Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

16. Handlungsplanung: Abstraktion

Malte Helmert

Universität Basel

13. Mai 2013

Handlungsplanung: Überblick

Kapitelüberblick:

- Einführung und Formalisierung $\rightsquigarrow$ Kapitel 14
- Drei Kernideen für allgemeine Heuristiken:
  - Delete-Relaxierung $\rightsquigarrow$ Kapitel 15
  - Abstraktion $\rightsquigarrow$ dieses Kapitel
  - Landmarken $\rightsquigarrow$ Kapitel 17

Handlungsplanung: Überblick

Kapitelüberblick:

- Einführung und Formalisierung $\rightsquigarrow$ Kapitel 14
- Drei Kernideen für allgemeine Heuristiken:
  - Delete-Relaxierung $\rightsquigarrow$ Kapitel 15
  - Abstraktion $\rightsquigarrow$ dieses Kapitel
  - Landmarken $\rightsquigarrow$ Kapitel 17

Grundidee Abstraktion

Schätze Lösungskosten durch Betrachten einer kleineren Planungsaufgabe ab.

SAS^+

SAS$^+$-Kodierung

- In diesem Kapitel: SAS$^+$-Kodierung statt STRIPS (siehe Kapitel 14)
- Unterschied: Zustandsvariablen nicht alle binär, sondern mit endlichem Wertebereich $\mathrm{dom}(v)$
- entsprechend Vorbedingungen, Effekte und Ziele als partielle Belegungen gegeben
- sonst alles gleich wie STRIPS

(Praktische Planer konvertieren automatisch zwischen STRIPS und SAS$^+$.)

SAS$^+$-Planungsaufgabe

Definition (SAS$^+$-Planungsaufgabe)

Eine SAS$^+$-Planungsaufgabe ist ein 5-Tupel $\Pi = \langle V, \mathrm{dom}, I, G, A \rangle$ mit folgenden Komponenten:

- V: endliche Menge von Zustandsvariablen
- dom: Wertebereiche; $\mathrm{dom}(v)$ für $v \in V$ endlich, nicht-leer
  - Zustände sind totale Belegungen für V gemäss dom
- I: der Anfangszustand (Zustand = totale Belegung)
- G: Ziele (partielle Belegung)
- A: endliche Menge von Aktionen, jeweils mit:
  - $pre(a)$: ihre Vorbedingungen (partielle Belegung)
  - $eff(a)$ ihre Effekte (partielle Belegung)
  - $cost(a) \in \mathbb{N}_0$: ihre Kosten

Zustandsraum zu einer SAS$^+$-Planungsaufgabe

Definition (von SAS$^+$-Planungsaufgabe induz. Zustandsraum)

Sei $\Pi = \langle V, \mathrm{dom}, I, G, A \rangle$ eine SAS$^+$-Planungsaufgabe.

Dann induziert Π den Zustandsraum $\mathcal{S}(\Pi) = \langle S, A, cost, T, s_0, S_\star \rangle$:

- Zustandsmenge: totale Belegungen von V gemäss dom
- Aktionen: die Aktionen A von Π
- Aktionskosten: *cost* ist wie in Π definiert
- Transitionen: $s \xrightarrow{a} s'$ für Zustände s, s' und Aktion a gdw.:
  - partielle Belegung $pre(a)$ ist Teilbelegung von s (Vorbedingungen erfüllt)
  - s' entspricht $eff(a)$ für alle Variablen, die in *eff* erwähnt werden; entspricht s für alle anderen Variablen (Effekte werden angewandt)
- Anfangszustand: $s_0 = I$
- Zielzustände: $s \in S_\star$ für Zustand s gdw. G Teilbelegung von s

Beispiel: Logistikaufgabe mit einem Paket, zwei Lastwagen

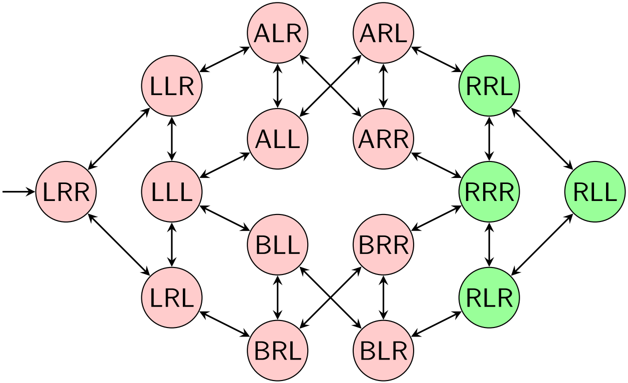
Beispiel (ein Paket, zwei Lastwagen)

Betrachte die SAS$^+$-Planungsaufgabe $\langle V, \mathrm{dom}, I, G, A\rangle$ mit:

- $V = \{p, t_\mathsf{A}, t_\mathsf{B}\}$
- $\mathrm{dom}(p) = \{\mathsf{L}, \mathsf{R}, \mathsf{A}, \mathsf{B}\}$ und $\mathrm{dom}(t_\mathsf{A}) = \mathrm{dom}(t_\mathsf{B}) = \{\mathsf{L}, \mathsf{R}\}$
- $I = \{p \mapsto \mathsf{L}, t_\mathsf{A} \mapsto \mathsf{R}, t_\mathsf{B} \mapsto \mathsf{R}\}$ und $G = \{p \mapsto \mathsf{R}\}$
- $A = \{pickup_{i,j} \mid i \in \{\mathsf{A}, \mathsf{B}\}, j \in \{\mathsf{L}, \mathsf{R}\}\}$
  $\cup \{drop_{i,j} \mid i \in \{\mathsf{A}, \mathsf{B}\}, j \in \{\mathsf{L}, \mathsf{R}\}\}$
  $\cup \{move_{i,j,j'} \mid i \in \{\mathsf{A}, \mathsf{B}\}, j, j' \in \{\mathsf{L}, \mathsf{R}\}, j \neq j'\}$ mit:
  - $pickup_{i,j}$ hat Vorbedingungen $\{t_i \mapsto j, p \mapsto j\}$, Effekte $\{p \mapsto i\}$
  - $drop_{i,j}$ hat Vorbedingungen $\{t_i \mapsto j, p \mapsto i\}$, Effekte $\{p \mapsto j\}$
  - $move_{i,j,j'}$ hat Vorbedingungen $\{t_i \mapsto j\}$, Effekte $\{t_i \mapsto j'\}$
  - Alle Aktionen haben Kosten 1.

pickup entspricht load und drop entspricht unload im Vorkapitel
(umbenannt, damit Abkürzungen im Folgenden eindeutiger sind)

Zustandsraum für Beispielaufgabe



- Zustand $\{p \mapsto i, t_\mathrm{A} \mapsto j, t_\mathrm{B} \mapsto k\}$ abgebildet als *ijk*.
- Kantenbeschriftungen der Übersicht halber weggelassen. Zum Beispiel hat die Kante von LLL zu ALL die Beschriftung $\mathit{pickup}_{\mathrm{A,L}}$.

Abstraktionen

Abstraktion eines Zustandsraums

Eine Abstraktion eines Zustandsraums gibt die Unterscheidung zwischen bestimmten Zuständen auf, bewahrt dabei aber das Verhalten des Zustandsraums so weit wie möglich.

