# Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

## 9 Handlungsplanung

Planen im Situationskalkül, STRIPS-Formalismus,
Nichtlineares Planen

*Volker Steinhage*

# Inhalt

- Handlungsplanung vs. Problemlösen
- Planen im Situationskalkül
- Der STRIPS-Formalismus
- Nichtlineares Planen
- Der POP-Algorithmus
- Variablenbindungen

# Handlungsplanung

Aufgabenstellung der Handlungsplanung:

- Gegeben:
  - eine *initiale Situation*
  - eine Beschreibung der *Zielbedingungen*
  - eine Menge von *möglichen Aktionen*
- Gesucht:
  - ein Handlungsplan als Sequenz von Aktionen, die die initiale Situation in eine Situation überführt, in der die Zielbedingungen gelten.

# Ein einfacher, planender Agent

```
function SIMPLE-PLANNING-AGENT(percept) returns an action
  static: KB, a knowledge base (includes action descriptions)
          p, a plan, initially NoPlan
          t, a counter, initially 0, indicating time
  local variables: G, a goal
                   current, a current state description

  TELL(KB, MAKE-PERCEPT-SENTENCE(percept, t))
  current ← STATE-DESCRIPTION(KB, t)
  if p = NoPlan then *
      G ← ASK(KB, MAKE-GOAL-QUERY(t))
      p ← IDEAL-PLANNER(current, G, KB)
  if p = NoPlan or p is empty then action ← NoOp
  else
      action ← FIRST(p)
      p ← REST(p)
  TELL(KB, MAKE-ACTION-SENTENCE(action, t))
  t ← t + 1
  return action
```

Vorgehen des Agenten:

(1) Bestimmung eines Ziels

(2) Berechnung eines Plans, um dieses Ziel vom aktuellen Zustand aus zu erreichen

(3) Ausführen des Plans, bis ein Ziel-zustand erreicht ist

(4) Weiter bei (1)

Bemerkung: Sofern in G←ASK(KB, MAKE-GOAL-QUERY(t)) a priori alle Teilziele als eine Konjunktion generiert werden, werden die Teilziele auch bis zum leeren Plan (*p* is empty) abgearbeitet. Sofern nach Abarbeitung eines ersten Zieles (*p* is empty) eine erneute Zielabfrage G←ASK(KB, MAKE-GOAL-QUERY(t)) das nächste Ziel aus der Wissensbasis generieren soll, muss die Bedingung der ersten bedingten Abfrage* lauten: „**if** *p* = *NoPlan* or *p* is empty **then** ...“ Dann kann die Zielgenerierung und Plangenerierung erneut nach Abarbeitung eines Zieles angestoßen werden.

# Beispiel

Weltwissen:
- Supermarkt verkauft Milch
- Supermarkt verkauft Bananen
- Baumarkt verkauft Bohrer

Startzustand:
- Agent zuhause
- keine Milch
- keine Bananen
- kein Bohrer

Endzustand:
- Agent zuhause
- Milch
- Bananen
- Bohrer

Orte:
- zuhause
- Supermarkt
- Baumarkt

Aktionen:
- gehen
- kaufen

# Planen als logische Inferenz (1)

Formalisierbar im **Situationskalkül**:

***Initialer*** *Zustand* $s_0$ (Aussagen über atomaren Formeln):

$At(home, s_0) \wedge \neg Have(milk, s_0) \wedge \neg Have(banana, s_0) \wedge \neg Have(drill, s_0)$

***Operatoren*** (Nachfolgezustandsaxiome):

$\forall a, s\ Have(milk, do(a, s)) \Leftrightarrow$

$\{a=buy(milk) \wedge Poss(buy(milk), s) \vee Have(milk, s) \wedge a \neq drop(milk)\}$

***Ziel****bedingungen* (Anfrage):

$\exists s\ At(home, s) \wedge Have(milk, s) \wedge Have(banana, s) \wedge Have(drill, s)$

Der *konstruktive* Beweis der existentiellen Anfrage aus dem Initialzustand über alle Operatoren liefert einen *Plan*, der das Gewünschte macht.

# Planen als logische Inferenz (2)

- Bei *Vorwärtsableitung* (Algm. *FOL-FC-ASK*, Vorl. 8) werden vom Startzustand $s_0$ aus Aktionen *a* gemäß ihrer Nachfolgezustandsaxiome angewendet.

- Schrittweise entstehen neue Klauseln, die die Erfüllung von Prädikaten wie *Have* oder *At* über den Nachfolgezuständen *do*(*a,s*) formulieren.

- Automatisch sammeln sich in den Termen, die die Nachfolgezustände darstellen, die angewandten Aktionen. Für den Lösungspfad ergibt sich im Beispiel folg. Variablenbindung für die Zustandsvariable *s*:

  *do(go(home),do(buy(drill), do(go(hardware_store),*
  *do(buy(banana),do(buy(milk),do(go(super_market),*$s_0$*))))))*.

- In diesem Zustand sind alle Zielprädikate erfüllt und der *Plan* lautet:

  *go(super_market),buy(milk),buy(banana),go(hardware_store),(buy(drill),go(home).*

# Planen als logische Inferenz (3)

Logische Inferenz führt nicht garantiert zum effizientesten Lösungsweg, weil

1) viele für ein Ziel irrelevante Aktionen zu untersuchen sind
2) Vorteile der Problemzerlegung nicht nutzbar sind.
3) Unentscheidbarkeit der PL 1

↝ Spezialisiertes Inferenzsystem für eingeschränkte Repräsentation

↝ *Planungsalgorithmus*

# Der STRIPS-Formalismus

STRIPS: STanford Research Institute Problem Solver (Planer der 1970er Jahre) [1]

- *Weltzustände* = Aussagen über *Grundatomen*
  - *keine Funktionssymbole* außer Konstanten,
  - interpretiert unter *Closed World Assumption*
    (auch *Standardinterpretation*)[2]

- *Zielbedingungen*: Aussagen über *Grundatomen*

*Beachte*: *Keine explizite Zustandsvariable wie im Situationskalkül*.
Es ist immer *nur der aktuelle Weltzustand* zugreifbar.

---

[1] Die mit STRIPS eingeführten Strukturen und Begriffe haben aber auch in aktuellen Forschungen ihre Relevanz.

[2] Closed-World-Annahme: Nicht explizit als *wahr* gegebene oder ableitbare Aussagen sind als *falsch* anzunehmen. Erübrigt das explizite Aufnehmen und Verarbeiten von negativen Faktenklauseln.

# STRIPS-Operatoren

Aktionen sind ***Tripel***, bestehend aus:

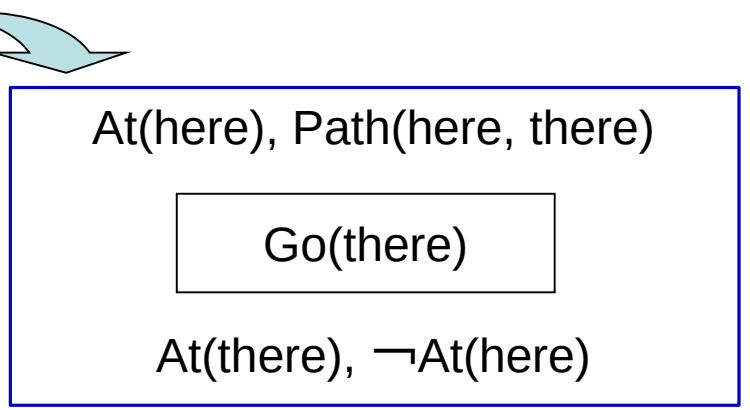
- **Aktionsnamen**: Funktionsname mit Parametern (wie im Situationskalkül).
- **Vorbedingungen**: Konjunktion positiver Literale;
  müssen für Ausführbarkeit der Aktion gelten.
- **Effekte**: Konjunktion positiver und negativer Literale;
  positive Literale werden hinzugenommen (ADD Liste),
  *negative gelöscht* (DEL Liste) (⇝ Behandlung des Frame-Problems).

