

Magasabb szintű formalizmus: Állapottérképek (statecharts)

dr. Majzik István
BME Méréstechnika és Információs
Rendszerek Tanszék

Modellek a formális ellenőrzéshez

Mivel nyújt többet egy magasabb szintű formalizmus?
Hogyan használható szoftver szintézisre és verifikációra?

MéRNÖKI modellek

Magasabb szintű formalizmusok
SC, PN, CPN, DFN

Alapszintű matematikai formalizmusok
KS, LTS, KTS

**Modell-
transzformációk**



Tartalomjegyzék

- Alapelemek
- Az állapottérkép szintaxisa
 - UML 2 statechart diagram
- Az állapottérkép szemantikája
 - UML 2 State Machine szemantika
 - (Más szemantikák: pl. Harel-féle szemantika)
- Állapottérképek használata

Mi az állapottérképek célja?

- **Állapot alapú, eseményvezérelt rendszerek viselkedésének megadására alkalmasak**
 - Egy állapotgép viselkedésének leírása
 - **Reaktív viselkedés:**
Külső események hatására történő állapotváltást ír le
 - Pl. bejövő üzenet, jelzés, hívás, ...
 - **Akciók:** az állapotátmenetekhez rendelt tevékenységek, történések
 - Pl. értékadás, kimenő üzenet, ...
- **Szokásos használat:**
 - **Beágyazott rendszerek:** bejövő események feldolgozása (pl. robot vezérlése, vagyonvédelmi rendszer, ...)
 - **Protokollok:** üzenetek feldolgozása

Alapfogalmak

- **Állapot, aktív állapot**
 - Adott feltételek teljesülése (pl. művelet végrehajtható)
 - Állapotváltozók adott értékei
- **Állapotátmenet**
 - **Állapot változása**
 - **Trigger esemény** válthatja ki
 - Trigger nélküli átmenet: „önmagától” következik be
 - **Őrfeltétel** rendelhető hozzá
 - Állapotátmenet csak akkor történhet meg, ha az őrfeltétel igaz
 - **Akció** rendelhető hozzá
 - Állapotátmenethez rendelt tevékenység, történés
- **Esemény**
 - Aszinkron történés, paramétere is lehetnek
 - Önálló elem, eseményosztály példánya
 - Öröklés: esemény attribútumok bővítése