- Eine Abstraktion eines Zustandsraums $\mathcal{S}$ ist durch eine Abstraktionsfunktion α definiert, die festlegt, welche Zustände unterschieden werden sollen und welche nicht.
- Aus $\mathcal{S}$ und α berechnen wir den abstrakten Zustandsraum $\mathcal{S}'$, der ähnlich zu $\mathcal{S}$ ist, aber kleiner.

Abstraktionsheuristik

Verwende die abstrakten Zielabstände (Zielabstände in $\mathcal{S}'$) als Heuristikwerte für die konkreten Zielabstände (Zielabstände in $\mathcal{S}$)
$\rightsquigarrow$ Abstraktionsheuristik h^α

Induzierte Abstraktion

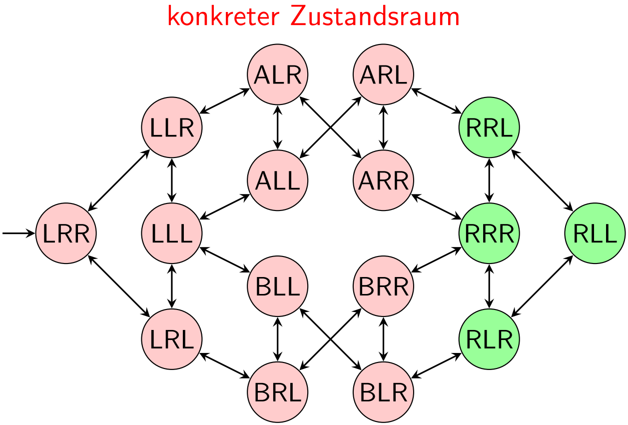
Definition (induzierte Abstraktion)

Sei $\mathcal{S} = \langle S, A, cost, T, s_0, S_\star \rangle$ ein Zustandsraum,
und sei $\alpha : S \to S'$ eine surjektive Funktion.

Die durch α induzierte Abstraktion von $\mathcal{S}$, geschrieben $\mathcal{S}^\alpha$,
ist der Zustandsraum $\mathcal{S}^\alpha = \langle S', A, cost, T', s'_0, S'_\star \rangle$ mit:

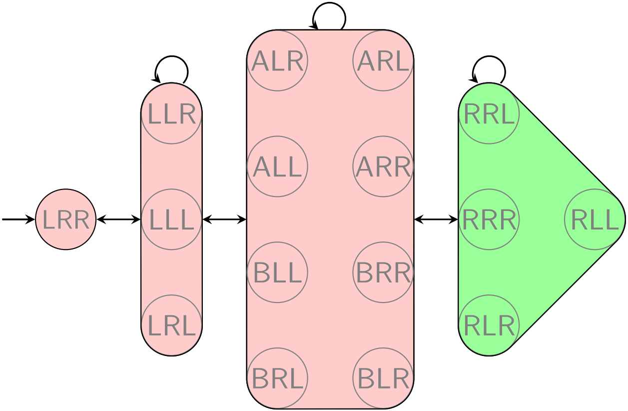
- $T' = \{\langle \alpha(s), a, \alpha(t) \rangle \mid \langle s, a, t \rangle \in T\}$
- $s'_0 = \alpha(s_0)$
- $S'_\star = \{\alpha(s) \mid s \in S_\star\}$

Abstraktion: Beispiel



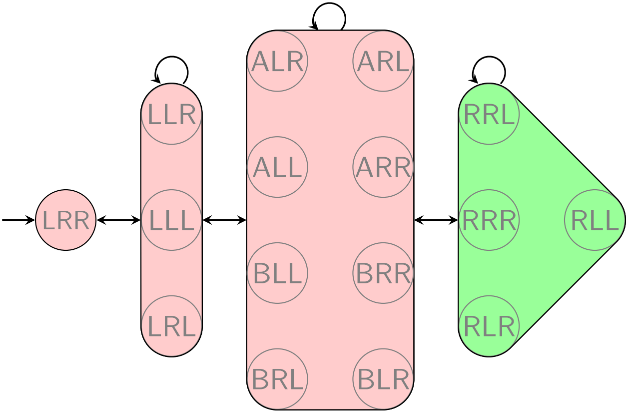
Abstraktion: Beispiel

(ein) abstrakter Zustandsraum



Anmerkung: Die meisten Kanten entsprechen mehreren parallelen Transitionen mit unterschiedlichen Beschriftungen.

Abstraktionsheuristik: Beispiel

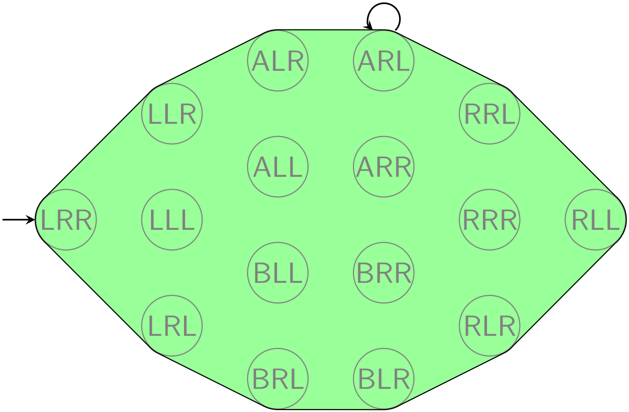


$h^{\alpha}(\{p \mapsto \mathsf{L}, t_{\mathsf{A}} \mapsto \mathsf{R}, t_{\mathsf{B}} \mapsto \mathsf{R}\}) = 3$

Abstraktionsheuristiken: Diskussion

- Jede Abstraktionsheuristik ist zulässig und konsistent. (Beweisidee?)
- Die Wahl der Abstraktionsfunktion α ist äusserst wichtig.
  - Jedes α liefert eine zulässige und konsistente Heuristik.
  - Aber nur wenige solche Heuristiken sind wirklich informativ.
- Ein praktisches α muss eine informative Heuristik liefern. . .
- . . . und effizient berechnet werden können.
- Wie finden wir ein geeignetes α?

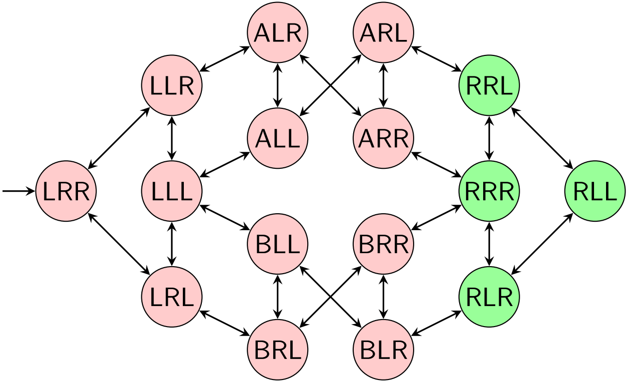
Meist schlechte Idee: Ein-Zustand-Abstraktion



Ein-Zustand-Abstraktion: $\alpha(s) :=$ const

+ sehr kompakt repräsentierbar und α leicht berechenbar
− völlig uninformative Heuristik

Meist schlechte Idee: Identitätsabstraktion



Identitätsabstraktion: $\alpha(s) := s$

- $+$ perfekte Heuristik und α leicht berechenbar
- $-$ zu viele abstrakte Zustände $\rightsquigarrow$ Berechnung von h^α zu schwer

Automatische Berechnung guter Abstraktion

Hauptproblem bei Planen mit Abstraktionsheuristiken

Wie finden wir eine gute Abstraktion?

