

Kapitel II

Temporallogik und Model Checking

Inhalt Kapitel II

- Einführung
- Die Temporallogik CTL
 - Syntax und informelle Semantik
 - Semantik
 - Äquivalenzen
- CTL-Model Checking
 - Labelling Algorithmus
 - Optimierungen
- Das System SMV
- Fairness
- Das Alternating Bit Protokoll
- Symbolisches Model-Checking
- Bounded Model-Checking

Motivation

Unter *Model Checking* versteht man die automatische Überprüfung, ob ein Systemmodell eine Spezifikation erfüllt.

Die Modellierungen nebenläufiger Systeme aus Kapitel 1 waren bereits Beispiele dafür:

- Die Modellierungen mit SAT-Solvern sind Instanzen von *Bounded Model Checking* (da die Simulationszeit beschränkt ist).
- Die Modellierungen mit BDDs sind Instanzen von *Symbolic Model Checking* (da Zustandsmengen nicht explizit, sondern “symbolisch” repräsentiert wurden)

Arten von Eigenschaften

Typische Arten von spezifizierten Eigenschaften:

- **Safety:** System gerät in keinen “verbotenen” Zustand / alle erreichbaren Zustände sind “erlaubt” (hatten wir schon).
- **Liveness:** System verklemmt sich nicht; “Reset-Zustand” von überall erreichbar; jede “Anfrage” wird irgendwann “beantwortet”.
- **Fairness:** bestimmte “gute Eigenschaft” gilt für alle “fairen” Abläufe.

Diese Klassifikation erfasst die meisten Eigenschaften, bisweilen gibt es noch komplexere.

Temporallogik

Temporallogik erlaubt die kompakte Spezifikation von Eigenschaften von Systemabläufen.

Im Unterschied zur Aussagenlogik können auch Aussagen über den zeitlichen Ablauf gemacht werden.

Es gibt eine Reihe verschiedener Temporallogiken, z.B.

- CTL (Computation Tree Logic)
- LTL (Linear Time Logic)

In der Vorlesung wird CTL im Detail behandelt.

Temporallogik

Im Semaphorbeispiel haben wir überprüft, dass das System keinen unerwünschten Zustand erreichen kann.

In CTL kann das durch folgende Formel ausgedrückt werden.

$$AG(\neg \textit{undesired})$$

Diese Formel sagt aus, dass alle (A – all) Abläufe im Zustandsübergangssystem stets (G – generally) die Eigenschaft $\neg \textit{undesired}$ erfüllen.

Temporallogik

Die Eigenschaft, dass stets wieder der Anfangszustand erreicht werden kann, kann in CTL wie folgt ausgedrückt werden:

$$AG(EF(\bigwedge_p q_{p\ sleep}))$$

Die Formel $EF(\phi)$ besagt, dass ein Ablauf existiert (E – exists), auf dem irgendwann (F – finally) die Eigenschaft ϕ gilt.

Syntax von CTL

Die Menge der CTL-Formeln ist durch folgende Grammatik gegeben.

$$\begin{aligned}\phi, \psi ::= & p \mid \top \mid \perp \mid \neg\phi \mid \phi \oplus \psi \mid \text{AX}\phi \mid \text{EX}\phi \\ & \mid \text{A}[\phi\text{U}\psi] \mid \text{E}[\phi\text{U}\psi] \mid \text{AG}\phi \mid \text{AF}\phi \mid \text{EG}\phi \mid \text{EF}\phi\end{aligned}$$

Hier steht p für aussagenlogische Variablen und \oplus steht für die zweistelligen Boole'schen Operatoren. Insbesondere ist also jede aussagenlogische Formel auch eine CTL-Formel.

Beispiel: $\text{AG}(p \Rightarrow \text{A}[p\text{U}(\neg p \wedge \text{A}[\neg p\text{U}q])])$

Kein Beispiel: $\text{A}[p]$ und $\phi\text{U}\psi$ sind keine CTL-Formeln!

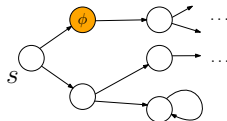
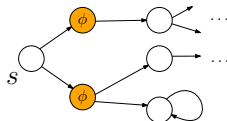
Informelle Semantik der CTL-Formeln

CTL Formeln werden relativ zu einem gegebenen Zustandsübergangssystem interpretiert.

Eine CTL-Formel ϕ kann in jedem Zustand entweder gelten (= wahr sein) oder nicht.

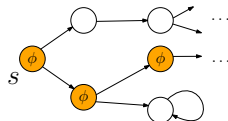
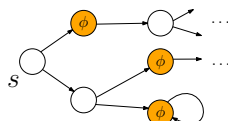
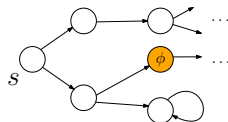
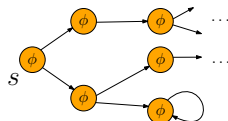
In einem Zustand s gilt...

- ... $AX\phi$, wenn ϕ in allen unmittelbaren Folgezuständen von s gilt.
- ... $EX\phi$, wenn ϕ in einem der unmittelbaren Folgezustände von s gilt.



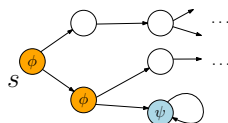
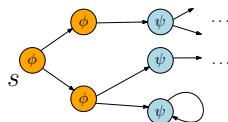
Informelle Semantik der CTL-Formeln, Forts.

- ... $AG\phi$, wenn ϕ auf allen von s aus erreichbaren Zuständen gilt.
- ... $EF\phi$, wenn man von s aus einen Zustand erreichen kann, in dem ϕ gilt.
- ... $AF(\phi)$, wenn auf allen von s ausgehenden Ausführungspfaden irgendwann ϕ gilt.
- ... $EG(\phi)$, wenn von s aus die Ausführung so fortgesetzt werden kann, dass stets ϕ gilt.



Informelle Semantik der CTL-Formeln, Forts.

- ... $A[\phi U \psi]$, wenn auf allen von s ausgehenden Ausführungspfaden irgendwann ψ gilt und zumindest bis zum ersten Auftreten von ψ stets ϕ der Fall ist. (U = “until”).
- ... $E[\phi U \psi]$, wenn von s aus die Ausführung so fortgesetzt werden kann, dass irgendwann ψ gilt und bis dahin stets ϕ gilt.



Informelle Semantik der CTL-Formeln, Forts.