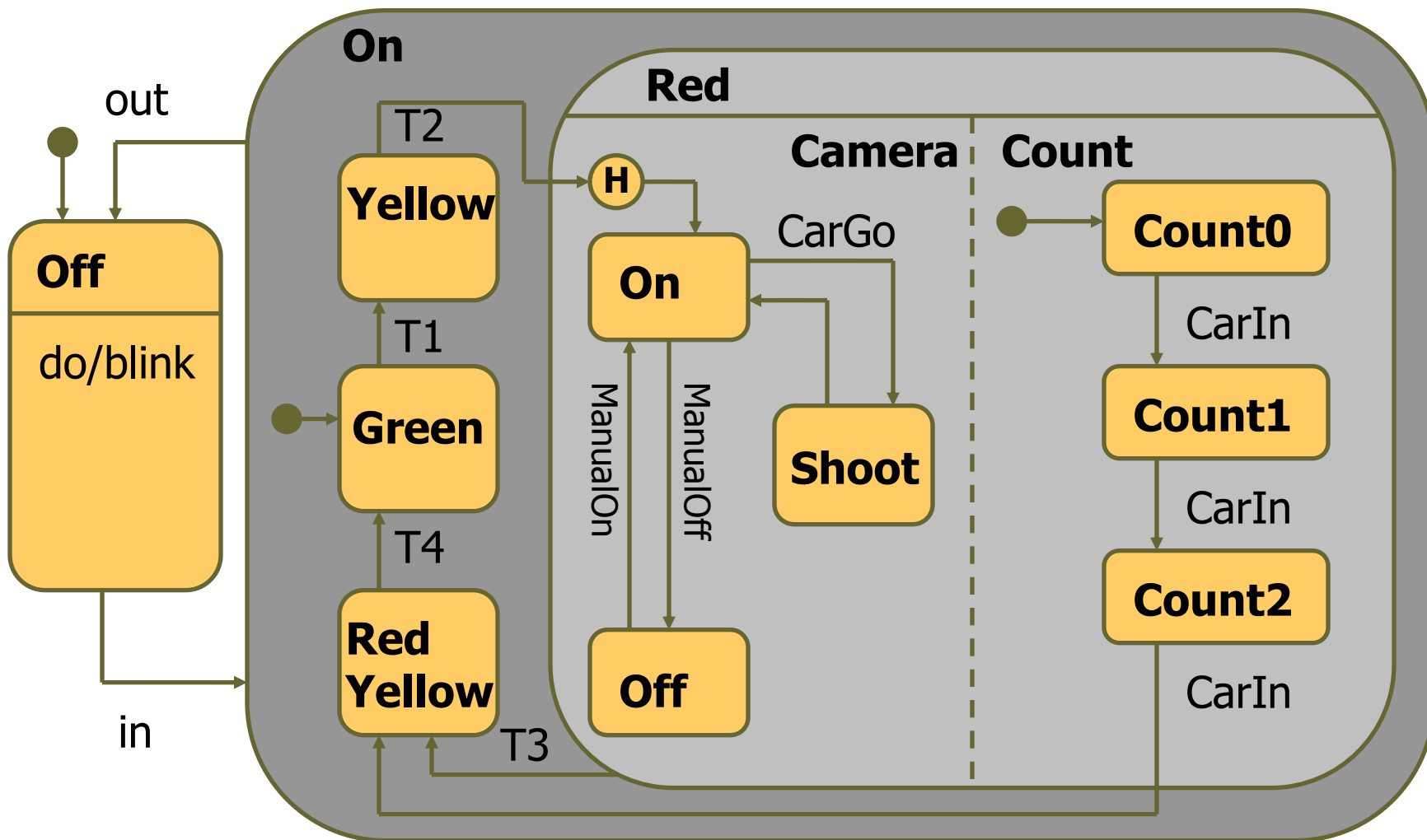
Új igények a könnyebb használat érdekében

- **Állapotok finomítása: Állapothierarchia**
 - Szuperállapot: alállapotok közös tulajdonságaihoz
- **Konkurens viselkedés leírása**
 - Nem akarunk sorrendi kötöttséget megadni (egyidejűleg, vagy tetszőleges sorrendben végzett feldolgozás)
 - Többszálú / elosztott / párhuzamos végrehajtás esetén
- **Összetett állapotátmenetek**
 - Szétváló, egyesülő, feltételtől függő elágazó átmenet
- **Emlékezés: Visszatérés egy korábbi aktív állapotkonfigurációra**
 - Visszatérés adott feldolgozáshoz közbenső esemény után
 - Egy állapotfinomítási szinten vagy mélyebben is