Wir stellen zwei erfolgreiche Methoden vor:

- Musterdatenbanken (pattern databases, PDBs) (Culberson & Schaeffer, 1996)
- Merge-and-Shrink-Abstraktionen (Dräger, Finkbeiner & Podelski, 2006)

Musterdatenbanken

Musterdatenbanken

- Die am häufigsten verwendeten Abstraktionsheuristiken sind Musterdatenbank-Heuristiken (PDB-Heuristiken).
- eingeführt für das 15-Puzzle (Culberson & Schaeffer, 1996) und den Zauberwürfel (Korf, 1997).
- für Handlungsplanung eingeführt von Edelkamp (2001)
- für viele Suchprobleme die besten bekannten Heuristiken
- viele viele Arbeiten zu
  - theoretischen Eigenschaften
  - effizienter Nutzung
  - Auswahl guter Muster
  - ...

Musterdatenbanken: informell

Musterdatenbanken: informell

Eine PDB-Heuristik für eine Planungsaufgabe
ist eine Abstraktionsheuristik, bei der

- einige Aspekte (= Zustandsvariablen) mit perfekter Genauigkeit berücksichtigt werden, während
- alle anderen Aspekte überhaupt nicht berücksichtigt werden.

Beispiel (15-Puzzle)

- Wähle Teilmenge P der Kacheln (das Muster bzw. Pattern).
- Berücksichtige in der Abstraktion den exakten Ort der Kacheln in P.
- Nimm in der Abstraktion an, dass alle anderen Kacheln und das freie Feld überall sein können.

Projektionen

PDB-Heuristiken sind Abstraktionsheuristiken für eine bestimmte Art von Abstraktionsfunktionen, nämlich Projektionen.

Definition (Projektion)

Sei Π eine Planungsaufgabe mit Variablen V und Zuständen S. Sei $P \subseteq V$, und sei S' die Menge der partiellen Belegungen, die genau auf P definiert sind.

Die Projektion $\pi_P : S \to S'$ ist definiert als $\pi_P(s) := s|_P$ (mit $s|_P(v) := s(v)$ für alle $v \in P$).

Wir nennen P das Muster (Pattern) der Projektion π_P.

Anders gesagt: π_P bildet zwei Zustände s_1 und s_2 genau dann auf denselben abstrakten Zustand ab, wenn sie auf allen Variablen in P übereinstimmen.

Musterdatenbank-Heuristiken

Definition (Musterdatenbank-Heuristik)

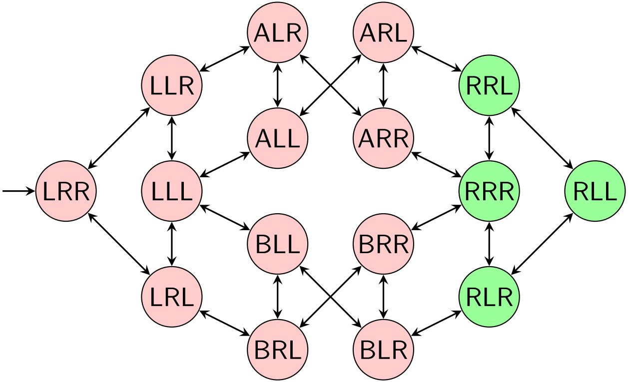
Abstraktionsheuristiken, die durch Projektion π_P induziert werden, heissen Musterdatenbank-Heuristiken (PDB-Heuristiken).

Kurzschreibweise: h^P für h^{π_P}

Warum der Name PDB-Heuristik?

- Heuristikwerte für PDB-Heuristiken werden üblicherweise in einer 1-dimensionalen Tabelle (Array) gespeichert.
- Diese Tabellen nennt man PDBs.

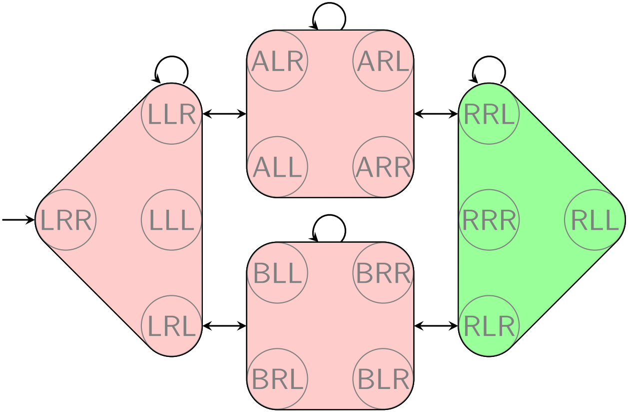
Beispiel: konkreter Zustandsraum



- Zustandsvariable *package*: $\{L, R, A, B\}$
- Zustandsvariable *truck A*: $\{L, R\}$
- Zustandsvariable *truck B*: $\{L, R\}$

Beispiel: Projektion (1)

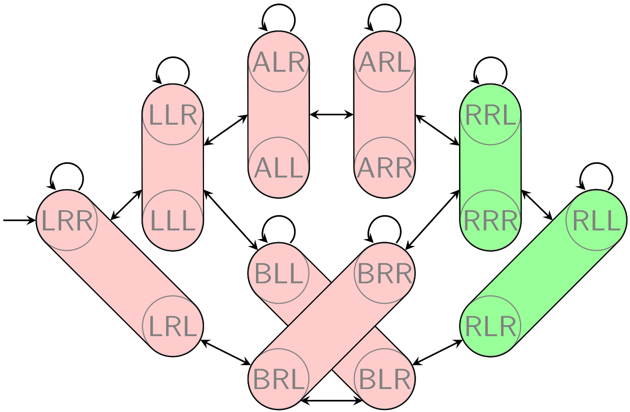
Von $\pi_{\{package\}}$ induzierte Abstraktion:



$$h^{\{package\}}(\mathsf{LRR}) = 2$$

Beispiel: Projektion (2)

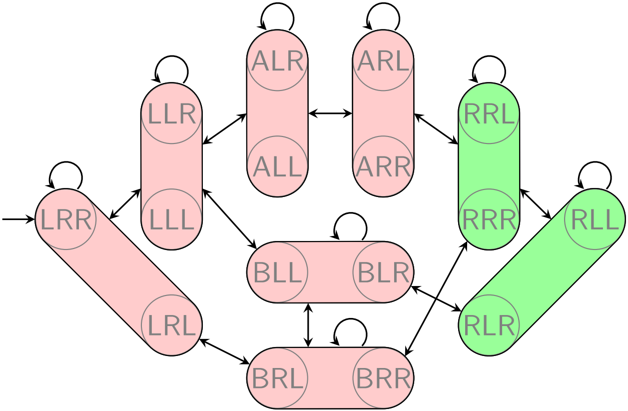
Von $\pi_{\{package, truck\ A\}}$ induzierte Abstraktion:



$$h^{\{package, truck\ A\}}(\text{LRR}) = 2$$

Beispiel: Projektion (2)