Closed World Assumption

Beispiel:

Grafische Darstellung

Op( Action: Go(there)
Precond: At(here) ∧ Path(here, there)
Effect: At(there) ∧ ¬At(here))

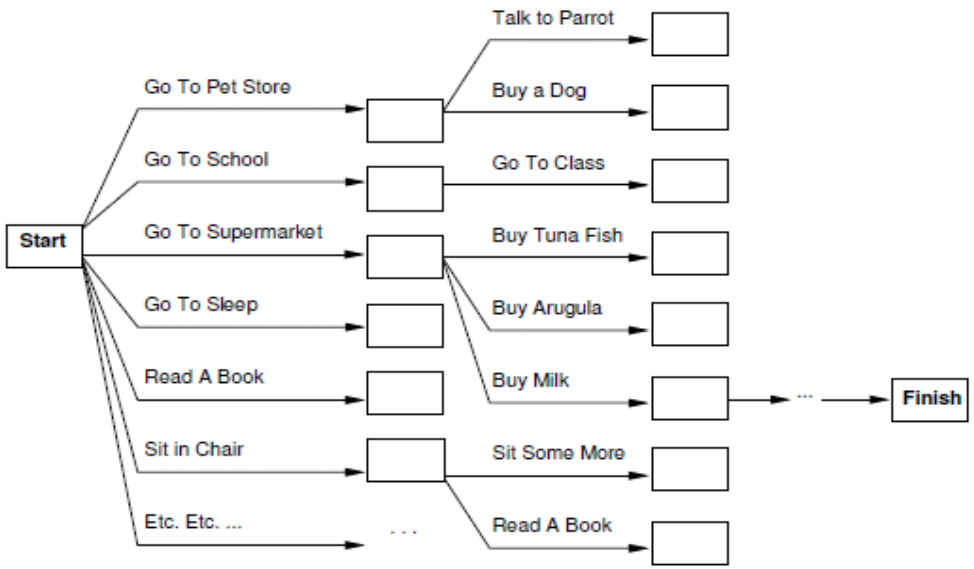


# Suchen im Zustandsraum

Wir könnten jetzt durch den Zustandsraum (die Menge aller Zustände) suchen – und damit Planen auf Suchen reduzieren.

- Wir können vorwärts suchen

  → Progressionsplanung:




- Alternativ könnten wir ausgehend vom Ziel die Suche rückwärts durchführen

  → Regressionsplanung

Vorwärts- und Rückwärtssuche sind *vollständig* ordnende Suchverfahren, die Start und Ziel durch vollständig sequentielle Pläne verbinden

→ keine Problemzerlegung

Effizienter: Teilpläne von Unterproblemen erstellen und diese zu Gesamtplan kombinieren.

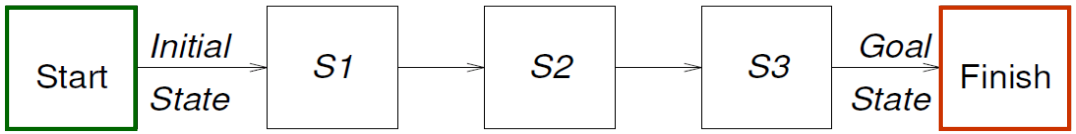
→ Arbeiten im „Raum der Pläne“

→ *Divide and conquer*

# Suchen im Raum aller Pläne

- Start ist ein *partieller Plan*, der nur einen Startschritt (mit Startzustand als Effekt) und einen Zielschritt (mit Zielzustand als Vorbedingung) enthält:


- Ziel ist ein *vollständiger Plan*, der das gegebene Problem löst:




- Operatoren im Planraum:

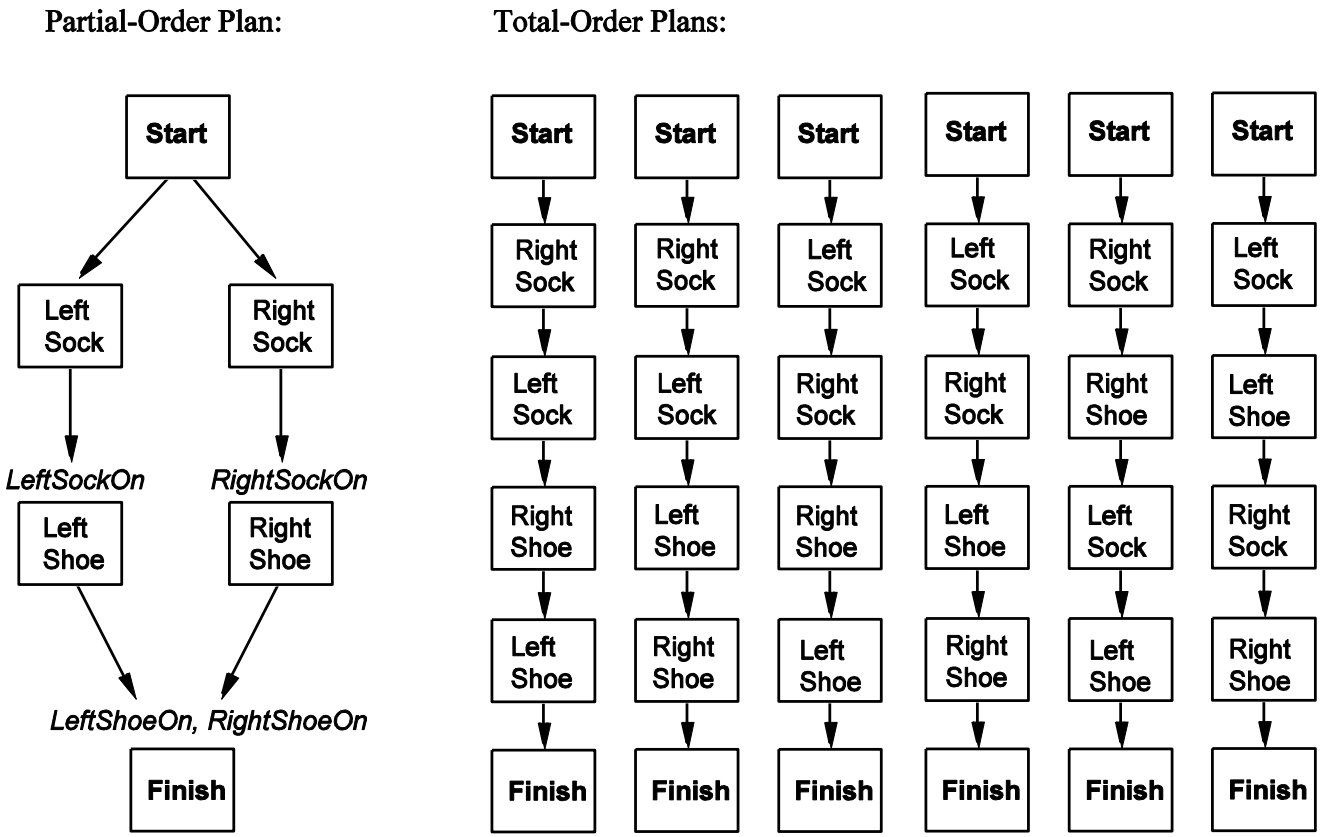
  (1) Verfeinerungsoperatoren machen den Plan konkreter (mehr Schritte, mehr Einschränkungen der Ordnung, Variablenbelegung, usw.)

