

# Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

## 35. Handlungsplanung: Merge-and-Shrink-Abstraktionen

Malte Helmert

Universität Basel

12. Mai 2014

# Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

12. Mai 2014 — 35. Handlungsplanung: Merge-and-Shrink-Abstraktionen

## 35.1 Merge-and-Shrink: Motivation

## 35.2 Synchrones Produkt

## 35.3 Merge-and-Shrink

## 35.4 Zusammenfassung

## Handlungsplanung: Überblick

### Kapitelüberblick:

- ▶ 30. Einführung
- ▶ 31. Planungsformalismen
- ▶ 32.–33. Planungsheuristiken: Delete-Relaxierung
- ▶ 34.–35. Planungsheuristiken: Abstraktion
  - ▶ 34. Abstraktion und Musterdatenbanken
  - ▶ 35. Merge-and-Shrink-Abstraktionen
- ▶ 36.–37. Planungsheuristiken: Landmarken

## 35.1 Merge-and-Shrink: Motivation

## Jenseits von Musterdatenbanken (1)

- ▶ Trotz ihrer Popularität haben PDBs fundamentale Grenzen:  
die Muster müssen klein gehalten werden
- ▶ Preis in heuristischer Genauigkeit:
  - ▶ betrachte Verallgemeinerung des Beispiels aus dem Vorkapitel:  
 $N$  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

## Jenseits von Musterdatenbanken (2)

- Merge-and-Shrink-Abstraktionen (M&S)  
sind eine echte Verallgemeinerung von PDBs.
- ▶ Sie können PDBs repräsentieren  
(mit polynomielltem 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.

## 35.2 Synchrones Produkt

## 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<sup>+</sup>-Planungsaufgabe kann aus den **atomaren Projektionen** rekonstruiert werden:

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

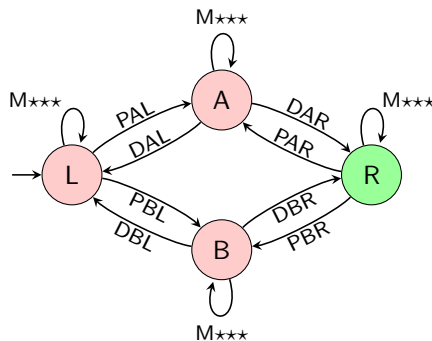
$\rightsquigarrow$  baue feine Abstraktionen aus größeren

## 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\*\***: parallele Kanten für Aktionen **MALR** und **MARL**

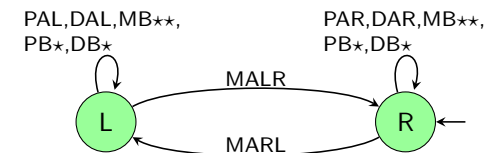
## Beispiel: atomare Projektion für das Paket