Von $\pi_{\{package, truck\ A\}}$ induzierte Abstraktion:



$$h^{\{package, truck\ A\}}(\text{LRR}) = 2$$

Musterdatenbanken in der Praxis

Praktische Aspekte, auf die wir nicht eingehen:

- Wie finden wir automatisch gute Patterns?
- Wie kombinieren wir sinnvoll mehrere PDB-Heuristiken?
- Wie implementieren wir PDB-Heuristiken effizient?
  - gute Implementierungen berechnen schnell Patterns für abstrakte Zustandsräume mit 10^7, 10^8 oder mehr Zuständen
  - Aufwand unabhängig von Grösse des konkreten Zustandsraums
  - meist werden alle Heuristikwerte vorberechnet $\rightsquigarrow$ Platzaufwand $=$ Anzahl abstrakter Zustände

Merge-and-Shrink

Jenseits von Musterdatenbanken

- Trotz ihrer Popularität haben PDBs fundamentale Grenzen: die Muster müssen klein gehalten werden
- Preis in heuristischer Genauigkeit:
  - betrachte Verallgemeinerung des Beispiels: N Lastwagen, M Orte (ein Paket)
  - betrachte beliebiges Muster, das nicht alle Variablen in V umfasst
  - $h(s_0) \leq 2 \rightsquigarrow$ nicht besser als atomare Projektion auf das Paket
- Merge-and-Shrink-Abstraktionen (M&S) sind eine echte Verallgemeinerung von PDBs.
  - Sie können PDBs repräsentieren (mit polynomiellem Zusatzaufwand).
  - Sie können Abstraktionen kompakt repräsentieren, bei denen dies mit PDBs nicht möglich ist.

Merge-and-Shrink: Abgrenzung zu PDBs

M&S-Abstraktionen vs. Musterdatenbanken

Während PDBs einige wenige Zustandsvariablen perfekt im abstrakten Zustandsraum repräsentieren, repräsentieren M&S-Abstraktionen alle Zustandsvariablen, aber in einer verlustbehafteten Weise.

M&S-Abstraktionen: Kernideen

Kernideen bei M&S:

1. Informationen von zwei abstrakten Zustandsräumen $\mathcal{A}$ und $\mathcal{A}'$ für denselben konkreten Zustandsraum können durch eine einfache Graphenoperation kombiniert werden: synchrones Produkt $\mathcal{A} \otimes \mathcal{A}'$.
2. Der konkrete Zustandsraum $\mathcal{S}$ einer SAS$^+$-Planungsaufgabe kann aus den atomaren Projektionen rekonstruiert werden:

$$\bigotimes_{v \in V} \mathcal{S}^{\pi_{\{v\}}} \text{ ist isomorph zu } \mathcal{S}$$

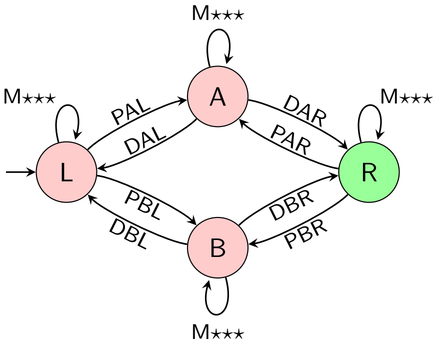
$\rightsquigarrow$ baue feine Abstraktionen aus gröberen

Beispiel: Abkürzungen

- Für das synchrone Produkt sind die Kantenbeschriftungen in den Zustandsräumen (die „Aktionsnamen“) sehr wichtig.
- Wir geben sie deshalb im Folgenden in den Abbildungen an.
- Dabei verwenden wir Abkürzungen der folgenden Art:
  - MALR: move truck A from left to right
  - DAR: drop package from truck A at right location
  - PBL: pick up package with truck B at left location
- Oft gibt es viele Parallelkanten. Wir kürzen diese mit Kommata und Platzhaltern ab wie in diesen Beispielen:
  - PAL, DAL: parallele Kanten für Aktionen PAL und DAL
  - MA$\star\star$: parallele Kanten für Aktionen MALR und MARL

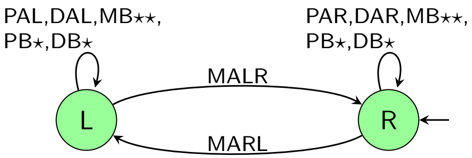
Beispiel: atomare Projektion für das Paket

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}}$:



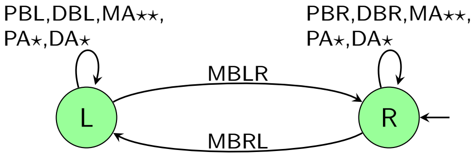
Beispiel: atomare Projektion für Lastwagen A

$\mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$:



Beispiel: atomare Projektion für Lastwagen B

$\mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ B\}}}$:



Synchrones Produkt von Zustandsräumen

Definition (synchrones Produkt von Zustandsräumen)

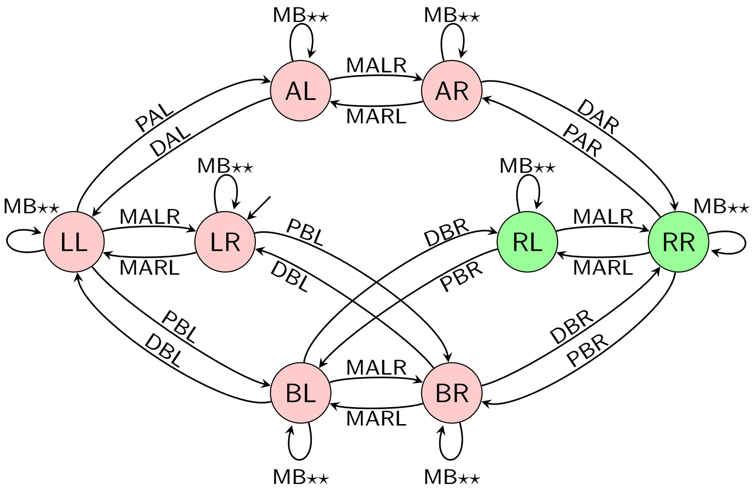
Für $i \in \{1, 2\}$ seien $\mathcal{S}^i = \langle S^i, A, cost, T^i, s_0^i, S_\star^i \rangle$ Zustandsräume (mit identischen Aktionen und Kosten).