  (2) Modifikationsoperatoren modifizieren den Plan (z.B. durch Fehlerbehebung von potentiell fehlerhaften Startplänen)

# Plan = Sequenz von Aktionen?

Oft ist es nicht sinnvoll oder möglich, sich bei der Reihenfolge früh festzulegen

↝ *nichtlineare* oder *partiell geordnete Pläne* (*least-commitment planning*)!




Links der partiell geordnete Plan P. Rechts die möglichen Linearisierungen von P

# Repräsentation partiell geordneter Pläne

- Ein Planschritt = *STRIPS-Operator*

- Ein *Plan* besteht aus

  1) Menge von *Planschritten* mit partieller Ausführungsordnung ($\prec$),

     wobei $S_i \prec S_j$ gdw. $S_i$ muss vor $S_j$ ausgeführt werden

  2) Menge von *Variablenbelegungen* $x = t$,

     wobei $x$ eine Variable und $t$ eine Konstante oder Variable ist

  3) Menge *kausaler Beziehungen* ($\rightarrow^c$)

     $S_i \rightarrow^c S_j$ bedeutet „$S_i$ erzeugt die Vorbedingung c für $S_j$“
     (impliziert $S_i \prec S_j$ )

- Lösungen für Planungsprobleme müssen *vollständig* und *konsistent* sein.

# Vollständigkeit und Konsistenz

*Vollständiger Plan*: Jede Vorbedingung eines Schrittes wird erfüllt:

1) $\forall\ S_j$ mit $c \in \text{Precond}(S_j)$ gilt:

   $\exists\ S_i$ mit $S_i \prec S_j$ und $c \in \text{Effects}(S_i)$ und

2) für jede Linearisierung des Plans gilt:

   $\forall\ S_k$ mit $S_i \prec S_k \prec S_j$ , $\neg c \notin \text{Effect}(S_k)$

*Konsistenter Plan*: widerspruchsfrei

1) wenn $S_i \prec S_j$ , dann $S_j \not\prec S_i$ und

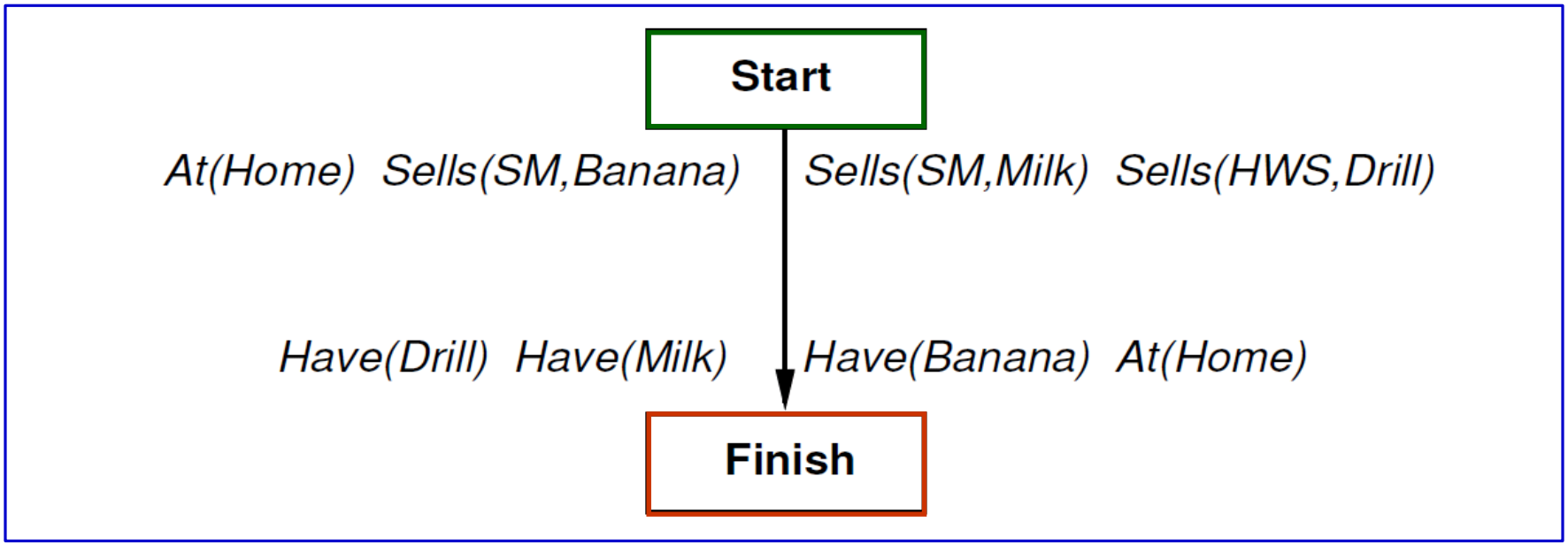
2) wenn x = A, dann x ≠ B

   für Variable *x* und verschiedene *A* und *B*

   (*Unique Name Assumption*)

Ein *vollständiger*, *konsistenter Plan* heißt *Lösung* eines Planungsproblems.

# Beispiel




Aktionen:

Op (Action: Go(there),
Precond: At(here),
Effect: At(there) $\wedge$ $\neg$At(here)

Op(Action: Buy(x),
Precond: At(store) $\wedge$ Sells(store, x),
Effect: Have(x))

- Home, Banana, Milk, Drill, SM (Supermarket), HWS (Hardware Store) sind Konstante
- there, here, x, store sind Variable
- Initialer Plan: Start-Step $\prec$ Finish-Step

# Planverfeinerung (1)

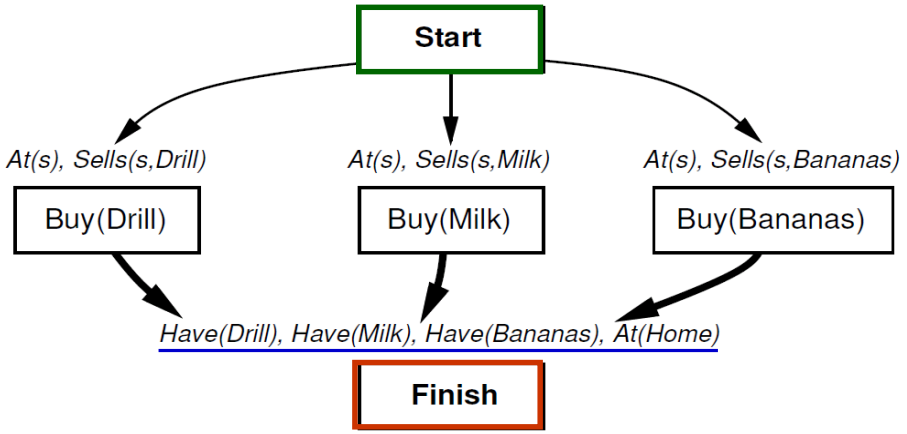
*Prinzip der Regressionsplanung*:

Erfülle *Have*-Prädikate des Ziels:

$$\text{Buy}(\text{Drill}) \xrightarrow{\text{Have}(\text{Drill})} \text{Finish}$$

$$\text{Buy}(\text{Milk}) \xrightarrow{\text{Have}(\text{Milk})} \text{Finish}$$

$$\text{Buy}(\text{Ban.}) \xrightarrow{\text{Have}(\text{Ban.})} \text{Finish}$$

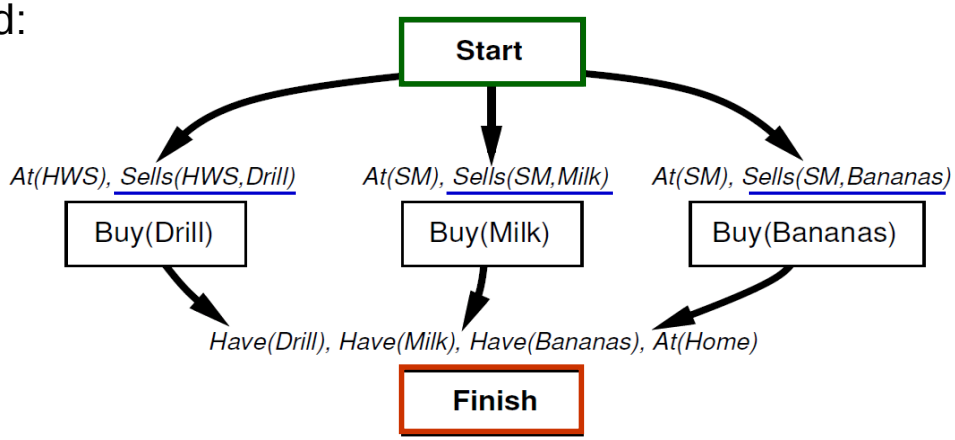



Erfülle *Sells*-Prädikate durch Startzustand:

$$\text{Start} \xrightarrow{\text{Sells}(\text{HWS},\text{Drill})} \text{Buy}(\text{Drill})$$

$$\text{Start} \xrightarrow{\text{Sells}(\text{SM},\text{Milk})} \text{Buy}(\text{Milk})$$

$$\text{Start} \xrightarrow{\text{Sells}(\text{SM},\text{Ban.})} \text{Buy}(\text{Ban.})$$




$$\text{Dünne Pfeile} = \prec, \text{Fette Pfeile} = \xrightarrow{c}$$

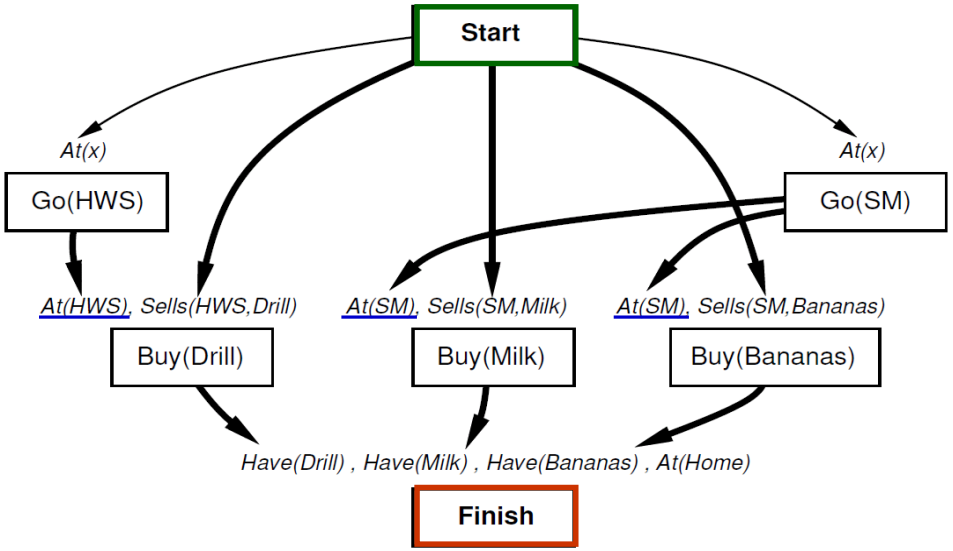
# Planverfeinerung (2)

Erfülle *At*-Prädikate der Buy-Aktionen:

$$\text{Go(HWS)} \xrightarrow{\text{At(HWS)}} \text{Buy (Drill)}$$

$$\text{Go(SM)} \xrightarrow{\text{At(SM)}} \text{Buy (Milk)}$$

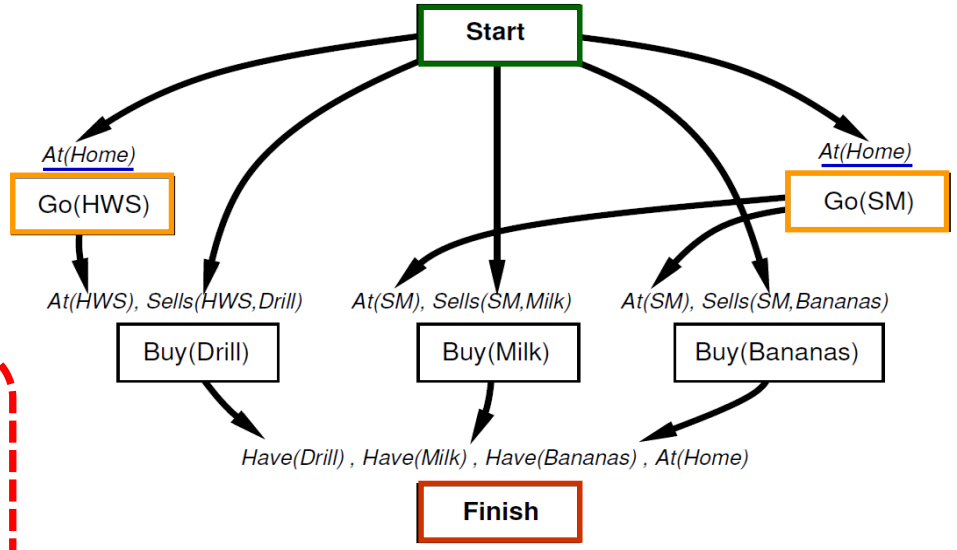
$$\text{Go(SM)} \xrightarrow{\text{At(SM)}} \text{Buy (Ban.)}$$




Erfülle *At*-Prädikate der Go-Aktionen durch Startzustand:

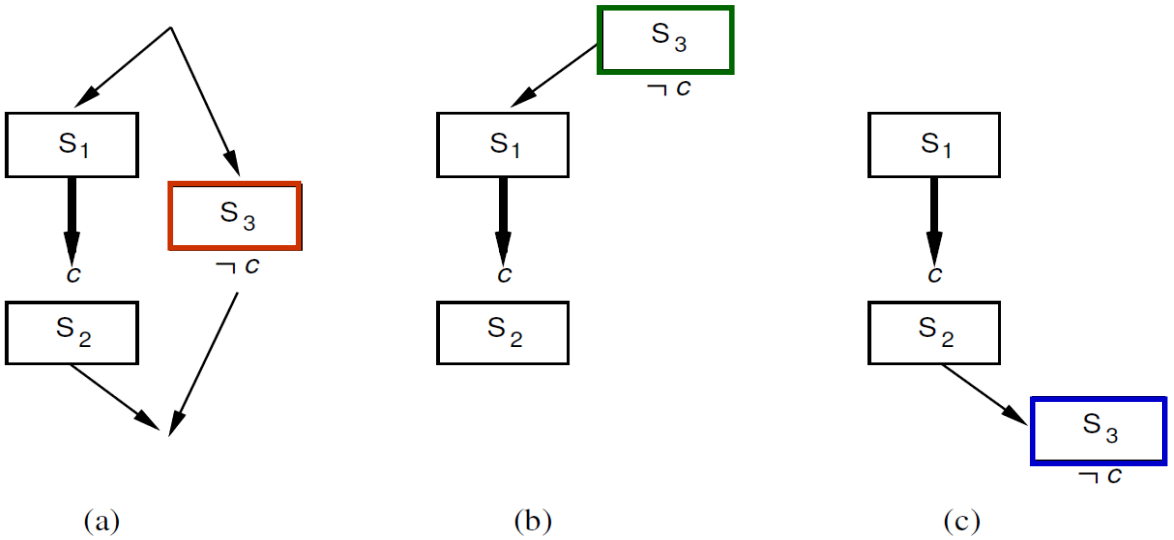
$$\text{Start} \xrightarrow{\text{At(Home)}} \text{Go(HWS)}$$

$$\text{Start} \xrightarrow{\text{At(Home)}} \text{Go(SM)}$$




Konflikt (Def.[Vollständigkeit] (2)):
Go(HWS) löscht Vorbedingung At(Home) von Go(SM) und umgekehrt!

# Schutz kausaler Beziehungen




a) Konflikt: $S_3$ „bedroht“ die kausale Beziehung zwischen $S_1$ und $S_2$

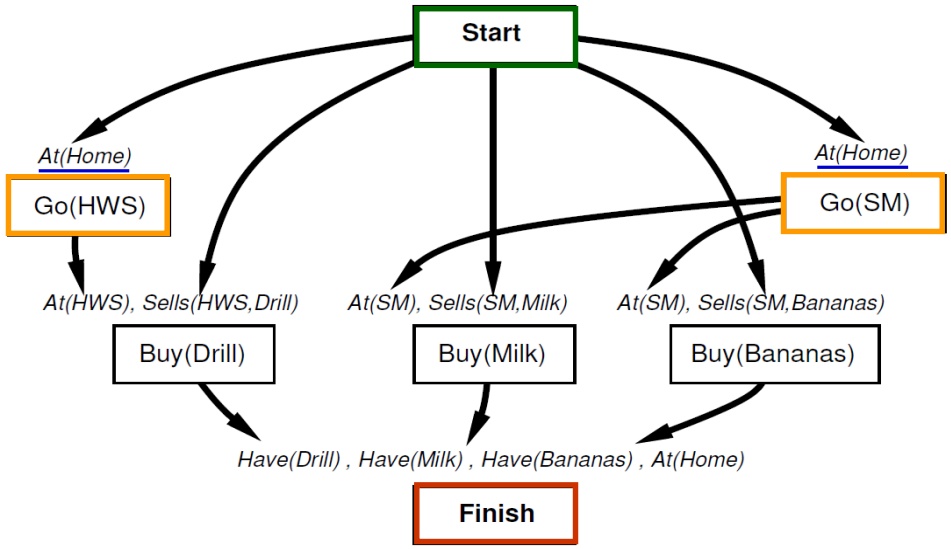
⇝ erster Versuch der Konfliktlösung durch *Reihenfolgeänderung*:

b) Demotion: den „Bedroher“ vor die kausale Beziehung legen

c) Promotion: den „Bedroher“ hinter die kausale Beziehung legen

# Planverfeinerung (3)

- Aber: hier können wir den Konflikt nicht durch Reihenfolgeänderung auflösen!
- Grund: Wir haben einen *wechselseitig kausalen Konflikt* in der gemeinsamen Instanziierung *x = Home* der Vorbedingungen *At(x)* von Go(HWS) und *At(x)* von Go(SM) erzeugt, da beide Schritte dieses Prädikat als Effekt negieren



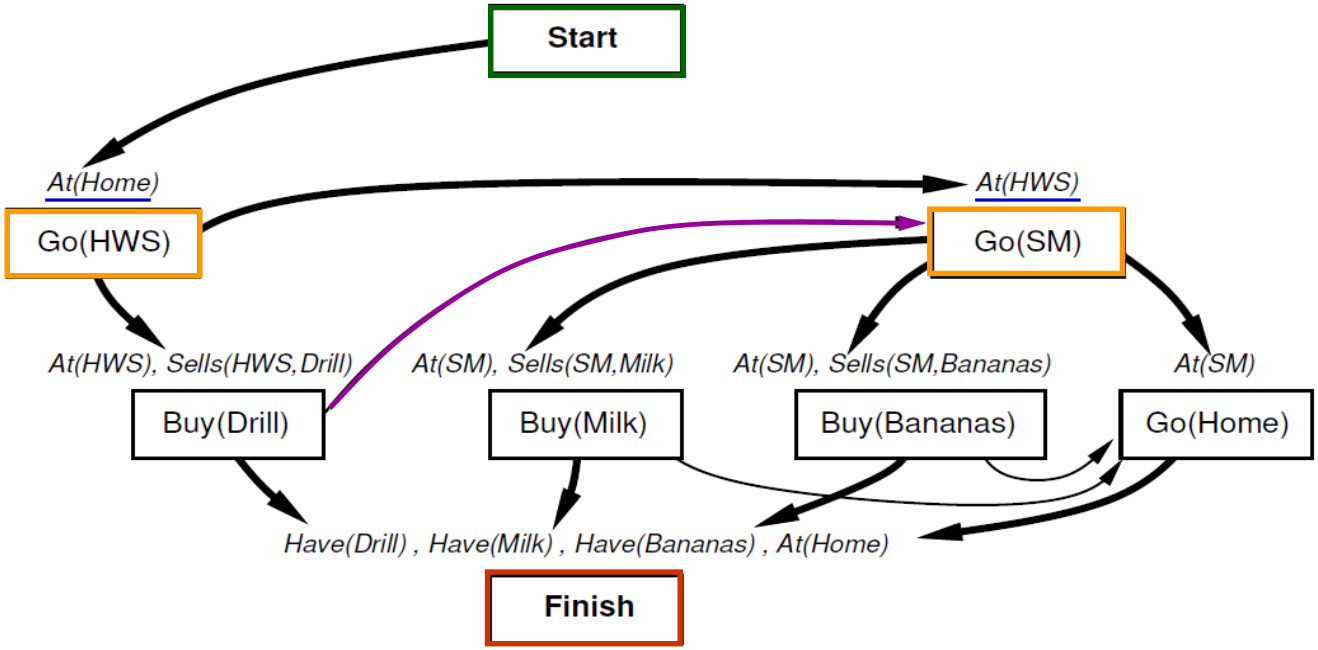
# Planverfeinerung (4)

- Alternative: Bei der Instanziierung der Vorbedingung *At(x)* der Aktion Go(SM) wählen wir jetzt *x = HWS* anstelle von *x = Home*:

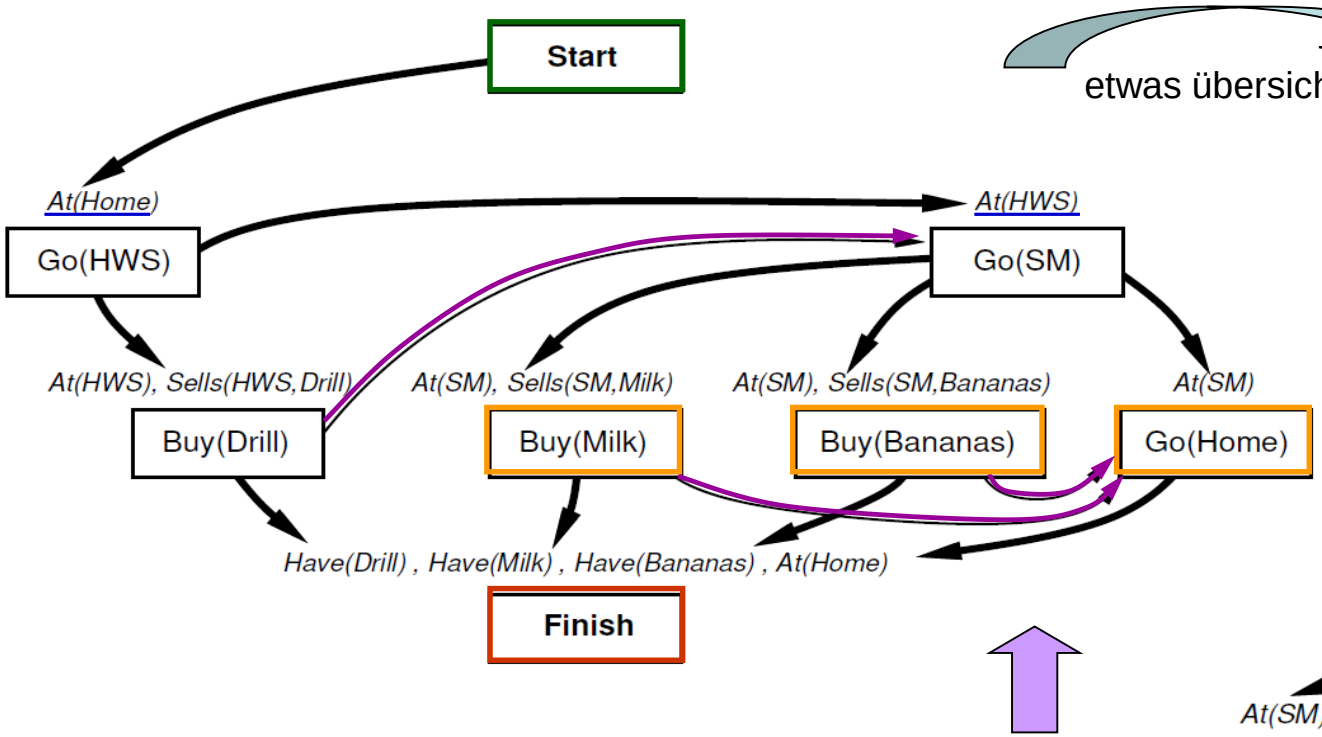
  ⇝ Go(SM) mit Effekt At(SM) bedroht nun At(HWS) von Buy(Drill)

  ⇝ Promotion von Go(SM) nach Buy(Drill)

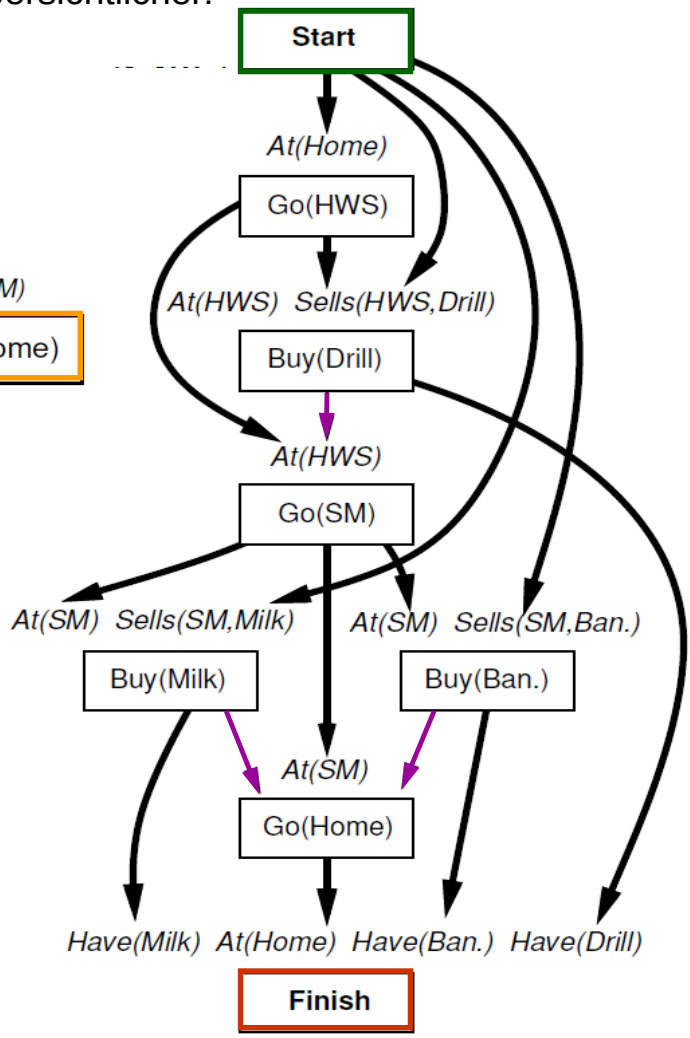
  ⇝ Erfüllung des letzten Ziels At(Home) durch Go(Home)



# Die vollständige Lösung




etwas übersichtlicher:




↝ Go(Home) mit Effekt At(Home) bedroht nun At(SM) von Buy(Bananas) und Buy(Milk)

↝ Promotion von Go(Home) nach Buy(Bananas) und Buy(Milk)

# Der Partial-Order-Planning-Algorithmus POP

**function** POP(*initial, goal, operators*) **returns** *plan*

*plan* ← MAKE-MINIMAL-PLAN(*initial, goal*)
**loop do**
  **if** SOLUTION?(*plan*) **then return** *plan*
  $S_{need}$, $c$ ← SELECT-SUBGOAL(*plan*)
  CHOOSE-OPERATOR(*plan, operators*, $S_{need}$, $c$)
  RESOLVE-THREATS(*plan*)
**end**

---

**function** SELECT-SUBGOAL(*plan*) **returns** $S_{need}$, $c$

pick a plan step $S_{need}$ from STEPS(*plan*)
  with a precondition $c$ that has not been achieved
**return** $S_{need}$, $c$

---

**procedure** CHOOSE-OPERATOR(*plan, operators*, $S_{need}$, $c$)

**choose** a step $S_{add}$ from *operators* or STEPS(*plan*) that has $c$ as an effect
**if** there is no such step **then fail**
add the causal link $S_{add} \xrightarrow{c} S_{need}$ to LINKS(*plan*)
add the ordering constraint $S_{add} \prec S_{need}$ to ORDERINGS(*plan*)
**if** $S_{add}$ is a newly added step from *operators* **then**
  add $S_{add}$ to STEPS(*plan*)
  add *Start* $\prec S_{add} \prec$ *Finish* to ORDERINGS(*plan*)

---

**procedure** RESOLVE-THREATS(*plan*)

**for each** $S_{threat}$ that threatens a link $S_i \xrightarrow{c} S_j$ in LINKS(*plan*) **do**
  **choose** either
    *Demotion:* Add $S_{threat} \prec S_i$ to ORDERINGS(*plan*)
    *Promotion:* Add $S_j \prec S_{threat}$ to ORDERINGS(*plan*)
  **if not** CONSISTENT(*plan*) **then fail**
**end**

# Eigenschaften des POP-Algorithmus

**Man kann zeigen:**

- Korrektheit von POP**:** Jedes Resultat des POP-Algorithmus ist ein vollständiger, konsistenter Plan
- Vollständigkeit von POP**:** Falls Breitensuche oder iterative Tiefensuche benutzt wird, findet der Algorithmus eine Lösung, falls eine existiert

Aber:

⇝ Instanziierungen von Variablen werden bislang nicht behandelt

# Variablen

Falls eine Variable in einem Literal eines „Effect“ auftaucht, z.B. $\neg At(x)$, kann dieses Literal eine *potentielle Bedrohung* für eine kausale Beziehung sein.