Beispiele:

- $AG((close_door \vee (safe \wedge \neg open_door)) \Rightarrow AXsafe) \wedge AG(heat \Rightarrow safe)$
- $floor=2 \wedge direction=up \wedge buttonpressed=5 \Rightarrow A[direction=up \cup floor=5]$
- $AFfertig$

Transitionssystem

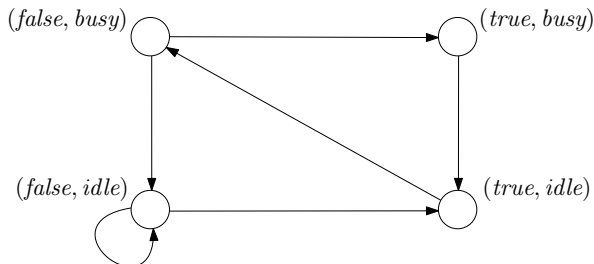
Definition

Ein *Transitionssystem* ist ein Paar (S, \rightarrow) , wobei

- S eine Menge von Zuständen ist, und
 - $\rightarrow \subseteq S \times S$ eine binäre Relation auf S ist.
 - Für jedes $s \in S$ existiert $s' \in S$ mit $s \rightarrow s'$.
-
- Die Menge S modelliert die Menge der globalen Zustände eines nebenläufigen Systems.
 - Die Relation \rightarrow heißt *Transitionsrelation*. Sie modelliert die möglichen Zustandsübergänge. Sie ergibt sich aus dem Programmtext, bzw. der Implementierung des Systems.
 - Die dritte Bedingung hat technische Gründe. Liegt sie nicht bereits vor, so kann sie durch Hinzunahme eines Müllzustands s_d mit $s_d \rightarrow s_d$ künstlich hergestellt werden.

Beispiel

$$\begin{aligned} S &= \{(request, status) \mid request \in \{true, false\}, status \in \{idle, busy\}\} \\ \rightarrow &= \{((false, x), (true, x)) \mid x \in \{idle, busy\}\} \cup \\ &\quad \{((true, idle), (false, busy))\} \cup \\ &\quad \{((x, busy), (x, idle)) \mid x \in \{true, false\}\} \cup \\ &\quad \{((false, idle), (false, idle))\} \end{aligned}$$



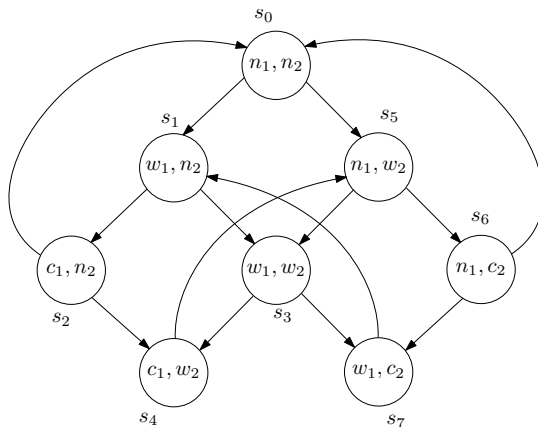
Weitere Beispiele

- Semaphore: $S = \{(proc_0, proc_1, sem) \mid sem \in \{free, occ\}, \forall i \in \{0, 1\}. proc_i \in \{sleep, wait, work\}\}$
Hier: $|S| = 18$
- Peterson:
 $S = \{(flag_0, flag_1, turn, line_0, line_1) \mid \forall i \in \{0, 1\}. flag_i \in \{true, false\} \ \& \ turn \in \{0, 1\} \ \& \ line_i \in \{0, 1, 2, 3, 4\}\}$
Hier: $|S| = 2^2 \cdot 2 \cdot 5^2 = 200$
- Bauer, Hund, Katze, Maus: $S = \{(pos_B, pos_H, pos_K, pos_M) \mid \forall x \in \{B, H, K, M\}. pos_x \in \{links, rechts\}\}$
Hier: $|S| = 2^4 = 16$.

NB: Die Transitionsrelation \rightarrow ist hier jeweils weggelassen.

Weitere Beispiele

Der von Zustand $s_0 = (\text{sleep}, \text{sleep}, \text{free})$ aus erreichbare Teil des Semaphor-Transitionssystems:



Formale Semantik von CTL

Die Semantik von CTL-Formeln wird bezüglich einer Interpretation festgelegt.

Definition

Eine *Interpretation* \mathcal{I} besteht aus einem endlichen Transitionssystem $Tr(\mathcal{I}) = (S, \rightarrow)$ sowie einer Menge von Zuständen $\mathcal{I}(p) \subseteq S$ für jede aussagenlogische Variable p .

Sei \mathcal{I} eine Interpretation \mathcal{I} mit $Tr(\mathcal{I}) = (S, \rightarrow)$.

Die CTL-Semantik legt für jede Formel ϕ und jeden Zustand $s \in S$ fest, ob die Formel in diesem Zustand bezüglich der Interpretation \mathcal{I} gilt.

Wir schreiben kurz $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ für “ ϕ gilt im Zustand s (bezüglich \mathcal{I})” und definieren diesen Begriff auf den nächsten Folien.

Definition der Semantik

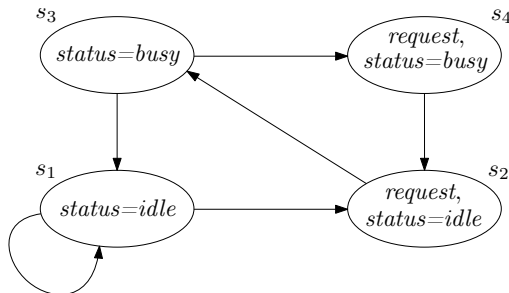
- $s \models_{\mathcal{I}} p$ genau dann wenn $s \in \mathcal{I}(p)$.
- $s \models_{\mathcal{I}} \neg\phi$ genau dann wenn $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ nicht gilt (auch geschrieben als $s \not\models_{\mathcal{I}} \phi$).
- $s \models_{\mathcal{I}} \phi \wedge \psi$ genau dann wenn $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ und $s \models_{\mathcal{I}} \psi$.
- die anderen Boole'schen Operatoren \vee, \Rightarrow , etc. sind analog.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EX}\phi$ genau dann wenn $s' \in S$ existiert mit $s \rightarrow s'$ und $s' \models_{\mathcal{I}} \phi$.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AX}\phi$ genau dann wenn für alle $s' \in S$ mit $s \rightarrow s'$ gilt: $s' \models_{\mathcal{I}} \phi$.

Definition der Semantik, Fortsetzung

- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AG}\phi$ gdw: Alle unendlichen Pfade der Form $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EG}\phi$ gdw: Es gibt einen unendlichen Pfad der Form $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ mit der Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EF}\phi$ gdw: Es gibt einen unendlichen Pfad der Form $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ mit der Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für ein $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AF}\phi$ gdw: Alle unendlichen Pfade der Form $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für ein $i \geq 0$ gilt.

Beispiel

Die Interpretation \mathcal{I} mit dem Transitionssystem von Folie 120 sowie $\mathcal{I}(\text{request}) = \{s_2, s_4\}$, $\mathcal{I}(\text{status=idle}) = \{s_1, s_2\}$ und $\mathcal{I}(\text{status=busy}) = \{s_3, s_4\}$ wird folgendermaßen dargestellt.