$\mathcal{S}^{\pi\{\text{package}\}}:$

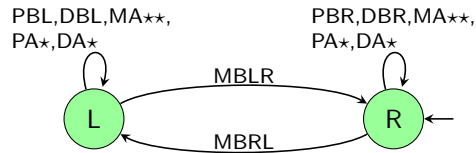


## Beispiel: atomare Projektion für Lastwagen A

$\mathcal{S}^{\pi\{\text{truck A}\}}:$



## Beispiel: atomare Projektion für Lastwagen B

 $\mathcal{S}^{\pi\{\text{truck } B\}}:$ 


## Synchrones Produkt von Zustandsräumen

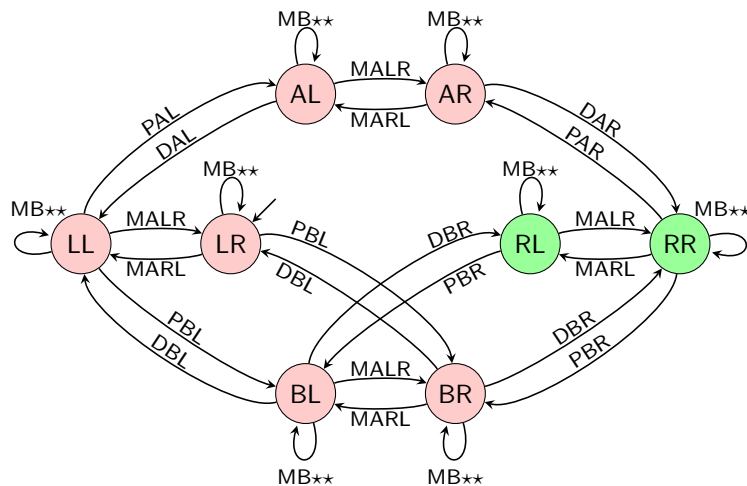
### Definition (synchrones Produkt von Zustandsräumen)

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).

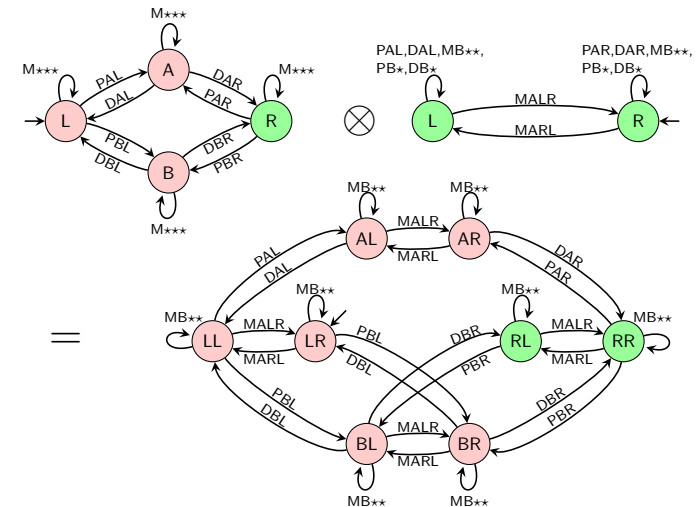
Das **synchrone Produkt** von  $\mathcal{S}^1$  und  $\mathcal{S}^2$ , geschrieben  $\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^2$ , ist der Zustandsraum  $\mathcal{S}^\otimes = \langle S^\otimes, A, cost, T^\otimes, s_0^\otimes, S_\star^\otimes \rangle$  mit

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

## Beispiel: synchrones Produkt

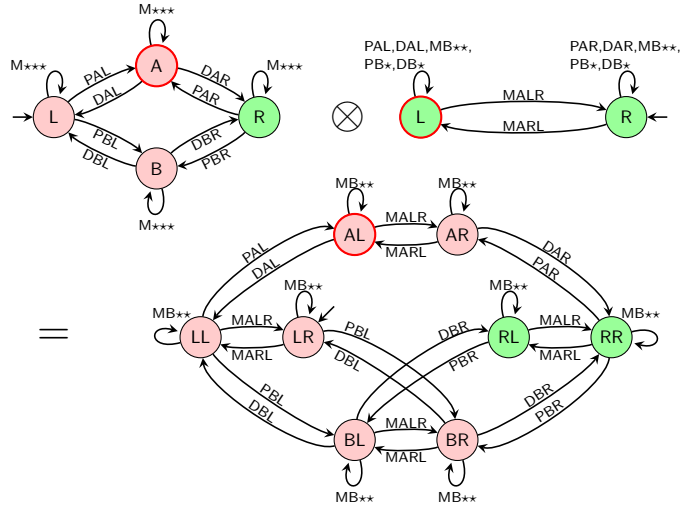
 $\mathcal{S}^{\pi\{\text{package}\}} \otimes \mathcal{S}^{\pi\{\text{truck } A\}}:$ 


## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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