Állapotdiagramok és állapottérképek

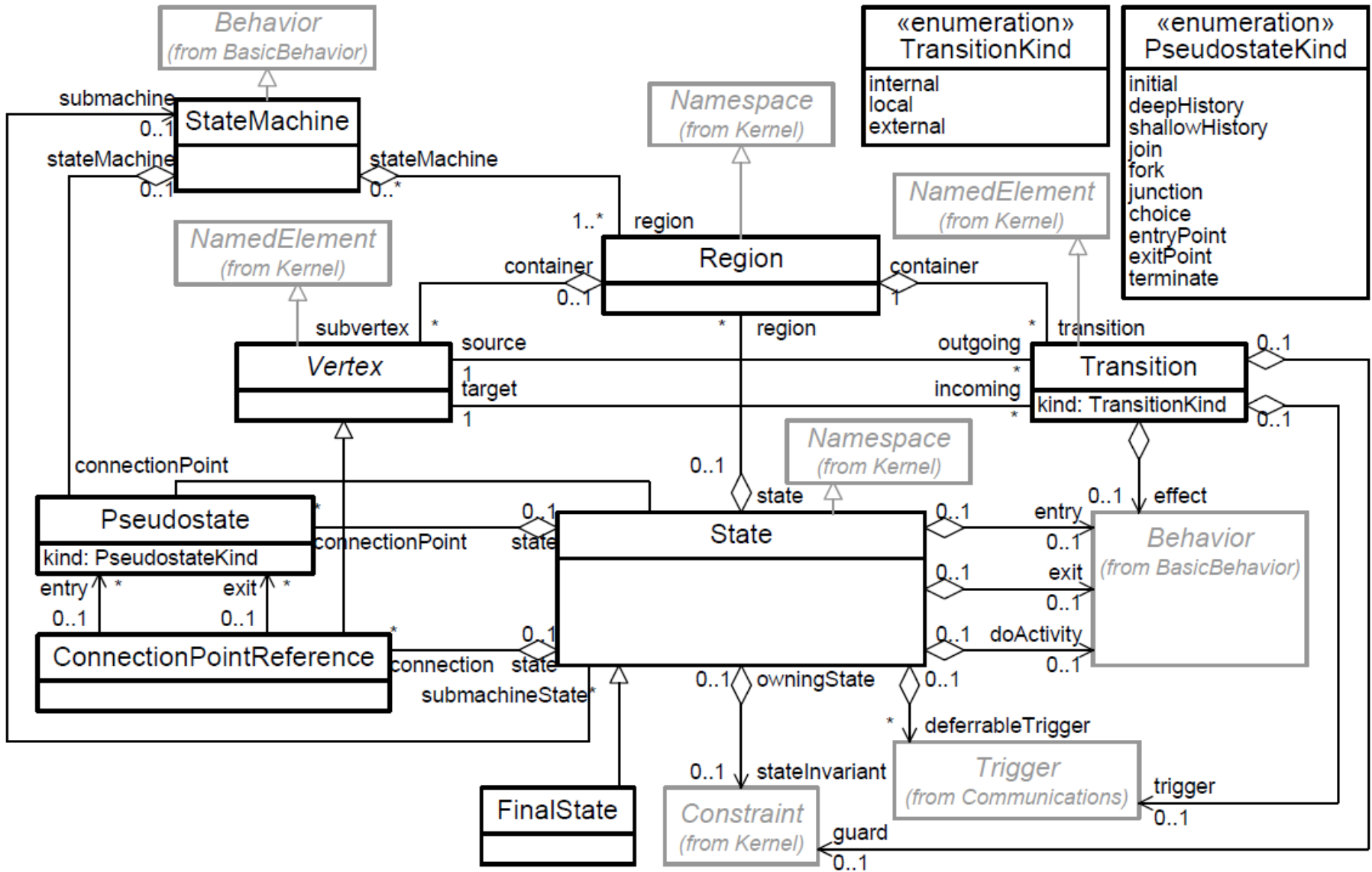
- **Állapotdiagram:**
 - Egyszintű, egyszerű állapotok és átmenetek
 - Pl. UPPAAL esetén látott automaták leírása
- **Állapottérkép:** az állapotdiagram kiterjesztése
 - **Állapothierarchia:** állapotok finomítása
 - **Konkurens régiók:** konkurens viselkedés leírása
 - **Összetett átmenetek:** szétváló, egyesülő, feltételes
 - **Emlékezés:** Legutolsó aktív állapotkonfiguráció tárolása
 - Szintaktikai segédelemek
 - Ritkán használt (nem intuitív) kiegészítések
 - Késleltetett esemény
 - Szinkronizációs állapot
 - ...