Das synchrone Produkt von $\mathcal{S}^1$ und $\mathcal{S}^2$, geschrieben $\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^2$, ist der Zustandsraum $\mathcal{S}^\otimes = \langle S^\otimes, A, cost, T^\otimes, s_0^\otimes, S_\star^\otimes \rangle$ mit

- $S^\otimes := S^1 \times S^2$
- $T^\otimes := \{\langle \langle s_1, s_2 \rangle, a, \langle t_1, t_2 \rangle \rangle \mid \langle s_1, a, t_1 \rangle \in T^1 \wedge \langle s_2, a, t_2 \rangle \in T^2\}$
- $s_0^\otimes := \langle s_0^1, s_0^2 \rangle$
- $S_\star^\otimes := S_\star^1 \times S_\star^2$

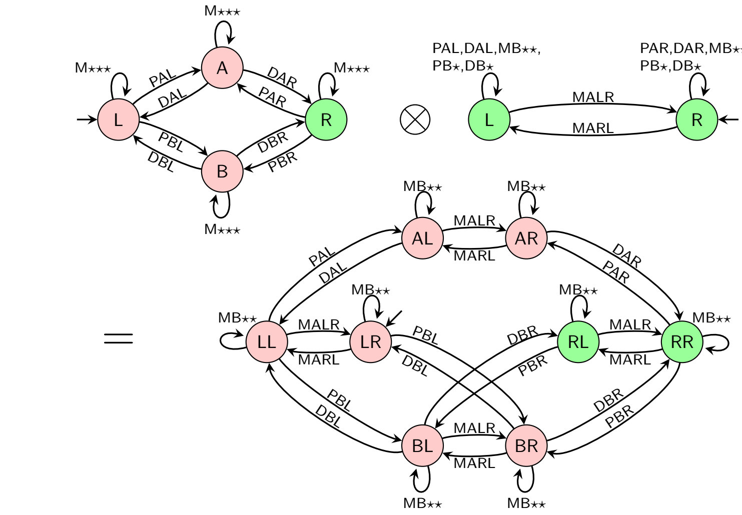
Beispiel: synchrones Produkt

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$:



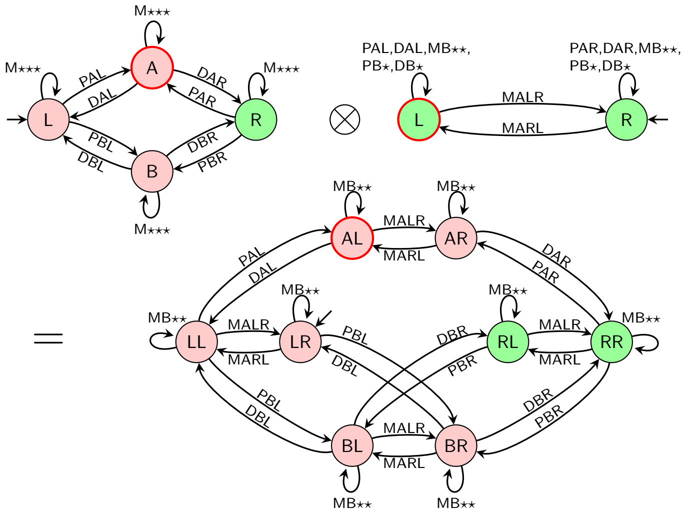
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$:



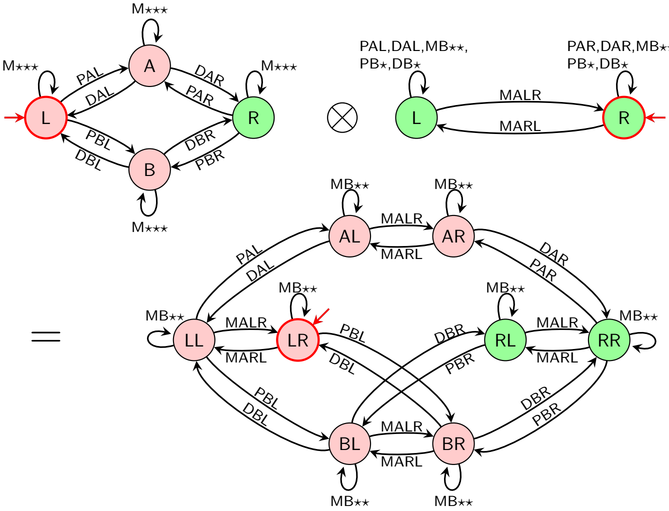
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi\{package\}} \otimes \mathcal{S}^{\pi\{truck\ A\}}$: $S^{\otimes} = S^1 \times S^2$



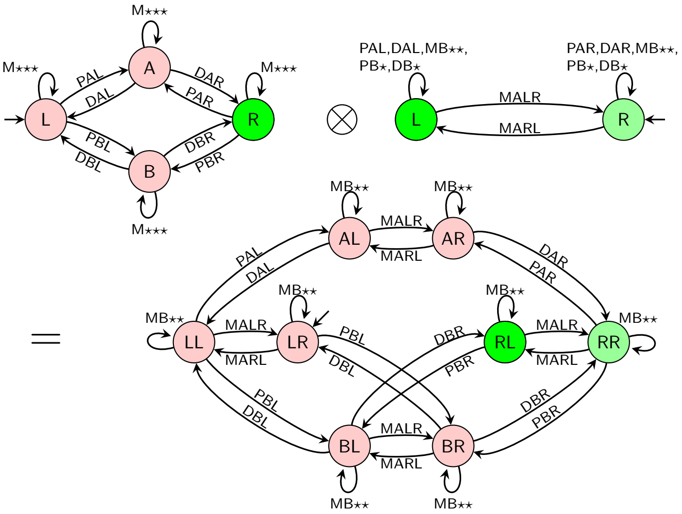
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$: $s_0^{\otimes} = \langle s_0^1, s_0^2 \rangle$



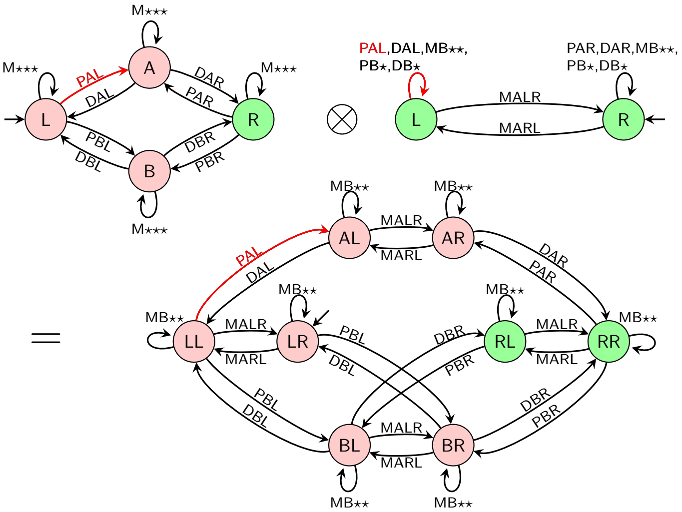
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi\{package\}} \otimes \mathcal{S}^{\pi\{truck\ A\}}: S_\star^\otimes = S_\star^1 \times S_\star^2$