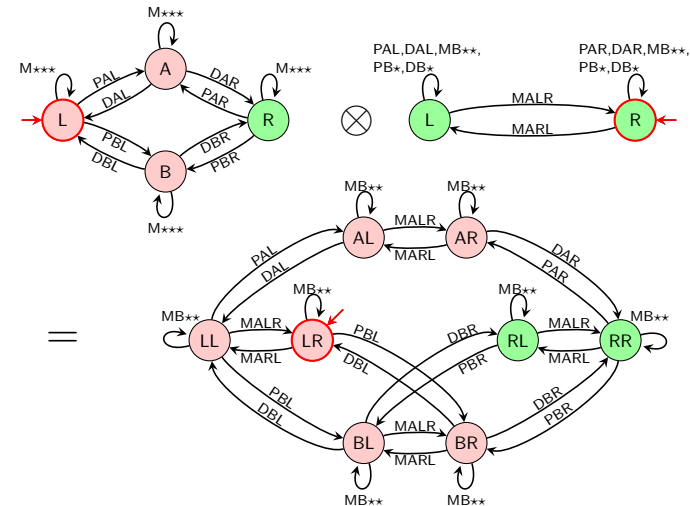
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



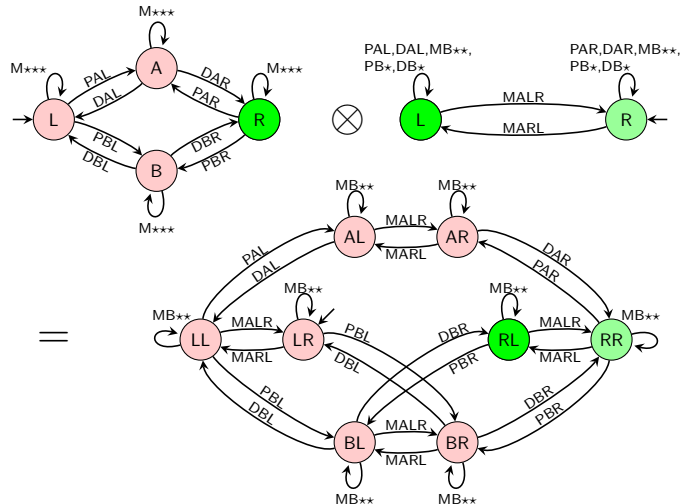
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



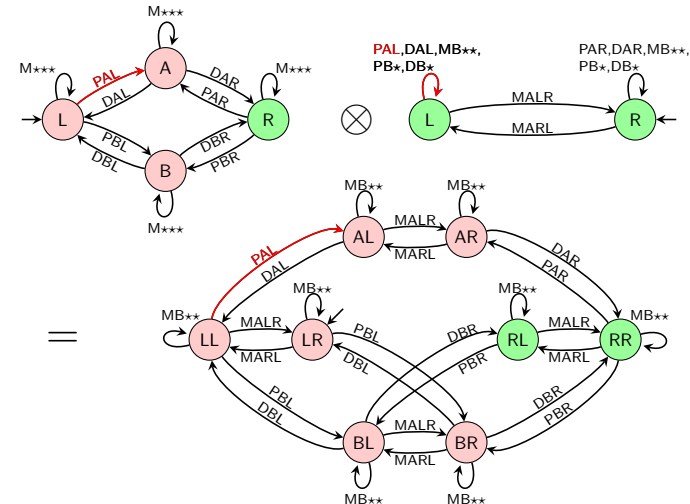
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



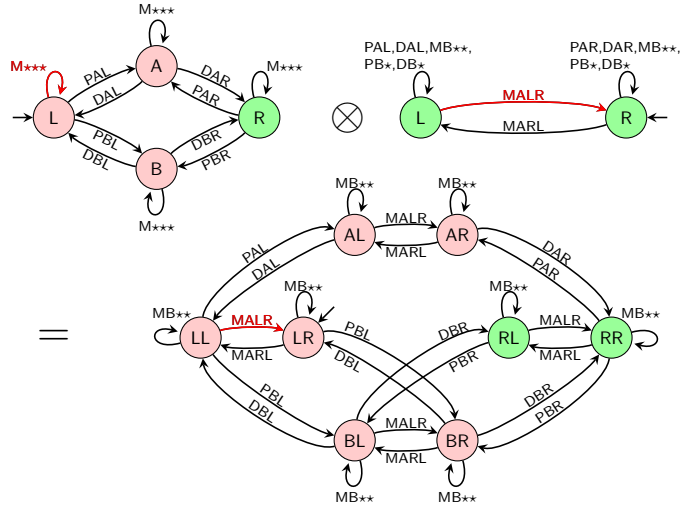
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