Es gilt:

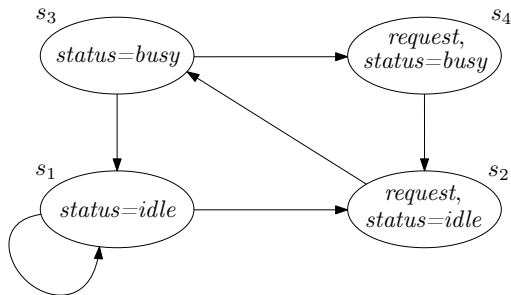
$$s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{AF} \neg \text{request} \quad s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{AG}(\text{request} \Rightarrow \text{EF}(\text{status=busy}))$$

$$s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{EG} \neg \text{request} \quad s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{AG}(\neg \text{EG}(\text{status=busy}))$$

Semantik der Until-Formeln

- $s \models_{\mathcal{I}} E[\phi U \psi]$ gdw: Es gibt einen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots \rightarrow s_n$ mit der Eigenschaft, dass $s_n \models_{\mathcal{I}} \psi$ gilt sowie dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i < n$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} A[\phi U \psi]$ gdw: Alle unendlichen Pfade $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass ein $n \geq 0$ existiert mit $s_n \models_{\mathcal{I}} \psi$ und $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i < n$.

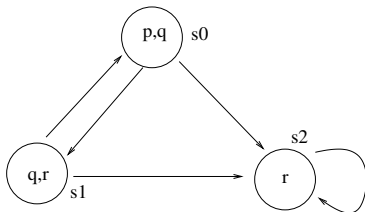
Beispiel



Es gilt:

$$s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{AG}(\text{request} \Rightarrow \text{A}[\text{request U status=busy}])$$

Beispiel



$$s_0 \models_{\mathcal{I}} p \wedge q$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \top$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \neg \text{AX}(q \wedge r)$$

$$s_1 \models_{\mathcal{I}} \text{EG}r$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \text{AF}r$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \text{A}[p\text{Ur}]$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} p \wedge \neg r$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \text{EX}(q \wedge r)$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \neg \text{EF}(p \wedge r)$$

$$s_2 \models_{\mathcal{I}} \text{AG}r$$

$$s_0 \models_{\mathcal{I}} \text{E}[(p \wedge q)\text{Ur}]$$

Äquivalenzen

Äquivalenz von CTL-Formeln

Zwei CTL-Formeln ϕ und ψ sind **äquivalent**, geschrieben $\phi \iff \psi$, wenn für alle Interpretationen \mathcal{I} und alle Zustände s gilt: $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ gdw. $s \models_{\mathcal{I}} \psi$.

Sind $\phi \iff \psi$ aussagenlogisch äquivalente Formeln, so auch als CTL-Formeln. Z.B.: $\text{AG}(p) \vee \text{AG}(p) \iff \text{AG}(p)$.

Wichtige Äquivalenzen:

$$\neg \text{AG}(\phi) \iff \text{EF}(\neg \phi)$$

$$\neg \text{AF}(\phi) \iff \text{EG}(\neg \phi)$$

$$\neg \text{EF}(\phi) \iff \text{AG}(\neg \phi)$$

$$\neg \text{EG}(\phi) \iff \text{AF}(\neg \phi)$$

$$\text{AF}(\phi) \iff \text{A}[\text{TU}\phi]$$

$$\text{EF}(\phi) \iff \text{E}[\text{TU}\phi]$$

$$\text{A}[\phi \text{U} \psi] \iff \neg (\text{E}[\neg \psi \text{U} (\neg \phi \wedge \neg \psi)] \vee \text{EG}(\neg \psi))$$

Äquivalenzen

Satz

Für jede CTL-Formel ϕ gibt es eine äquivalente Formel, in der neben Variablen nur die Operatoren \neg , \wedge , \perp , EX, AF, $E[-U-]$ verwendet werden.

Beweis: Übung

Das Model Checking Problem für CTL

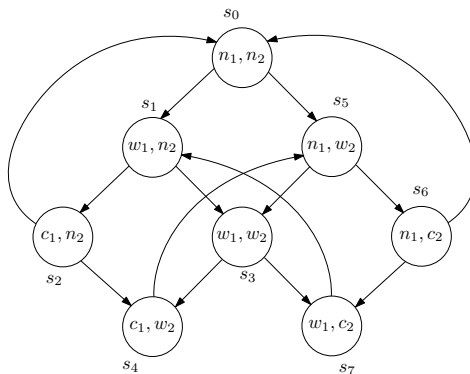
Gegeben:

Eine Interpretation \mathcal{I} und eine CTL-Formel ϕ_0 und ein Zustand s_0 .

Gefragt:

Gilt $s_0 \models_{\mathcal{I}} \phi_0$?

Mutual Exclusion Beispiel



- Safety: $\text{AG}(\neg(c_1 \wedge c_2))$
- Liveness: $\text{AG}(w_1 \Rightarrow \text{AF}c_1)$
- Non-blocking: $\text{AG}(n_1 \Rightarrow \text{EX}w_1)$
- No strict sequencing: $\text{EF}(c_1 \wedge \text{E}[c_1 \text{U}(\neg c_1 \wedge \text{E}[\neg c_2 \text{U}c_1])])$

Labelling Algorithmus

Der *Labelling Algorithmus* löst das Model Checking für CTL.

- Eingabe sind eine Interpretation \mathcal{I} und eine Formel ϕ_0 .
- Berechnet wird die Menge aller Zustände (im Transitionssystem von \mathcal{I}) in denen ϕ_0 gilt.

Aufgrund der Äquivalenzen können wir annehmen, dass die Formel ϕ_0 nur die Operatoren $\neg, \wedge, \perp, EX, AF, E[-U-]$ verwendet.

Labelling Algorithmus

Grundidee: Berechne für jede Teilformel von ϕ von ϕ_0 die Menge aller Zustände, in denen ϕ gilt.

- Bildlich gesprochen beschriftet (labelt) man die Zustände in S mit denjenigen Teilformeln, die dort gelten.
- Der Algorithmus verfährt durch Rekursion über die Formel. Für Variablen ist die Aufgabe einfach.

Bei einer zusammengesetzten Formel ϕ führt man den Algorithmus zunächst für die direkten Teilformeln aus. Aus dem Ergebnis kann man dann die Beschriftung für ϕ berechnen.

Labelling Algorithmus: Details (1)

Der Algorithmus macht eine Fallunterscheidung über die Eingabeformel ϕ_0 .

- \perp : Markiere keinen Zustand mit \perp .
- p : Markiere Zustände mit aussagenlogischen Variablen, wie von der Interpretation vorgegeben.
- $\neg\phi$: Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ aus. Markiere danach alle Zustände mit $\neg\phi$, die nicht mit ϕ beschriftet sind.
- $\phi \wedge \psi$: Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ und ψ aus. Markiere danach alle Zustände mit $\phi \wedge \psi$, die sowohl mit ϕ als auch mit ψ beschriftet sind.
- $EX\phi$: Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ aus. Markiere dann alle Zustände mit $EX\phi$, die einen unmittelbaren Nachfolger haben, der schon mit ϕ markiert ist.