Konfliktauflösungen:

(1) Durch *Gleichheits-Constraint* (z.B. $x = HWS$) sobald $At(x)$ gefunden wird, um nicht $At(SM)$ zu bedrohen

(2) Durch *Ungleichheits-Constraint* (z.B. $x \neq SM$). Nicht so einschränkend wie (1)
→ erfordert jedoch Spracherweiterung für Unifikation, die bislang nur mit Gleichheit arbeitet

(3) Später durchführen, wenn nach Variableninstanziierung wirklich nötig

→ wir wählen (3)

# Behandlung von Variablen

**procedure** CHOOSE-OPERATOR(*plan*, *operators*, $S_{need}$, $c$)

**choose** a step $S_{add}$ from *operators* or STEPS(*plan*) that has $c_{add}$ as an effect
such that $u$ = UNIFY(c, $c_{add}$, BINDINGS(*plan*))
**if** there is no such step
**then fail**
add $u$ to BINDINGS(*plan*)
add $S_{add} \xrightarrow{c} S_{need}$ to LINKS(*plan*)
add $S_{add} \prec S_{need}$ to ORDERINGS(*plan*)
**if** $S_{add}$ is a newly added step from *operators* **then**
add $S_{add}$ to STEPS(*plan*)
add *Start* $\prec S_{add} \prec$ *Finish* to ORDERINGS(*plan*)

Hier sind ggf. Alternativen möglich ⇝ Backtracking

**procedure** RESOLVE-THREATS(*plan*)

**for each** $S_i \xrightarrow{c} S_j$ **in** LINKS(*plan*) **do**
**for each** $S_{threat}$ **in** STEPS(*plan*) **do**
**for each** $c'$ **in** EFFECT($S_{threat}$) **do**
**if** SUBST(BINDINGS(*plan*), $c$) = SUBST(BINDINGS(*plan*), $\neg c'$) **then**
**choose** either
*Demotion:* Add $S_{threat} \prec S_i$ to ORDERINGS(*plan*)
*Promotion:* Add $S_j \prec S_{threat}$ to ORDERINGS(*plan*)
**if not** CONSISTENT(*plan*)
**then fail**
**end**
**end**
**end**

Führt zu vollständig instanziierten Plänen, falls Initialzustand variablenfrei und alle Operatoren alle Variablen in den Vorbedingungen benutzen.

Ansonsten muss *Solution?* geändert werden, indem nachträglich uninstanziierte Variablen konsistent instanziiert werden.

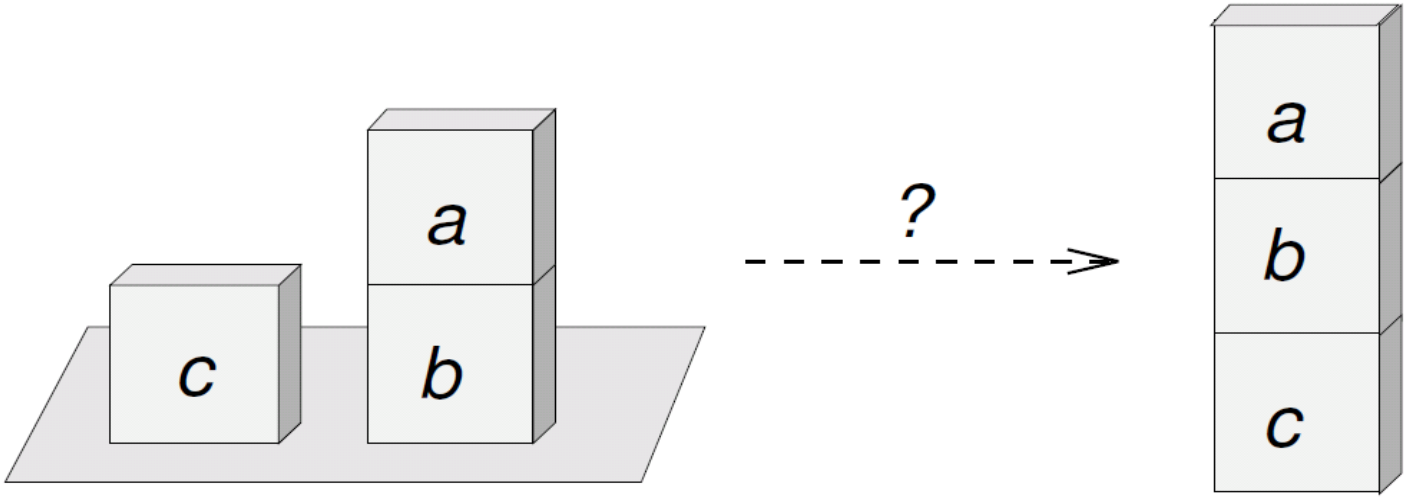
# Modellierung in STRIPS

Ähnlich wie bisher auch schon (Problemlösen, PL1), muss man bei der Modellierung von Aufgaben die folgenden Schritte durchführen:

- Entscheiden, worüber man sprechen will.
- Ein Vokabular für Bedingungen, Operatoren und Objekte festlegen.
- Operatoren kodieren.
- Probleminstanzen kodieren.

Dann kann ein Planer Lösungen produzieren.

# Klassisches Beispiel: Blockwelt




- Es gibt benannte Blöcke und eine Tischplatte in der Welt.
- Auf der Tischplatte können beliebig viele Blöcke stehen.
- Auf einem Block kann nur ein anderer Block stehen.
- Ein Block kann nur bewegt werden, wenn kein anderer Block auf ihm steht.
- Umstürzen von Blöcken usw. ist nicht erlaubt.

# Modellierung der Blockwelt

- Nur die Blöcke als Objekte modellieren, die Tischplatte ist implizit repräsentiert.

  ⇝ Objekte: a, b, c

- Man repräsentiert explizit, ob ein Block bewegt werden kann und ob er auf dem Tisch liegt.

  ⇝ Prädikate:

- *On(x, y)*: *x* liegt auf *y*
- *OnTable(x)*: *x* liegt auf der Tischplatte
- *Clear(x)*: Es liegt nichts auf *x*

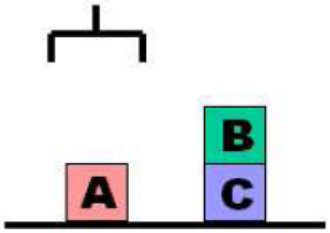
- Es gibt Operatoren, um Blöcke von Blöcken auf andere Blöcke zu bewegen.
- Es gibt Operatoren, um Blöcke vom Tisch auf einen anderen Block zu bewegen und umgekehrt.