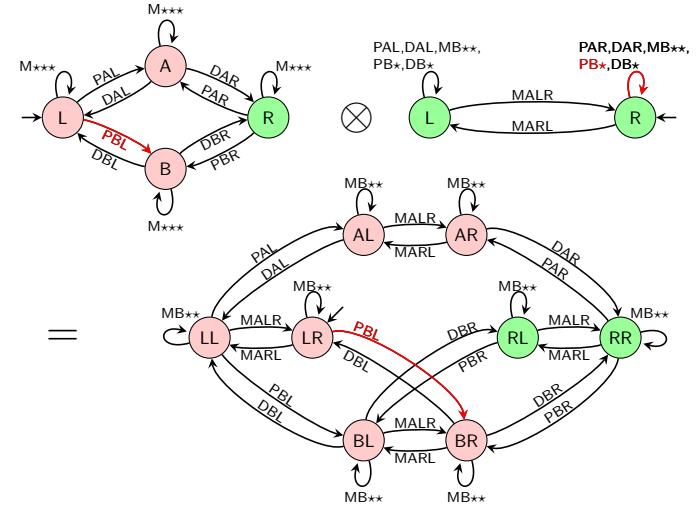
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



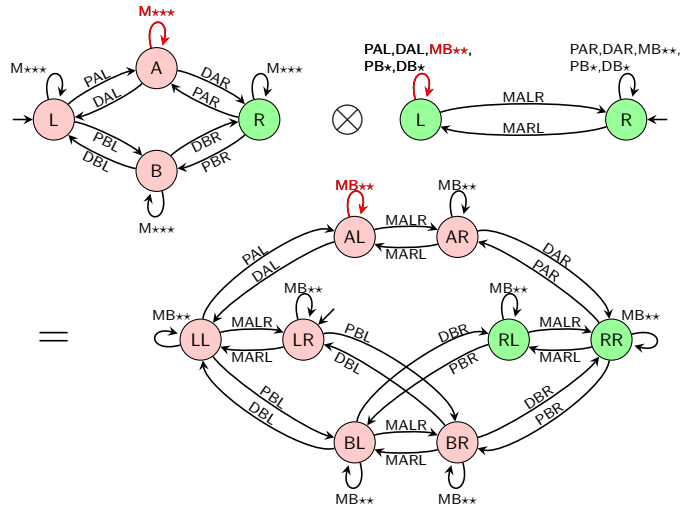
## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



## Beispiel: Berechnung des synchronen Produkts

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



## 35.3 Merge-and-Shrink

## M&S-Abstraktionen: Kernideen (Fortsetzung)

### Kernideen bei M&S:

- Information von zwei abstrakten Zustandsräumen  $\mathcal{A}$  und  $\mathcal{A}'$  für denselben konkreten Zustandsraum können durch eine einfache Graphenoperation **kombiniert** werden: **synchrones Produkt**  $\mathcal{A} \otimes \mathcal{A}'$ .
- Der **konkrete** Zustandsraum  $\mathcal{S}$  einer SAS<sup>+</sup>-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