Labelling Algorithmus: Details (2)

- $AF\phi$:
 1. Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ aus.
 2. Markiere alle Zustände mit $AF\phi$, die schon mit ϕ markiert sind.
 3. Sind *alle* unmittelbaren Folgezustände eines Zustands s bereits mit $AF\phi$ markiert, so markiere auch s mit $AF\phi$. Wiederhole Schritt 3 bis keine neuen Markierungen mehr hinzukommen.
- $E[\phi U \psi]$:
 1. Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ und ψ aus.
 2. Markiere alle Zustände mit $E[\phi U \psi]$, die schon mit ψ markiert sind.
 3. Ist *ein* unmittelbarer Folgezustände eines Zustands s bereits mit $E[\phi U \psi]$ markiert und ist s selbst mit ϕ markiert, so markiere s auch mit $E[\phi U \psi]$. Wiederhole Schritt 3 bis keine neuen Markierungen mehr hinzukommen.

Komplexität

Eine direkte Implementierung des Algorithmus hat Laufzeit

$$O(f \cdot V \cdot (V + E))$$

wobei f die Größe der Ausgangsformel, V die Zahl der Zustände und E die Zahl der Transitionen ist.

Beispiel: $AF\phi$

1. rekursiver Aufruf: $O((f - 1) \cdot V \cdot (V + E))$
2. Anfangsmarkierung: $O(V)$
3. einen Zustand, dessen Nachfolger alle schon markiert sind, finden und markieren: $O(V + E)$; maximal V Wiederholungen

Verbesserung

Labelling kann in Zeit $O(f \cdot (V + E))$ implementiert werden.

Dazu genügt es, alle Fälle so zu implementieren, dass zum rekursiven Aufruf jeweils nur Aufwand $O(V + E)$ hinzukommt.

- Die Fälle für p, \neg, \wedge, EX sind einfach.
- Der Fall für $E[\phi U \psi]$ kann mit einer Rückwärts-Breitensuche implementiert werden.
Ist ein Knoten mit $E[\phi U \psi]$ markiert, so werden alle seine Vorgänger, die auch mit ϕ markiert sind, selbst mit $E[\phi U \psi]$ markiert.
- Leider funktioniert Breitensuche für AF nicht, da ja alle Nachfolger und nicht nur einer markiert sein müssen.

Effiziente Behandlung von $EG\phi$

Anstatt ein effizienteres Verfahren für AF direkt anzugeben, ersetzen wir AF durch EG und geben ein Verfahren für EG an.

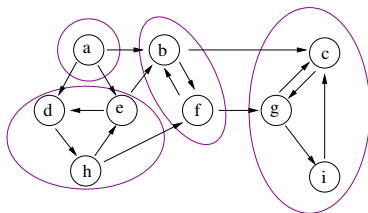
Beachte: $AF\phi \iff \neg EG(\neg\phi)$

Starke Zusammenhangskomponenten

Definition

Eine *starke Zusammenhangskomponente* (strongly connected component, SCC) eines gerichteten Graphs ist eine maximal große Menge U von Knoten mit folgender Eigenschaft: Für alle $s_1, s_2 \in U$ gilt, dass s_2 von s_1 aus erreichbar ist und umgekehrt.

Eine SCC ist *trivial*, wenn sie aus einem einzigen Knoten besteht, der keine Kante zu sich selbst hat.



Effiziente Behandlung von $EG\phi$

Markierung der Zustände mit $EG\phi$.

- Führe den Algorithmus rekursiv für ϕ aus.
- Betrachte folgenden Teilgraphen G des Transitionssystems:
Die Knoten sind alle mit ϕ markierten Zustände. Zwischen diesen Knoten hat G die gleichen Kanten wie das Transitionssystem.
- Berechne die SCCs von G .
- Markiere in G alle Knoten, von denen aus eine nichttriviale SCC erreichbar ist.
- Markiere im ursprünglichen Transitionssystem alle Zustände, die in G markiert sind.

Korrektheit der Markierung mit $EG\phi$

Angenommen der rekursive Aufruf für ϕ markiert genau die Zustände mit ϕ , in denen ϕ erfüllt ist.

Alle mit $EG\phi$ markierten Zustände erfüllen die Formel $EG\phi$.

- Für jeden markierten Zustand gibt es in G einen Pfad in eine nichttriviale SCC von G .
- Ist s ein Knoten in einer nichttrivialen SCC, dann gibt es einen unendlichen Pfad $s \rightarrow s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$, der in der SCC bleibt.
- Es gibt also von jedem mit $EG\phi$ markierten Knoten aus einen unendlichen Pfad in G .
- Da G nur mit ϕ markierte Knoten enthält, folgt daraus, das $EG\phi$ erfüllt ist.

Vollständigkeit der Markierung mit $EG\phi$ (1)

Alle Zustände, die $EG\phi$ erfüllen, werden auch markiert.

Dazu ist zu zeigen, dass jeder Zustand s markiert wird, der $s \models_{\mathcal{I}} EG\phi$ erfüllt. Diese Eigenschaft gilt genau dann wenn es einen unendlichen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$ gibt, dessen Zustände alle mit ϕ markiert sind.

Lemma

In jedem unendlichen Pfad $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots$ in einem endlichen Graphen kommen ab einem bestimmten Index n nur noch Zustände vor, die auch unendlich oft im Pfad vorkommen.

Beweis: Für jeden Zustand s , der im Pfad nur endlich oft vorkommt, gibt es einen Index n_s des letzten Vorkommens. Sei n das Maximum aller dieser n_s (es gibt nur endlich viele, da S endlich ist). Ab Index n können nach Konstruktion nur Zustände vorkommen, die auch unendlich oft im Pfad vorkommen. □

Vollständigkeit der Markierung mit $EG\phi$ (2)

Satz

Für jeden unendlichen Pfad $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow \dots$ in einem endlichen Graphen gibt es eine nichttriviale SCC U und eine Zahl n , so dass $s_i \in U$ für alle $i \geq n$ gilt.

Beweis: Wähle n nach dem Lemma. Für beliebige $n \leq i < j$ können wir nun zeigen, dass s_i und s_j in derselben SCC liegen. Wegen $i < j$ gibt es einen Pfad von s_i nach s_j . Es gibt auch einen Pfad von s_j nach s_i . Es muss es ein $k > j$ geben mit $s_k = s_i$, denn andernfalls käme s_i nur endlich oft im Pfad vor. Somit ist s_i von s_j erreichbar und umgekehrt; sie liegen in einer SCC. Die SCC enthält eine Kante und ist daher nichttrivial. \square

Nach dem Satz wird also jeder Zustand s markiert, für den es einen unendlichen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$ gibt, dessen Zustände alle mit ϕ markiert sind. Das sind alle Zustände, die $EG\phi$ erfüllen.

State-Explosion-Problem

Die effizientere Version ist linear in der Größe des Transitionssystems, aber...

Die Größe des Transitionssystems ist exponentiell in der Anzahl seiner Komponenten: n Prozesse à k Zustände ergeben ein Transitionssystem mit k^n Zuständen.