  ⇝ Operatoren: *move(x, y, z)*, *stack(x, y)*, *unstack(x, y)*, …

# Modellierung der Blockwelt

Eine etwas erweiterte Repräsentation der Blockwelt mit Berücksichtigung einer manipulierenden Roboterhand. Hier mit Angabe eines Start- und Zielzustandes sowie leicht modifizierter Notation.

Start:




Handempty
Ontable(A)
Clear(A)
Ontable(C)
On(B,C)
Clear(B)

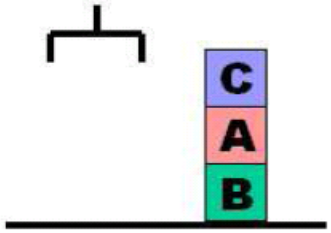
pickup(x)
Cond & Del: Ontable(x), Clear(x), Handempty
Add: Holding(x)

putdown(x)
Cond & Del: Holding(x)
Add: Ontable(x), Clear(x), Handempty

stack(x)
Cond & Del: Holding(x), Clear(y)
Add: On(x,y), Clear(x), Handempty

unstack(x)
Cond & Del: On(x,y), Clear(x), Handempty
Add: Holding(x), Clear(y)

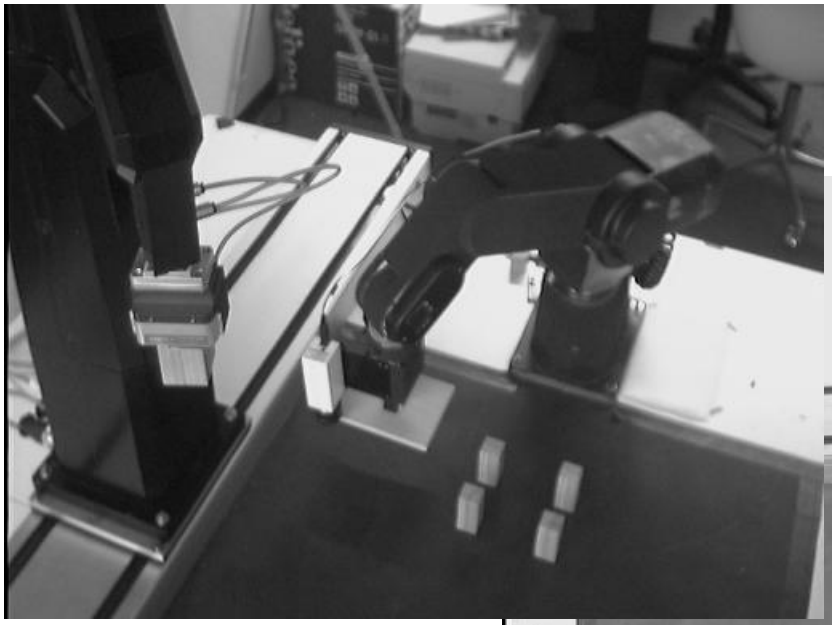
Ziel:

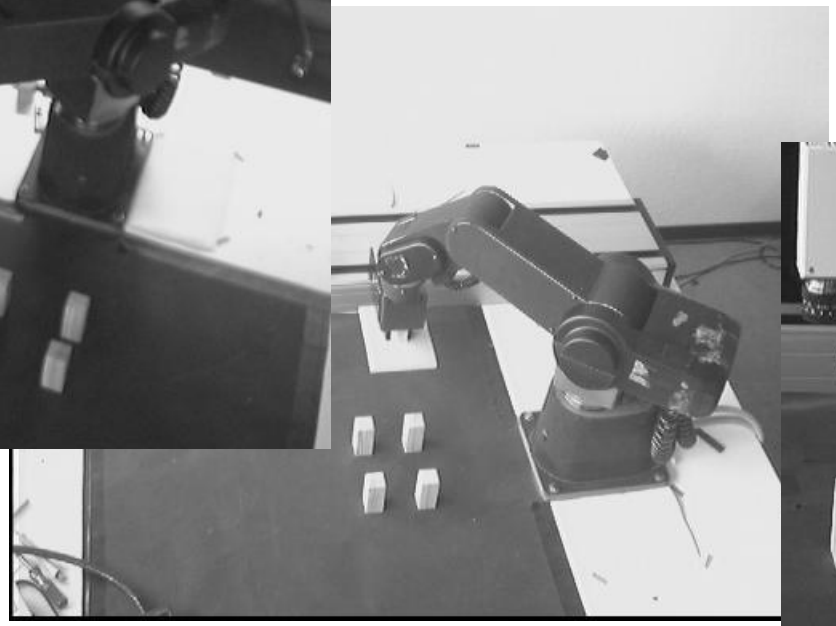


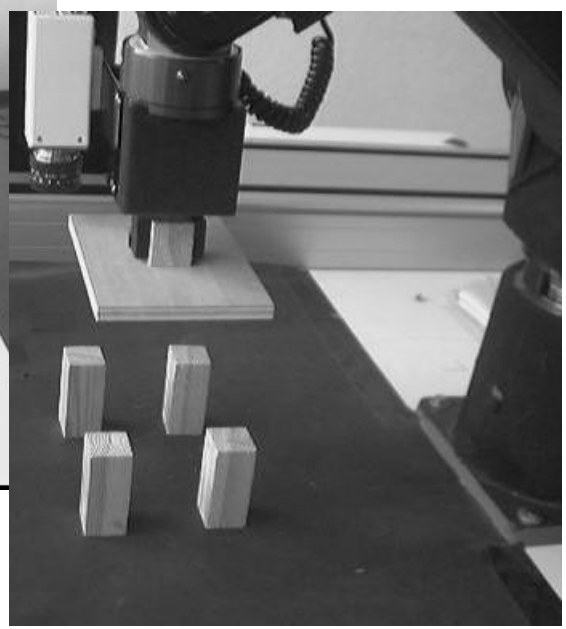

Handempty
Ontable(B)
On(A,B)
On(C,A)
Clear(C)

# Laboranwendung der Blockwelt

Eine Variante der Blockwelt in einer einfachen Laboranwendung, in der ein Roboterarm eine Zielkonstellation erstellen soll.







# Zusammenfassung

- Im Prinzip ist Planung auf *logische Inferenz* im *Situationskalkül* reduzierbar; das ist aber sehr ineffizient.
- Handlungsplanung zeigt gegenüber Problemlösen eine *flexiblere Repräsentation*:
  - Unterscheidung zwischen *Zuständen* und *Aktionen* mit Vor-/Nachbedingungen
    - ⇝ Effiziente Kombination zwischen Zuständen und Aktionen möglich
  - Arbeiten im *Planungsraum*: flexibles Einfügen von erfüllenden Aktionen dort, wo nötig nach dem Least-Commitment-Prinzip (s.u.).
    - ⇝ Kein starres inkrementelles Planen von Start zu Ziel.
  - *Nichtlineares Planen* nach dem Prinzip der *geringsten Festlegung* (least commitment): Entscheidungen nur dann treffen, wenn nötig.
    - ⇝ Unterteilung in unabhängige Teilpläne.
  - Der POP-Algorithmus realisiert *nichtlineares* Planen, liefert partiell geordnete Pläne und ist *vollständig* und *konsistent*.