- 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 := {  $\mathcal{S}^{\pi\{v\}}$  |  $v \in V$  } [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 \ {  $\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^2$  } ∪ {  $\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^2$  } [Merge-Schritt]
return the remaining abstraction in abs
  
```

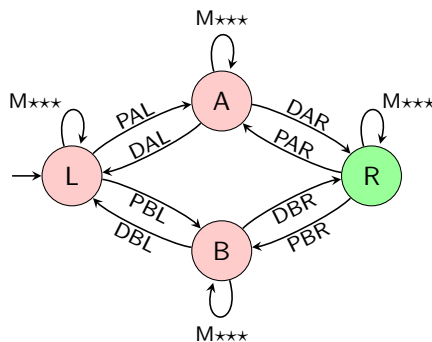
**K**: Parameter, der max. Anzahl abstrakter Zustände begrenzt

### Praktische Implementierungen müssen entscheiden:

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

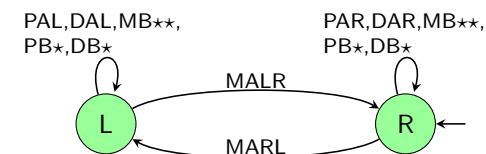
## Initialisierungsschritt: atomare Projektion für das Paket

$\mathcal{S}^{\pi\{\text{package}\}}:$



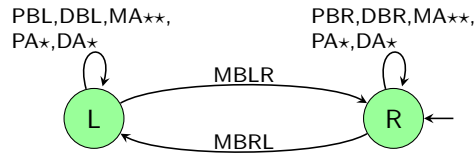
## Initialisierungsschritt: atomare Projektion für Lastwagen A

$\mathcal{S}^{\pi\{\text{truck A}\}}:$



## Initialisierungsschritt: atomare Projektion für Lastwagen B

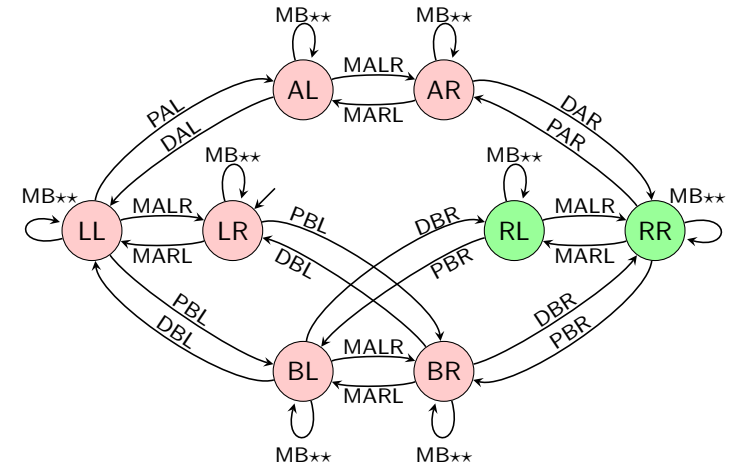
$\mathcal{S}^{\pi\{\text{truck B}\}}:$



