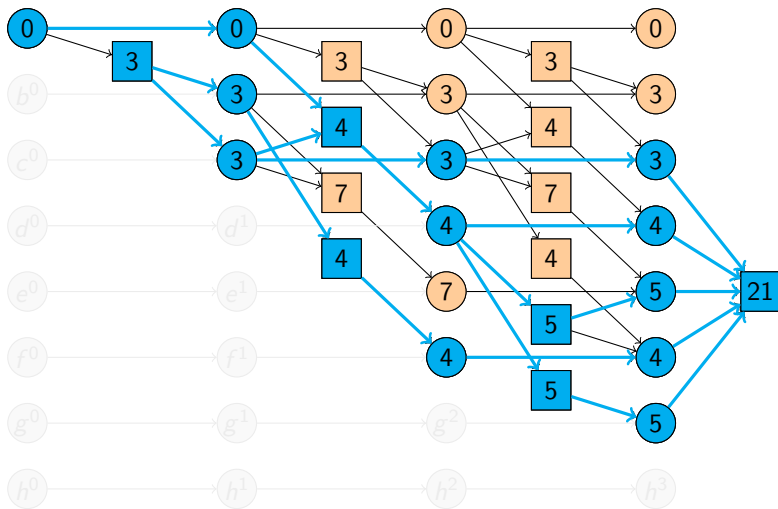
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



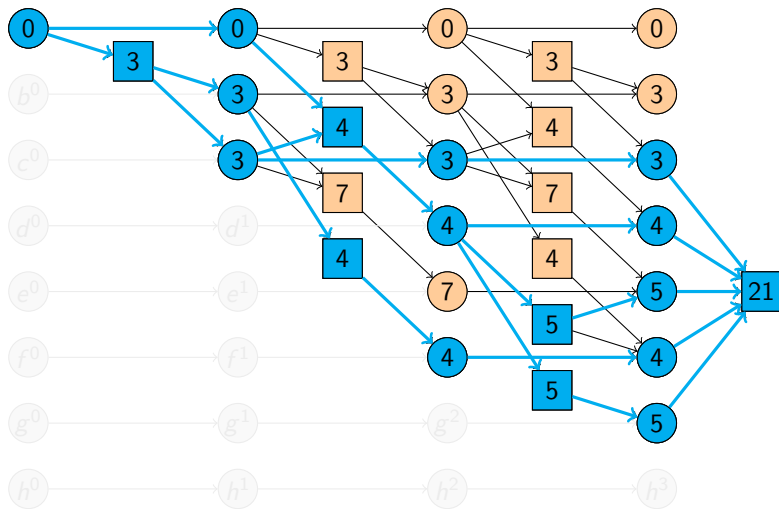
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



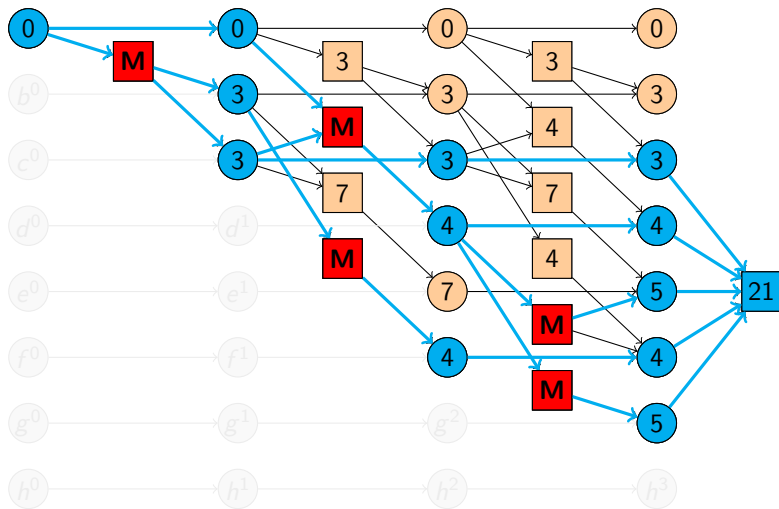
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



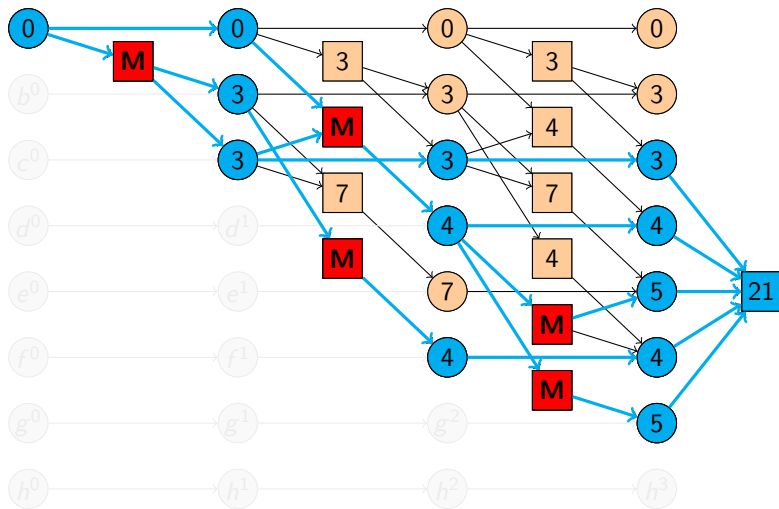
Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



Illustrierendes Beispiel: h^{FF}



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

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:

- $h^{\max}(s) \leq h^+(s) \leq h^*(s)$
- $h^{\max}(s) \leq h^+(s) \leq h^{\text{FF}}(s) \leq h^{\text{add}}(s)$
- 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: $h^{\max}(s) \leq h^+(s) \leq h^{\text{FF}}(s) \leq h^{\text{add}}(s)$