Abhilfen:

- Ausnutzen von Symmetrie
- Abstraktion
- Symbolische Repräsentation von Zuständen (wie bei der Modellierung mit BDDs im ersten Kapitel)

Model Checking Tools

Model Checking wird zur automatischen Verifikation von Systemeigenschaften verwendet. Man verwendet dazu Model Checking Tools.

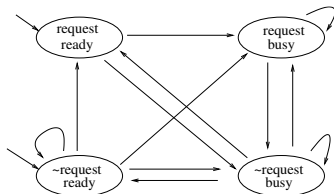
Im Folgenden betrachten wir das **SMV System**.

- Das Transitionssystem wird in einer speziellen Spezifikationssprache SMV definiert.
- Eigenschaften werden als CTL-Formeln ausgedrückt.
- Die Gültigkeit von Eigenschaften kann dann automatisch überprüft werden.
- Wir verwenden die aktuelle Implementierung NuSMV. Für Details siehe die Dokumentation.

Es gibt viele weitere Model Checking Tools mit verschiedenen Spezifikationssprachen und verschiedenen Temporallogiken.

Hello World in SMV

```
MODULE main
VAR
  request : boolean;
  status : {ready, busy};
ASSIGN
  init(status) := ready;
  next(status) := case
                        request : busy;
                        TRUE    : {ready, busy};
                      esac;
SPEC
  AG(request -> AF status=busy)
```



SMV — Explizite Notation

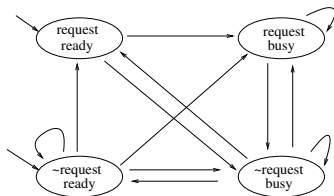
```

MODULE main
VAR
    request : boolean;
    status  : {ready, busy};

INIT
    status=ready

TRANS
    request & next(status)=busy
  | !request & next(status)=ready
  | !request & next(status)=busy

SPEC
    AG(request -> AF status=busy)
  
```



SMV — Explizite Notation

Das Modul definiert eine Interpretation und eine CTL-Formel.

- Die Zustände des Transitionssystems sind die Belegungen der mit VAR deklarierten Variablen. Hier:

$$S = \{(\text{request}, \text{status}) \mid \text{request} \in \{\text{true}, \text{false}\}, \\ \text{status} \in \{\text{ready}, \text{busy}\}\}$$

- Es gibt eine Transition

$$(\text{request}, \text{status}) \rightarrow (\text{request}', \text{status}')$$

genau dann, wenn der Ausdruck in TRANS wahr ist.

Im Ausdruck schreibt man $\text{next}(\text{request})$ und $\text{next}(\text{status})$ für die Komponenten $\text{request}'$ und status' des Nachfolgezustands.

SMV — Explizite Notation

- Die Menge der Anfangszustände sind alle Zustände, die den Ausdruck in INIT wahr machen.

Vergleiche die Kodierung von Zustandsübergangssystemen durch BDDs aus Kapitel 1.

In den aussagenlogischen Formeln kommen boolean-Variablen wie request sowie Gleichungen wie status=ready vor.

- Konzeptuell können diese alle wie aussagenlogische Variablen verstanden werden.
- Die Interpretation wird so gewählt, dass diese Variablen in den offensichtlichen Zuständen gelten.
Im Zustand (*true*, ready) sind die aussagenlogischen Variablen request und status=ready wahr. Die Variable status=busy ist falsch.

SMV — Model Checking

Im SPEC-Teil der Datei steht die zu überprüfende Eigenschaft als CTL-Formel.

Aufruf von NuSMV (im CIP-Pool installiert):

```
NuSMV datei.smv
```

- Das in der Eingabedatei `datei.smv` enthaltene Modell wird syntax- und typüberprüft.
- Dann wird durch Model-Checking ermittelt, ob alle SPEC-Formeln in allen Startzuständen (INIT) erfüllt sind.
- Falls nicht, so wird ein Gegenbeispiel konstruiert.

SMV — Explizite Notation

Beispiele verschiedener Datentypen

VAR

```
x : boolean;           -- Boole'sche Werte
y : {w1, w2, w3, w4};  -- endliche Menge
z : 1..8;               -- Zahlenbereiche
u : array 0..10 of boolean; -- Arrays
```

Mehrere Klauseln

Es sind mehrere INIT, TRANS, SPEC Klauseln erlaubt, diese verstehen sich jeweils als Konjunktion.

```
INIT u[0] & (u[z] -> y=w1)
INIT y=w2 -> x
```

entspricht

```
INIT u[0] & (u[z] -> y=w1) & (y=w2 -> x)
```

SMV — Implizite Notation

Die INIT und TRANS-Klauseln können durch ASSIGN-Klauseln ersetzt werden.

```
MODULE main
VAR request : boolean;
    status : {ready, busy};
ASSIGN
    init(status) := ready;
    next(status) := case
                        request : busy;
                        TRUE    : {ready, busy};
                    esac;
SPEC AG(request -> AF status = busy)
```

Es werden die möglichen Werte der Variablen in Anfangs- und Folgezuständen durch Wertzuweisung definiert.
Nichtdeterminismus (mehrere Möglichkeiten für Anfangs- und Folgezustände) wird durch Mengennotation erfasst.

SMV — Implizite Notation

```
next(status) := case
    request : busy;
    TRUE    : {ready, busy};
esac;
```

Bedeutung:

- Wenn request wahr ist, dann muss status im Folgezustand gleich busy sein.
- Andernfalls hat status im Folgezustand einen Wert aus {ready, busy}.

Die Bedingungen in den case-Ausdrücken werden von oben nach unten der Reihe nach abgearbeitet, bis eine Bedingung zutrifft. Es müssen alle Möglichkeiten erfasst sein. Die Bedingung TRUE trifft natürlich immer zu.

SMV — Implizite Notation

Zuweisungen schränken die möglichen Werte der Variablen ein.
Gibt es keine Zuweisung, so sind beliebige Werte erlaubt.

Im Beispiel gibt es keine Zuweisung für `next(request)`.
In Transitionen darf der Wert von `request` im Nachfolger beliebig sein.