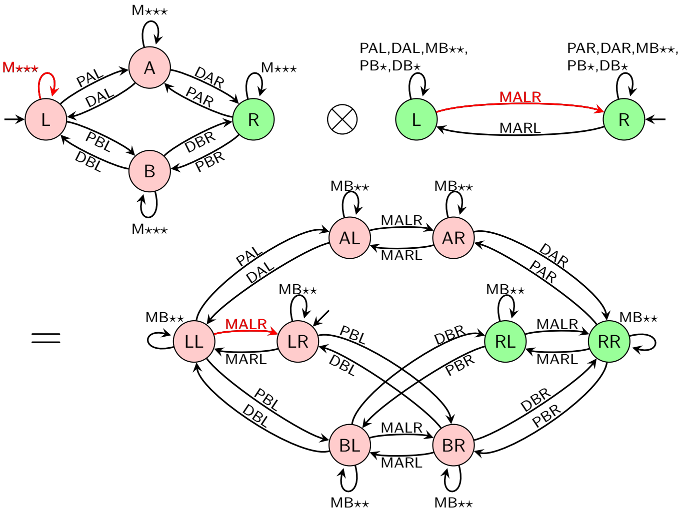
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$: $T^{\otimes} = \{\langle\langle s_1, s_2\rangle, a, \langle t_1, t_2\rangle\rangle \mid \dots\}$



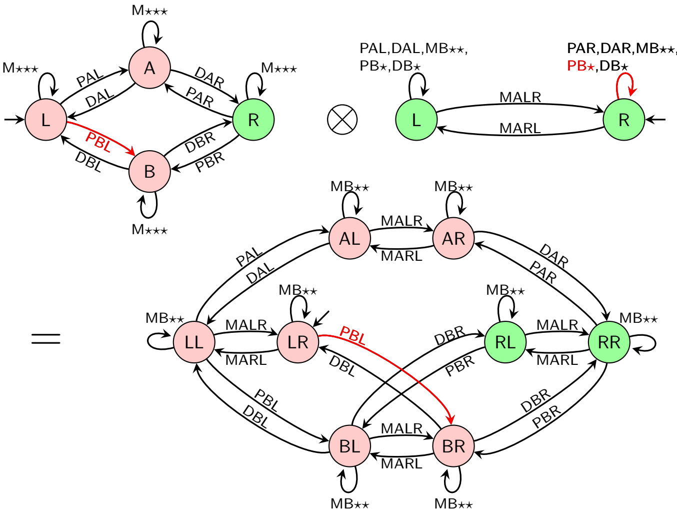
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}: \ T^{\otimes} = \{\langle\langle s_1, s_2\rangle, a, \langle t_1, t_2\rangle\rangle \mid \ldots\}$$



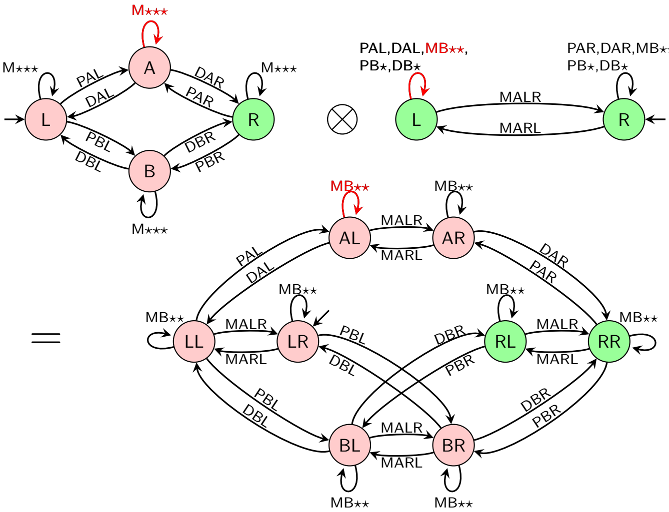
Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$: $T^{\otimes} = \{\langle\langle s_1, s_2\rangle, a, \langle t_1, t_2\rangle\rangle \mid \dots\}$



Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

$\mathcal{S}^{\pi\{package\}} \otimes \mathcal{S}^{\pi\{truck\ A\}}: \ T^{\otimes} = \{\langle\langle s_1, s_2\rangle, a, \langle t_1, t_2\rangle\rangle \mid \dots\}$



M&S-Abstraktionen: Kernideen (Fortsetzung)

Kernideen bei M&S:

1. Information von zwei abstrakten Zustandsräumen $\mathcal{A}$ und $\mathcal{A}'$ für denselben konkreten Zustandsraum können durch eine einfache Graphenoperation kombiniert werden: synchrones Produkt $\mathcal{A} \otimes \mathcal{A}'$.
2. Der konkrete Zustandsraum $\mathcal{S}$ einer SAS$^+$-Planungsaufgabe kann aus den atomaren Projektionen rekonstruiert werden:

$$\bigotimes_{v \in V} \mathcal{S}^{\pi_{\{v\}}} \text{ ist isomorph zu } \mathcal{S}$$

   $\rightsquigarrow$ baue feine Abstraktionen aus gröberen
3. Wenn Zwischenergebnisse zu gross werden: Verkleinern durch Kombination einiger abstrakter Zustände

Berechnung von M&S-Abstraktionen

Generischer Algorithmus zur Berechnung von M&S-Abstraktionen

$abs := \{\mathcal{S}^{\pi_{\{v\}}} \mid v \in V\}$ [Abstraktionen für atomare Projektionen]
while $|abs| > 1$:
    select $\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^2$ from abs
    shrink $\mathcal{S}^1$ and/or $\mathcal{S}^2$ until $\text{size}(\mathcal{S}^1) \cdot \text{size}(\mathcal{S}^2) \leq K$
    $abs := abs \setminus \{\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^2\} \cup \{\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^2\}$ [Merge-Schritt]
return the remaining abstraction in abs

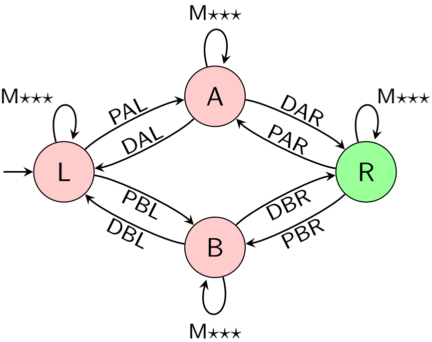
K: Parameter, der max. Anzahl abstrakter Zustände begrenzt

Praktische Implementierungen müssen entscheiden:

- Welche Abstraktionen werden ausgewählt? $\leadsto$ Merge-Strategie
- Wie werden Abstraktionen geschrumpft? $\leadsto$ Shrink-Strategie
- Wie soll K gewählt werden?