Egy állapottérkép



Az állapottérképek szintaxisa (UML szerinti szintaxis)

UML State Machine metamodel



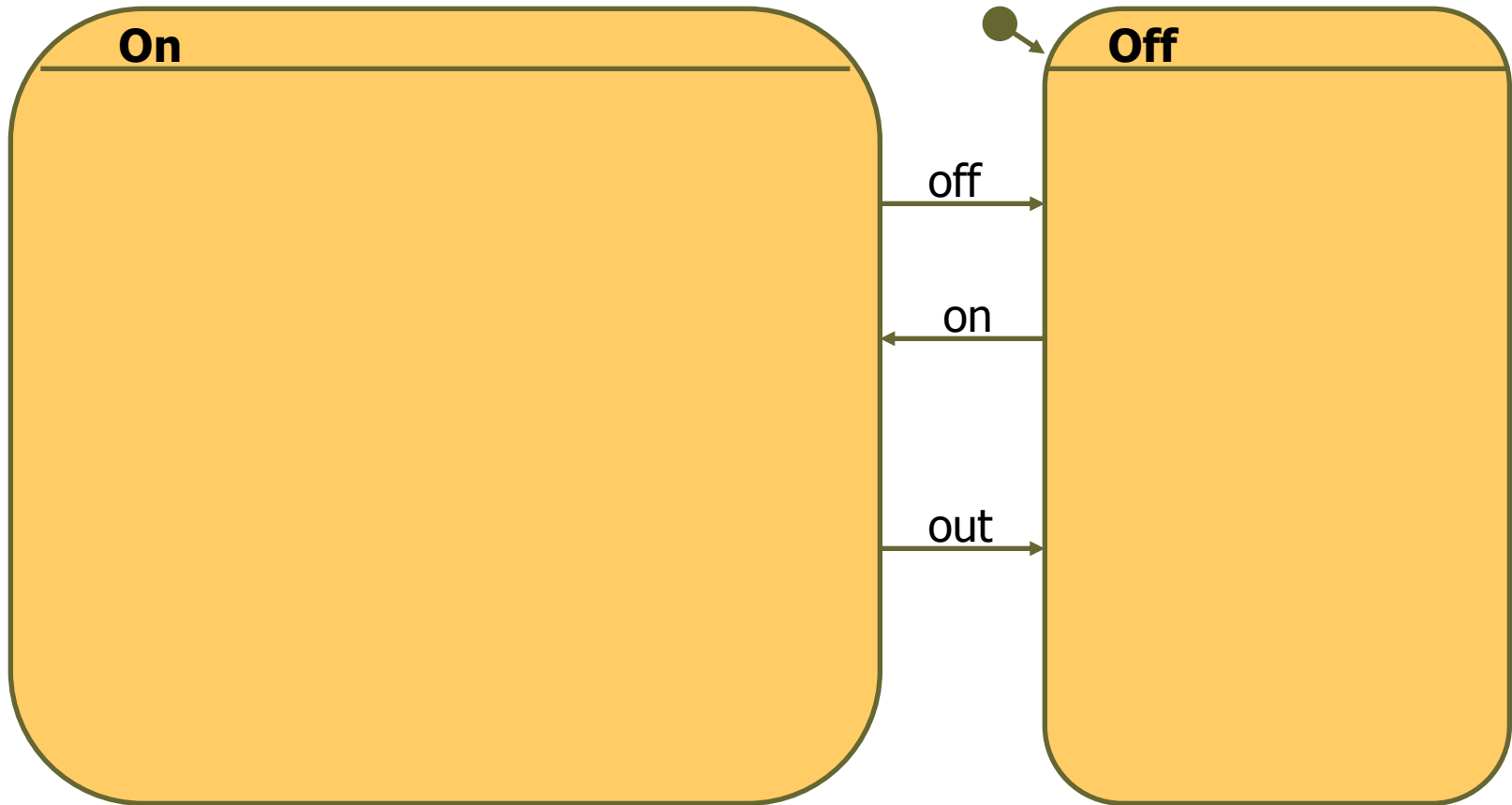
Állapotok: Akciók és állapotfinomítás

- Állapotok: Alapszintű modellelem
- Állapotokhoz kötődő akciók:
 - Belépési akció (**entry** / ...)
 - Kilépési akció (**exit** / ...)
 - Belső aktivitások (**do** / ...)
- Állapotfinomítás
 - **Egyszerű állapot**: nincs finomítása
 - **OR jellegű finomítás**: alárendelt alállapotok
 - Ezek közül egyszerre egy állapot lehet aktív
 - **AND jellegű finomítás**: konkurens régiók
 - Egyidejűleg minden egyes régióban kell legyen aktív állapot!