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

## Erster Merge-Schritt

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



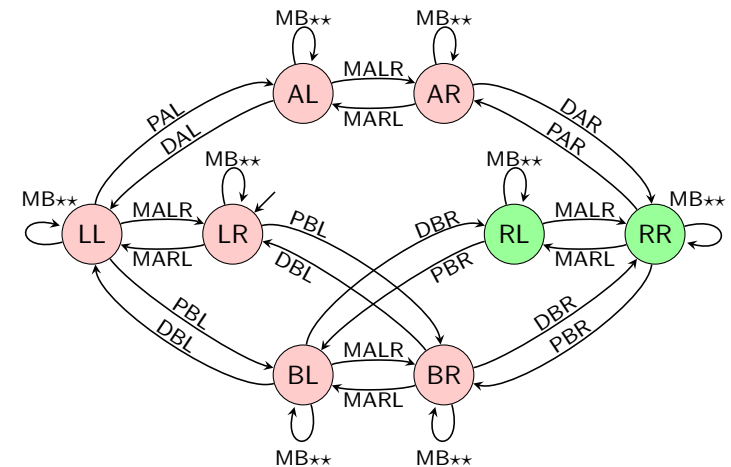
aktuelle Abstraktionsmenge:  $abs = \{\mathcal{S}^1, \mathcal{S}^{\pi\{\text{truck B}\}}\}$

## Müssen wir vereinfachen?

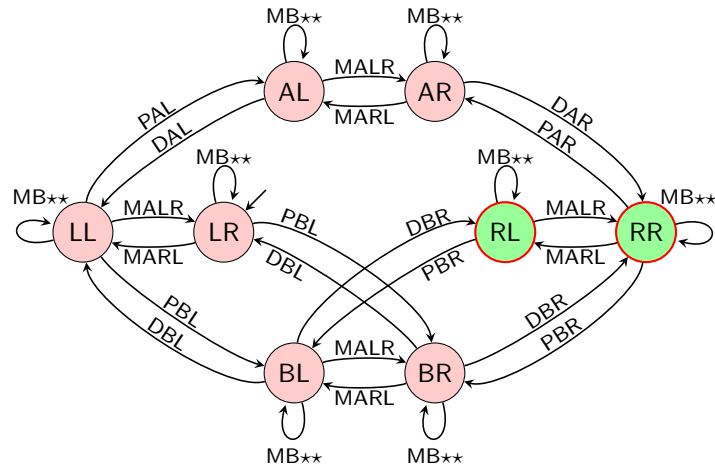
- ▶ Wenn wir genügend Speicher haben, können wir nun  $\mathcal{S}^1 \otimes \mathcal{S}^{\pi\{\text{truck B}\}}$  berechnen, wonach wir den konkreten Zustandsraum des Problems konstruiert hätten.
- ▶ Um die allgemeine Idee zu illustrieren, nehmen wir jedoch an, dass wir nicht genug Speicher für dieses 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

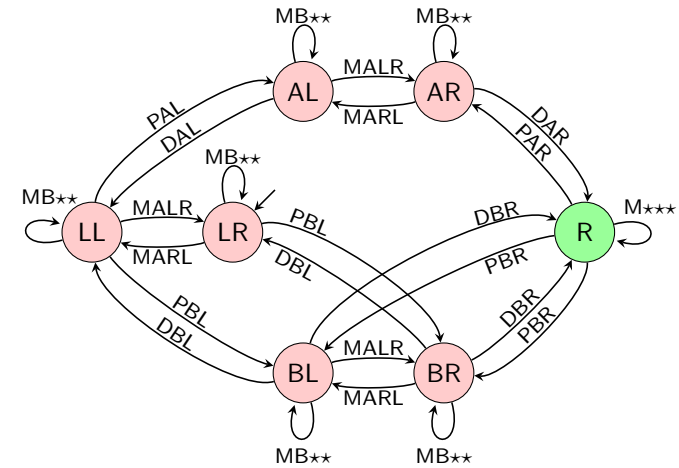
$\mathcal{S}^2 :=$  eine Abstraktion von  $\mathcal{S}^1$



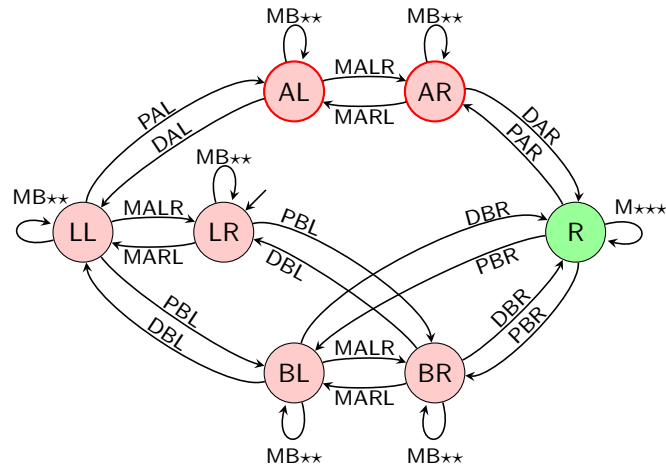
## Erster Shrink-Schritt

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


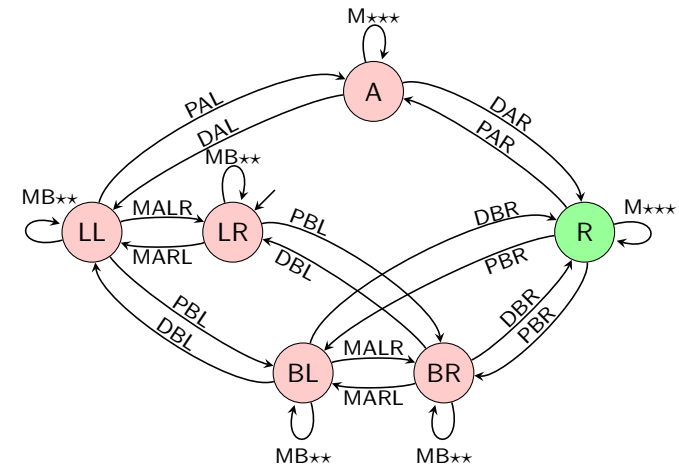