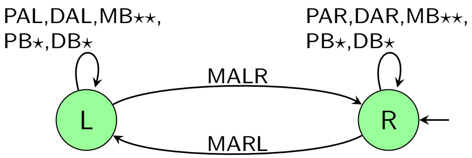
Initialisierungsschritt: atomare Projektion für das Paket

$\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}}$:



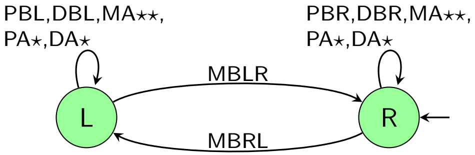
Initialisierungsschritt: atomare Projektion für Lastwagen A

$\mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$:



Initialisierungsschritt: atomare Projektion für Lastwagen B

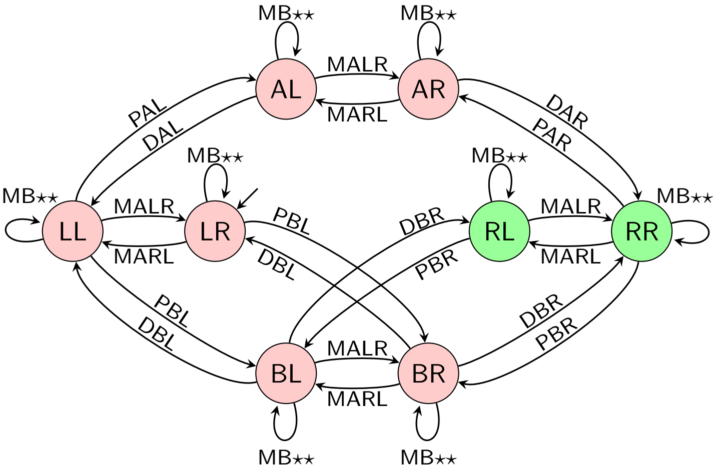
$\mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ B\}}}$:



aktuelle Abstraktionsmenge: $abs = \{\mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}}, \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}, \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ B\}}}\}$

Erster Merge-Schritt

$\mathcal{S}^1 := \mathcal{S}^{\pi_{\{package\}}} \otimes \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ A\}}}$:



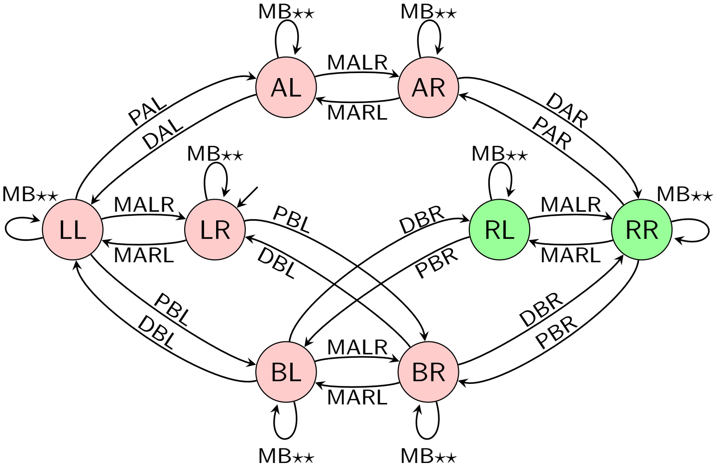
aktuelle Abstraktionsmenge: $abs = \{\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ B\}}}\}$

Müssen wir vereinfachen?

- Wenn wir genügend Speicher haben, können wir nun $\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^{\pi\{\mathit{truck}\ B\}}$ berechnen, wonach wir den konkreten Zustandsraum des Problems konstruiert hätten.
- Um die allgemeine Idee zu illustrieren, nehmen wir jedoch an, dass wir nicht genug Speicher für dieses Produkt zur Verfügung haben.
- Genauer: wir nehmen an, dass wir nach jedem Merge-Schritt auf vier Zustände reduzieren müssen, um den Speicherverbrauch unter Kontrolle zu halten

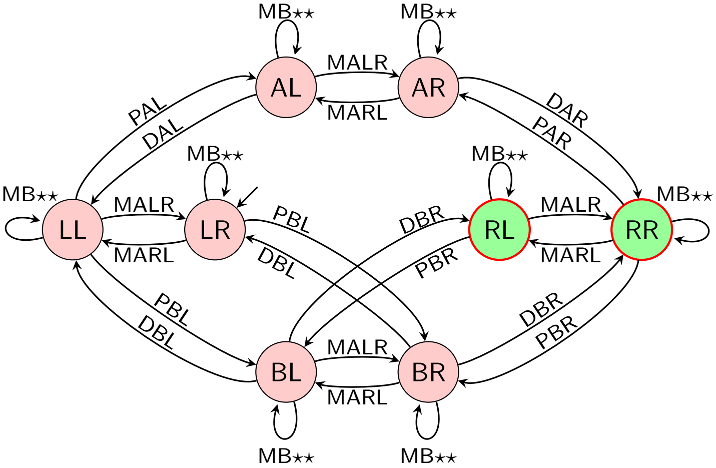
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2 :=$ eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



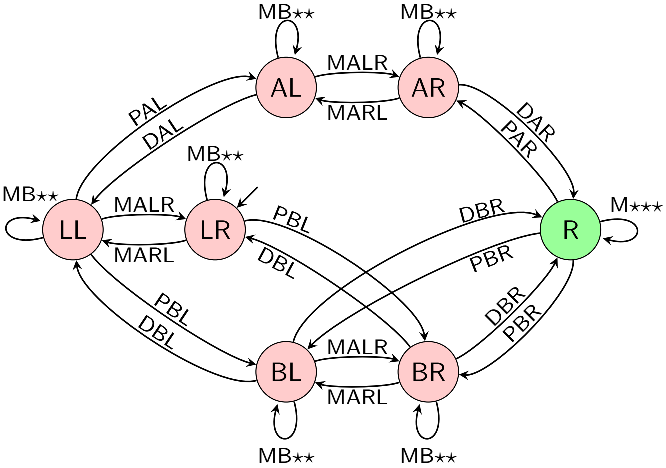
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2$:= eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



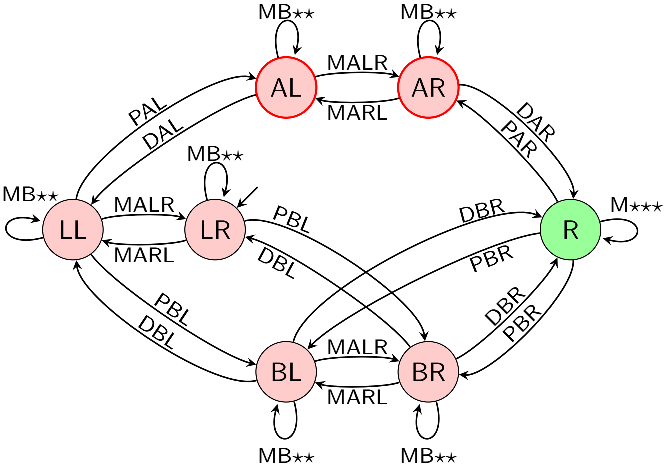
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2$:= eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



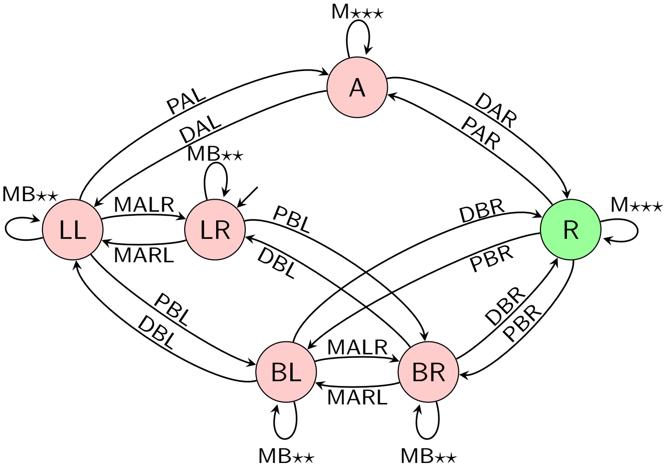
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2 :=$ eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