Semaphor mit zwei Prozessen in impliziter Notation

Wir verwenden eine zusätzliche Variable `selector`, die angibt, welcher Prozess einen Schritt macht.

```
MODULE main
VAR
  p1 : {sleep, wait, work};
  p2 : {sleep, wait, work};
  s  : {free, occ};
  selector : {1, 2};
ASSIGN
  init(p1) := sleep;
  init(p2) := sleep;
  init(s)  := free;
```

(weiter auf nächster Folie)

Semaphore mit zwei Prozessen, Forts.

```
next(p1) := case selector=1 & p1=sleep           : wait;
              selector=1 & p1=wait & s=free       : work;
              selector=1 & p1=work                : sleep;
              TRUE                                : p1;
          esac;
next(p2) := case selector=2 & p2=sleep           : wait;
              selector=2 & p2=wait & s=free       : work;
              selector=2 & p2=work                : sleep;
              TRUE                                : p2;
          esac;
next(s)  := case p1=wait & s=free & selector=1 : occ;
              p2=wait & s=free & selector=2 : occ;
              p1=work & selector=1          : free;
              p2=work & selector=2          : free;
              TRUE                          : s;
          esac;
```

Spezifikationen

- **Safety:** $AG(\neg(p1=work \ \& \ p2=work))$. Gilt.
Die beiden Prozesse sind niemals gleichzeitig im work Zustand.
- **Liveness:** $AG(p1=wait \rightarrow AF \ p1=work)$. Gilt nicht.
Wenn Prozess p1 irgendwann einmal im wait Zustand ist, dann wird er in jeder weiteren Ausführung irgendwann in den work Zustand kommen.
- **Weak Liveness:** $AG(p1=wait \rightarrow EF \ p1=work)$. Gilt.
Wenn Prozess p1 irgendwann einmal im wait Zustand ist, dann gibt es *eine* mögliche Ausführung, mit der er in den work Zustand kommt.
- **Non-blocking:** $AG(p1=sleep \rightarrow EX \ p1=wait)$. Gilt
Wenn Prozess p1 irgendwann einmal im sleep Zustand ist, dann gibt es einen möglichen Nachfolgezustand, in dem er im wait Zustand ist.

Spezifikationen

- **No strict sequencing:**

$$EF(p1=work \ \& \ E[p1=work \ U \ (\neg(p1=work) \ \& \ E[\neg(p2=work) \ U \ p1=work])])$$

Gilt.

Es kann sein, dass Prozess p1 den kritischen Bereich verlässt und ihn dann erneut betritt, ohne dass zwischendurch p2 im kritischen Bereich war.

Die beiden Prozesse müssen also nicht strikt alternieren.

Abkürzende Schreibweise mit Modulen

```
MODULE prc(selector, s, pid)
VAR
  p : {sleep, wait, work};
ASSIGN
  next(p) := case
    selector=pid & p=sleep           : wait;
    selector=pid & p=wait & s=free    : work;
    selector=pid & p=work             : sleep;
    TRUE                             : p;
  esac;
```

Das Modul prc hat drei Parameter (untypisiert, Einsetzung textuell).

Abkürzende Schreibweise mit Modulen, Forts.

```

MODULE main
VAR
  s : {free, occ};
  selector : {1, 2};
  p1 : prc(selector, s, 1);
  p2 : prc(selector, s, 2);
ASSIGN
  init(s) := free;
  next(s) := case
    p1.p=wait & s=free & selector=1 : occ;
    p2.p=wait & s=free & selector=2 : occ;
    p1.p=work & selector=1           : free;
    p2.p=work & selector=2           : free;
    TRUE                             : s;
  esac;

SPEC AG(!(p1.p=work & p2.p=work))

```


Das Modulkonzept

Die Deklaration einer Variable mit Modultyp entspricht:

- Deklaration aller Variablen aus dem Modul.
Mit Notation wie `p1 . p` kann man auf diese Variablen zugreifen.
- Hinzufügen aller ASSIGN-Zuweisungen des Moduls zu den ASSIGN-Zuweisungen des umschließenden Moduls.

Das entspricht der *synchronen Komposition* der Module: zu jedem Zeitpunkt machen alle beteiligten Module gleichzeitig je einen Schritt.

In diesem Beispiel erzwingt die Variable `selector` explizit, dass tatsächlich nur ein Prozess einen echten Schritt macht, alle anderen einen Dummy-Schritt.

Die Zuweisungen in den Modulen dürfen sich nicht widersprechen. Im Beispiel ist es nicht möglich in `prc` auch noch `next(s) := . . .` zu schreiben, da es in `main` eine schon eine solche Zuweisung gibt.

Prozesse in SMV

Bei der Modellierung nebenläufiger Systeme ist häufig die *asynchrone Komposition* von Prozessen gewünscht.

- Es werden k Prozesse parallel ausgeführt.
- Zu jedem Zeitpunkt ist genau ein Prozess aktiv und macht einen Transitionsschritt.

Asynchrone Komposition kann manuell wie eben gezeigt mit einer Variable `selector` implementiert werden.

Prozesse in SMV

In NuSMV kann asynchrone Komposition mit dem Schlüsselwort `process` definiert werden.

Deklariert man Modulinstanzen als `process`, so wird eine `selector-Variable` automatisch erzeugt.

- Es wird automatisch eine `selector-Variable` erzeugt, die sicherstellt, dass pro Zeiteinheit ist immer genau ein “Prozess” aktiv.
- In `process`-Modulen darf es auch Zuweisungen an gemeinsame (`shared`) Variablen (wie `s`) geben.
- Für jedes Modul (einschließlich `main`) wird eine `running Variable` vom Typ `boolean` angelegt. Sie ist `TRUE`, wenn der Prozess gerade einen Schritt macht.

Semaphore mit Prozessen

```
MODULE prc(s)
VAR
  p : {sleep, wait, work};
ASSIGN
  init(p) := sleep;
  next(p) := case
    p=sleep      : wait;
    p=wait & s=free : work;
    p=work       : sleep;
    TRUE         : p;
  esac;
  next(s) := case
    p=wait & s=free : occ;
    p=work         : free;
    TRUE           : s;
  esac;
```

Semaphore mit Prozessen, Forts.

```
MODULE main
VAR
  s : {free, occ};
  p1 : process prc(s);
  p2 : process prc(s);
ASSIGN
  init(s) := free;
SPEC AG(!(p1.p=work & p2.p=work))
SPEC AG(p1=sleep -> EX p1=wait)
SPEC AG(p1=wait -> AF p1=work)
SPEC EF(p1=work &
        E[p1=work U (!(p1=work) & E[!(p2=work) U p1=work]]))
```

Weitere SMV Konstrukte

- Mit DEFINE kann man Definitionen (Abkürzungen) einführen.
- Mit INVAR kann man Zustandsinvarianten festlegen. Es sind dann nur solche Transitionen erlaubt, die diese Invariante sicherstellen. Man kann sich Invarianten als zusätzliche Einschränkung der next-Werte in einer TRANS Deklaration vorstellen.
- Mit JUSTICE (synonym FAIRNESS) kann man eine Fairness-Bedingung festlegen. Die Semantik der CTL-Operatoren wird dann dahingehend verändert, dass nur solche unendliche Pfade betrachtet werden, entlang derer die Fairness-Bedingung immer wieder (“unendlich oft”) wahr ist.