## Erster Shrink-Schritt

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


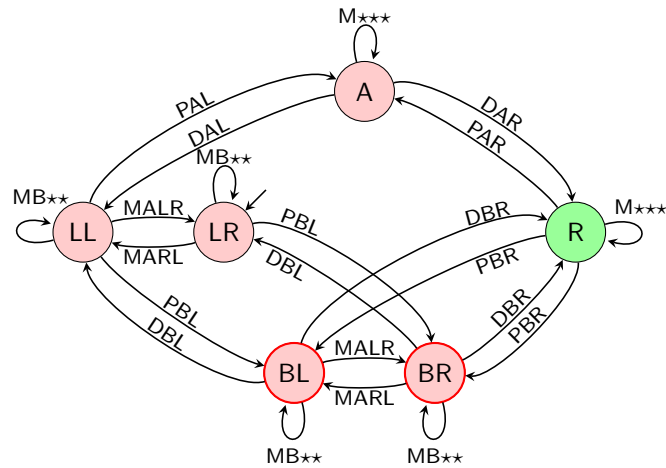
## Erster Shrink-Schritt

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


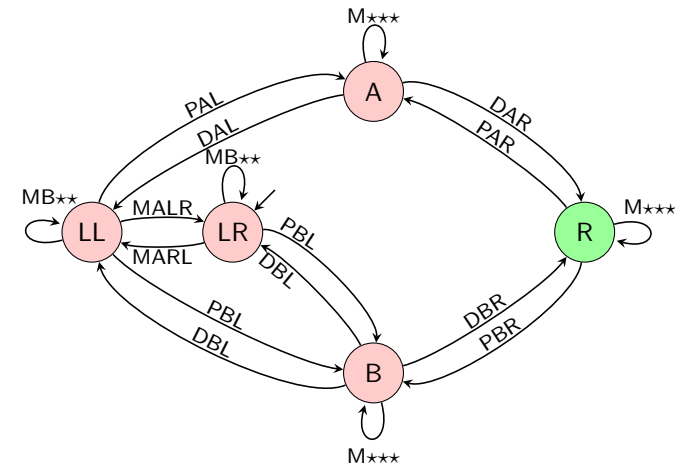
## Erster Shrink-Schritt

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


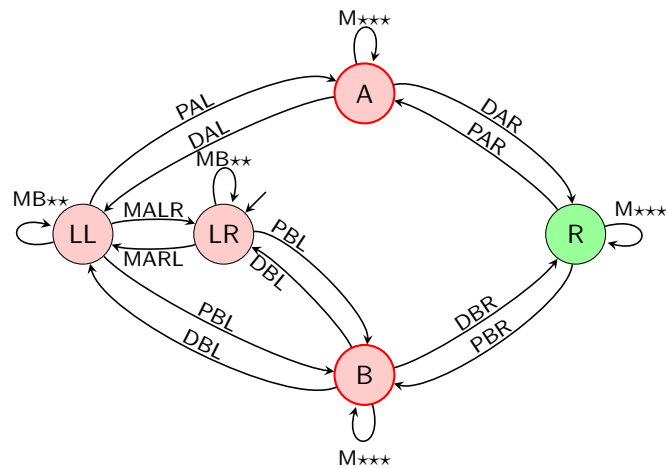
## Erster Shrink-Schritt

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


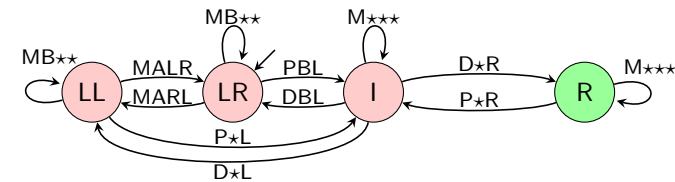
## Erster Shrink-Schritt

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


## Erster Shrink-Schritt

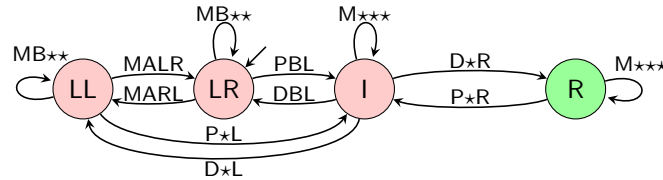
 $S^2 := \text{eine Abstraktion von } S^1$ 


## Erster Shrink-Schritt

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


## Erster Shrink-Schritt

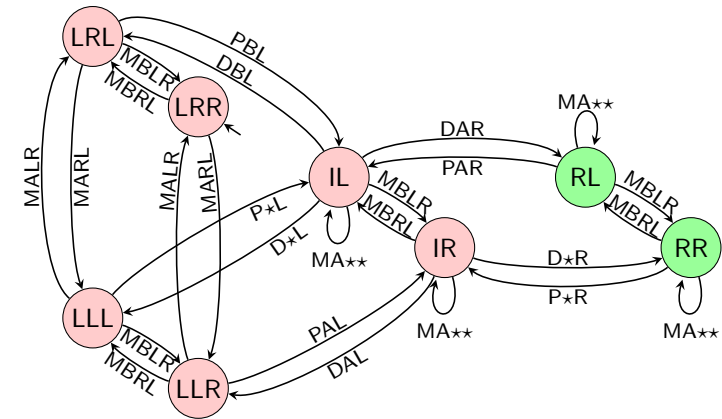
$S^2 :=$  eine Abstraktion von  $S^1$



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

## Zweiter Merge-Schritt

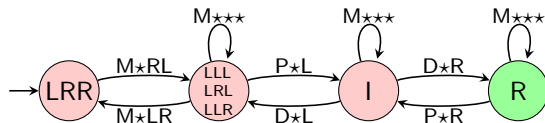
$S^3 := S^2 \otimes S^{\pi\{truck\ B\}} :$



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

## Zweiter Shrink-Schritt

- Wir schrumpfen (um die Ideen zu illustrieren; der generische Algorithmus wäre hier fertig)  $S^3$  noch zu  $S^4$  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!

## 35.4 Zusammenfassung

### Zusammenfassung (1)

- ▶ **Merge-and-Shrink-Abstraktionen**: statt wenige Variablen perfekt in der Abstraktion zu berücksichtigen, berücksichtige **alle** Variablen **verlustbehaftet**
- ▶ **synchrones Produkt**: Graphoperation, die zwei abstrakte Transitionssysteme zu einem kombiniert
- ▶ Planungsaufgabe lässt sich komplett durch Produkt aus den **atomaren Abstraktionen** rekonstruieren

### Zusammenfassung (2)

- ▶ **Merge-and-Shrink**:
  - ▶ ausgehend von allen **atomaren Abstraktionen**
  - ▶ ersetze immer zwei Abstraktionen durch ihr Produkt (**merge**)
  - ▶ verkleinere eine Abstraktion, wenn sie zu gross wird, um in den Speicher zu passen (**shrink**)
- ▶ Praxis: gute **Merge-** und **Shrink-Strategien** wichtig