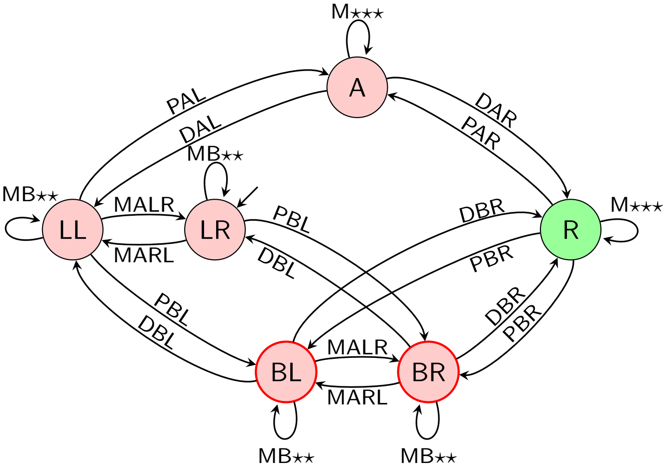
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2$:= eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



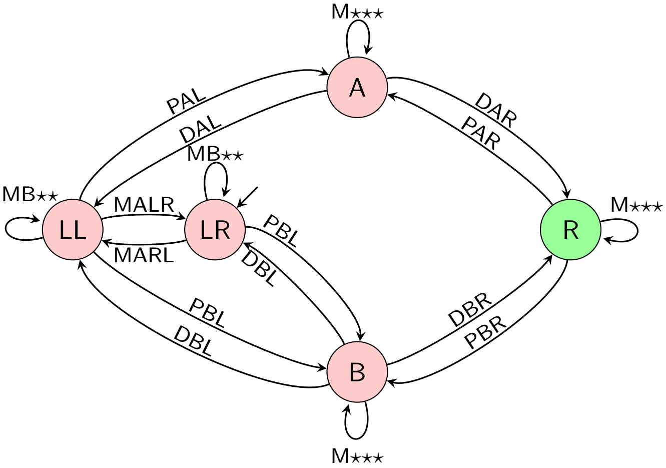
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2$:= eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



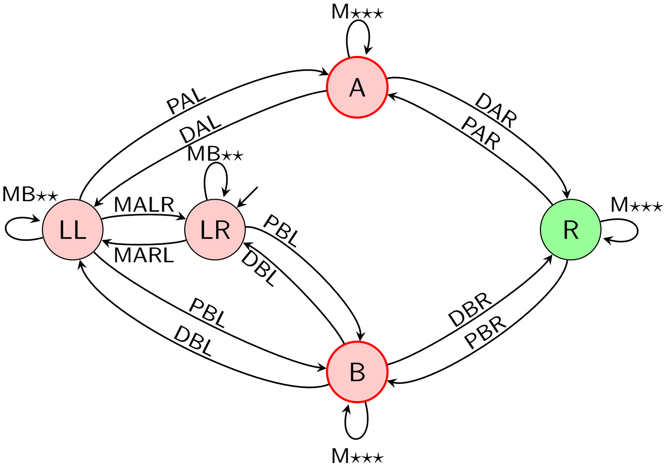
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2 :=$ eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



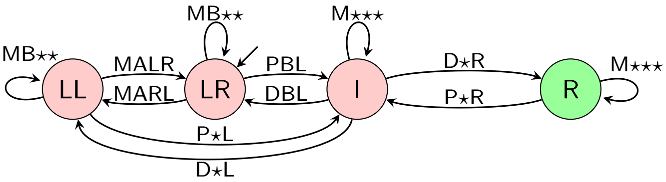
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2 :=$ eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



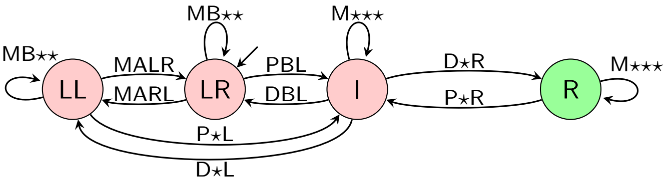
Erster Shrink-Schritt

$\mathcal{S}^2$:= eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



Erster Shrink-Schritt

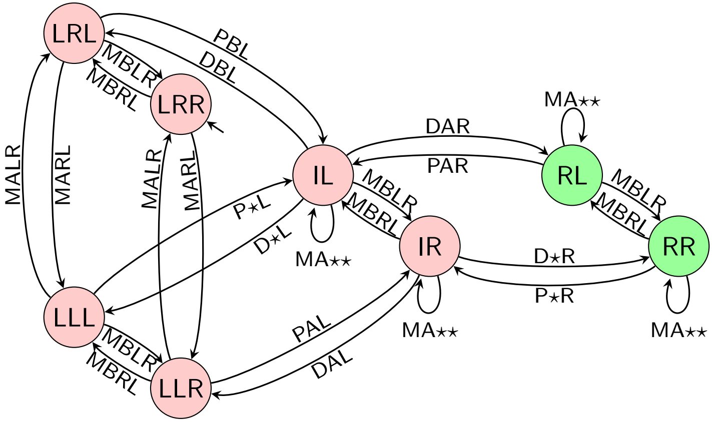
$\mathcal{S}^2 :=$ eine Abstraktion von $\mathcal{S}^1$



aktuelle Abstraktionsmenge: $abs = \{\mathcal{S}^2, \mathcal{S}^{\pi_{\{truck\ B\}}}\}$

Zweiter Merge-Schritt

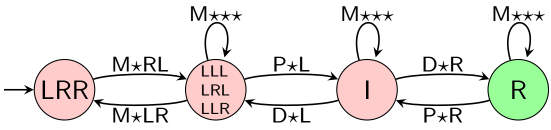
$\mathcal{S}^3 := \mathcal{S}^2 \otimes \mathcal{S}^{\pi\{truck\ B\}}$:



aktuelle Abstraktionsmenge: $\{\mathcal{S}^3\}$

Zweiter Shrink-Schritt

- Wir schrumpfen (um die Ideen zu illustrieren; der generische Algorithmus wäre hier fertig) $\mathcal{S}^3$ noch zu $\mathcal{S}^4$ und erhalten:



- Wir erhalten einen Heuristikwert von 3 für den Anfangszustand $\rightsquigarrow$ besser als jede PDB-Heuristik, die nicht alle Variablen im Muster hat.
- Das Beispiel lässt sich auf mehr Orte und Lastwagen verallgemeinern, ohne dass man die Grössenschranke von 4 (nach dem Merge-Schritt) erhöhen müsste.

Merge-and-Shrink-Abstraktionen in der Praxis

Praktische Aspekte, auf die wir nicht eingehen:

- Wie wählen wir den Grössenparameter?
- Welche Merge-Strategien sind gut?
- Welche Shrink-Strategien sind gut?
- Wie implementieren wir Merge-and-Shrink effizient?
    - gute Datenstrukturen und Algorithmen wichtig!