Invarianten: Bauer, Hund, Katze, Maus

```
MODULE bauer
```

```
  VAR pos : {links, rechts};
```

```
  ASSIGN
```

```
    init(pos) := links;
```

```
    next(pos) := case pos=links  : rechts;
```

```
                    pos=rechts : links;
```

```
                    esac;
```

```
MODULE passagier(mitnehmen, bauer)
```

```
  VAR pos : {links, rechts};
```

```
  ASSIGN
```

```
    init(pos) := links;
```

```
    next(pos):=
```

```
      case
```

```
        mitnehmen & pos=bauer.pos : next(bauer.pos);
```

```
        TRUE                        : pos;
```

```
      esac;
```

Invarianten: Bauer, Hund, Katze, Maus

```
MODULE main
  VAR bauer    : bauer();
      auswahl  : {h, k, m, keiner};
      hund     : passagier(auswahl=h, bauer);
      katze    : passagier(auswahl=k, bauer);
      maus     : passagier(auswahl=m, bauer);

  INVAR auswahl=h -> bauer.pos=hund.pos
  INVAR auswahl=k -> bauer.pos=katze.pos
  INVAR auswahl=m -> bauer.pos=maus.pos
  INVAR katze.pos=hund.pos -> bauer.pos=katze.pos
  INVAR katze.pos=maus.pos -> bauer.pos=katze.pos

  SPEC !EF(bauer=rechts & hund.pos=rechts &
           katze.pos=rechts & maus.pos=rechts)
```

Man erhält die gesuchte Lösung als “Gegenbeispiel”.

Beispiel für Fairness

Im Semaphoren-Beispiel ist die Liveness-Eigenschaft

$\text{SPEC } \text{AG}(p1.p=\text{wait} \rightarrow \text{AF } p1.p=\text{work})$

trivialerweise falsch, da es möglich ist, dass der Prozess p1 überhaupt nie ausgeführt wird, sondern immer nur p2.

Gilt Liveness für Ausführungen, in denen beide Prozesse fair behandelt werden und immer wieder dran kommen?

- Mit der Klausel “JUSTICE running” in prc kann man sich auf Ausführungen beschränken, in denen running immer wieder gilt, also in denen der Prozess immer wieder drankommt.
- Bei Nicht-Verwendung von process nimmt man stattdessen die Klausel “JUSTICE selector=pid” hinzu.

Auch mit dieser Fairnessbedingung gilt Liveness nicht; das System ist mangelhaft.

CTL mit Fairness

Fairness kann mit den vorhandenen CTL Operatoren nicht ausgedrückt werden.

CTL mit Fairness hat die gleichen Formeln wie CTL, aber die Semantik beachtet Fairnessbedingungen.

Gegeben sei ein Transitionssystem (S, \rightarrow) .

Definition

Eine *Fairness-Bedingung* (auch Justice-Bedingung) ist eine Teilmenge $f \subseteq S$ von Zuständen.

Definition

Eine *Interpretation für CTL mit Fairness* ist eine Interpretation wie für CTL sowie mit einer Liste von Fairnessbedingungen
 $F = (f_1, \dots, f_n)$.

CTL mit Fairness

Wir definieren die Semantik von CTL mit Fairness wie für CTL, beschränken aber alle Quantoren auf Pfade, die *fair* bezüglich der Liste von Fairnessbedingungen in der Interpretation \mathcal{I} sind.

Definition

Ein unendlicher Pfad $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow \dots$ ist *fair bezüglich einer Fairness-Bedingung f* , wenn die Menge $\{i \in \mathbb{N} \mid s_i \in f\}$ unendlich ist (“es kommen immer wieder Zustände aus f vor”).

Definition

Ein unendlicher Pfad ist *fair bezüglich einer Liste (f_1, \dots, f_n) von Fairness-Bedingungen*, wenn er bzgl. jeder einzelnen fair ist.

Semantik von CTL mit Fairness

- $s \models_{\mathcal{I}} p$ genau dann wenn $s \in \mathcal{I}(p)$.
- $s \models_{\mathcal{I}} \neg\phi$ genau dann wenn $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ nicht gilt (auch geschrieben als $s \not\models_{\mathcal{I}} \phi$).
- $s \models_{\mathcal{I}} \phi \wedge \psi$ genau dann wenn $s \models_{\mathcal{I}} \phi$ und $s \models_{\mathcal{I}} \psi$.
- die anderen Boole'schen Operatoren \vee, \Rightarrow , etc. sind analog.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EX}\phi$ gdw: Es gibt einen *fairen* unendlichen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ mit der Eigenschaft, dass $s_1 \models_{\mathcal{I}} \phi$.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AX}\phi$ gdw: Alle *fairen* unendlichen Pfade $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass $s_1 \models_{\mathcal{I}} \phi$ gilt.

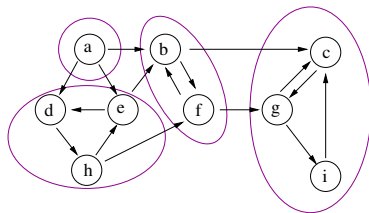
Semantik von CTL mit Fairness, Fortsetzung

- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AG}\phi$ gdw: Alle *fairen* unendlichen Pfade $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EG}\phi$ gdw: Es gibt einen *fairen* unendlichen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ mit der Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für alle $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{EF}\phi$ gdw: Es gibt einen *fairen* unendlichen Pfad $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ mit der Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für ein $i \geq 0$ gilt.
- $s \models_{\mathcal{I}} \text{AF}\phi$ gdw: Alle *fairen* unendlichen Pfade $s = s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3 \rightarrow \dots$ haben die Eigenschaft, dass $s_i \models_{\mathcal{I}} \phi$ für ein $i \geq 0$ gilt.

Model-Checking mit Fairness

- Eine nichttriviale SCC ist *fair*, wenn sie einen fairen Pfad enthält. Das ist genau dann der Fall, wenn sie für jede Fairnessbedingung f_i einen Zustand $s_i \in f_i$ enthält.
- Von einem Zustand aus gibt es einen fairen Pfad, genau dann, wenn von ihm aus eine faire (echte) SCC erreicht werden kann.

Sei $f_1 = \{a, d, f\}$ und $f_2 = \{d, b\}$.



Die Komponenten $\{d, e, h\}$ und $\{b, f\}$ sind fair.

Von a, b, d, e, f, h aus gibt es faire Pfade, von c, g, i aus nicht.

Model-Checking mit Fairness

- Um also die Zustände zu finden, in denen $EG\phi$ gilt, betrachtet man den Teilgraphen aller Zustände, die ϕ erfüllen, und sucht nach erreichbaren fairen SCCs.
- In einem Zustand s gilt $EX\phi$, wenn er einen Folgezustand besitzt, in dem ϕ gilt und von dem außerdem ein fairer Pfad ausgeht. Letzteres stellt man durch Prüfen von $EG\top$ fest.
- $E[\phi U \psi]$ wird analog behandelt.

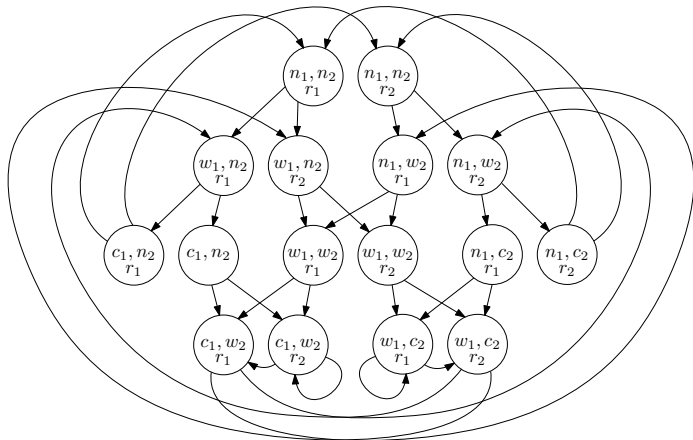
Strong Fairness

Es gibt auch allgemeinere Fairness-Bedingungen der Form: Falls g unendlich oft, dann auch f unendlich oft. In SMV können diese mit COMPASSION angegeben werden. Model-Checking solcher *strong fairness* oder “*compassion*” Bedingungen ist in ähnlicher Weise möglich, aber etwas komplizierter.

Beispiel: Semaphore mit Fairness

Überprüfe die Liveness-Eigenschaft $w_1 \Rightarrow \text{AF}c_1$ (äquivalent zu $w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1$) für das Semaphorenbispiel von Folie 166.

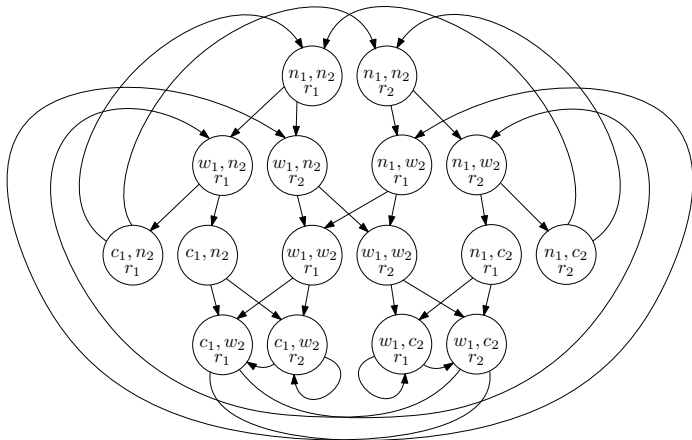
Transitionssystem: (n – sleep, w – wait, c – work, r – running):



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

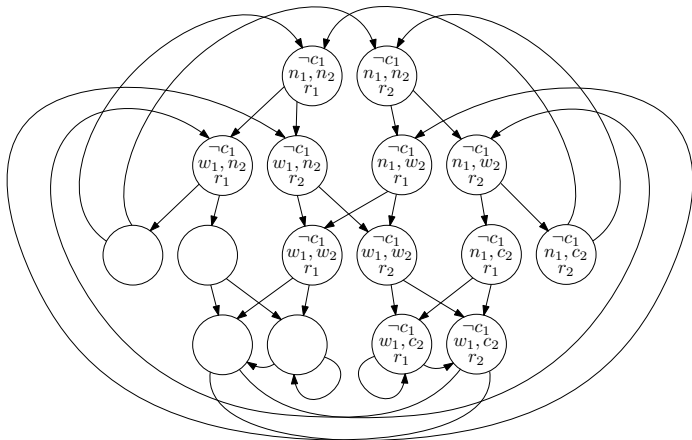
Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

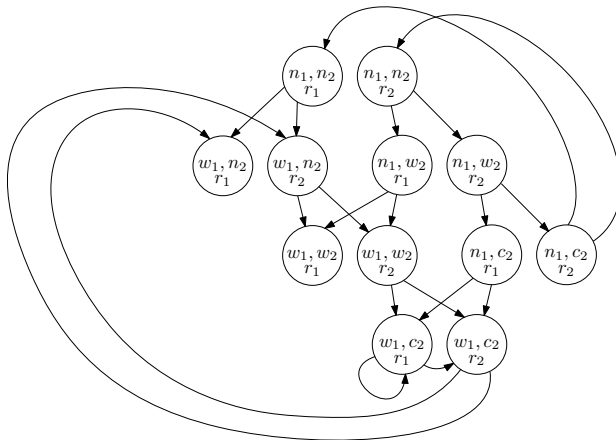
Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

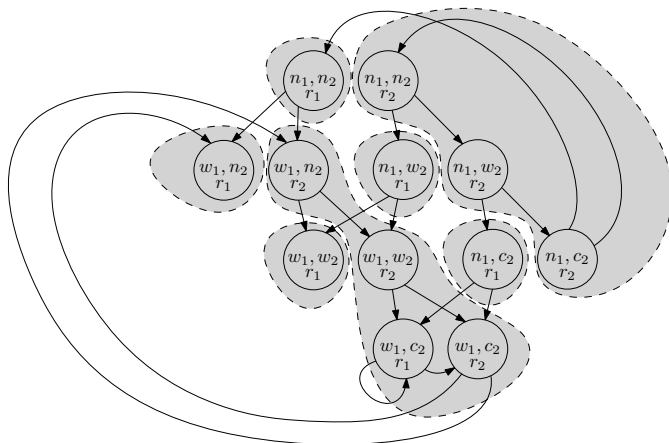
Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

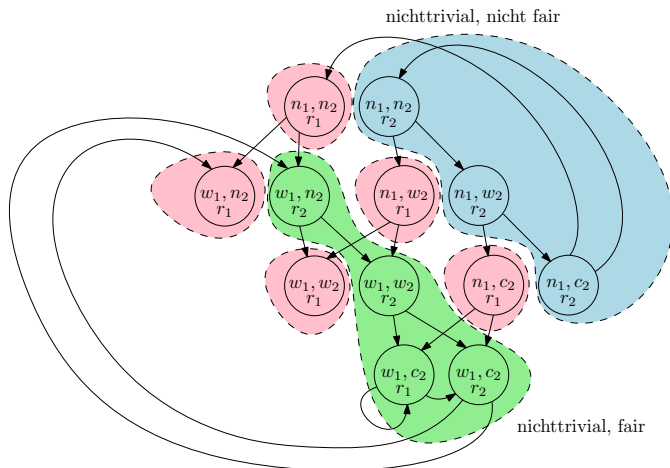
Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

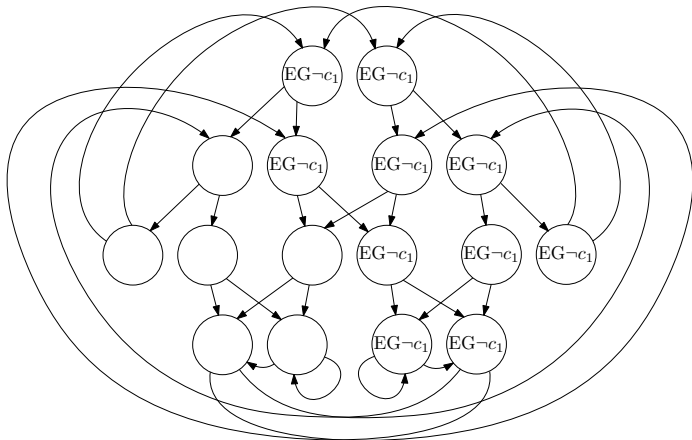
Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$



Beispiel: Semaphore mit Fairness

Formel: $\phi = (w_1 \Rightarrow \neg \text{EG} \neg c_1)$

Fairnessbedingungen: $\{r_1\}, \{r_2\}$