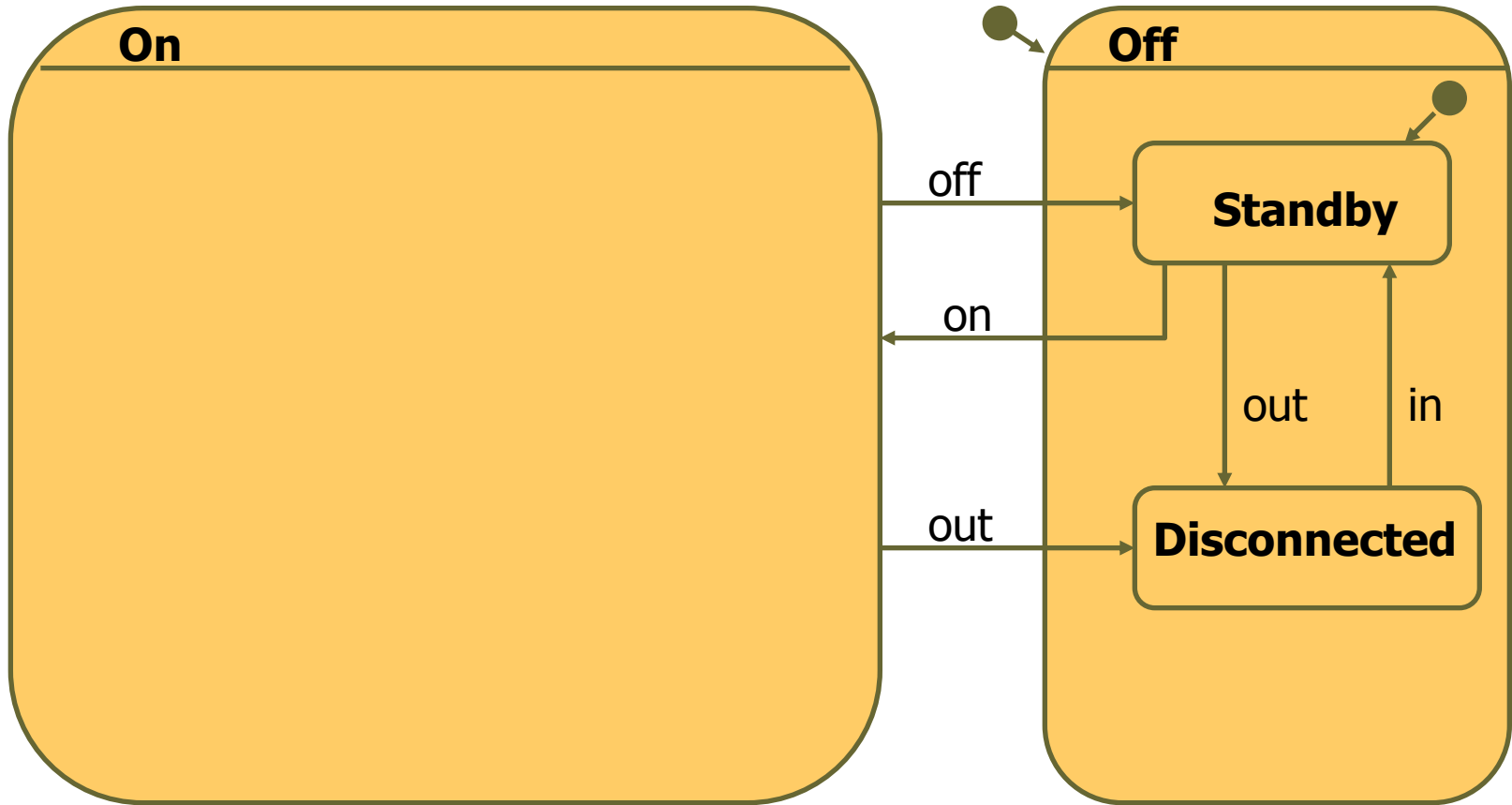
print_job

entry / init()
exit / reset()
do / poll()
job / print()

Példa: Állapotfinomítás

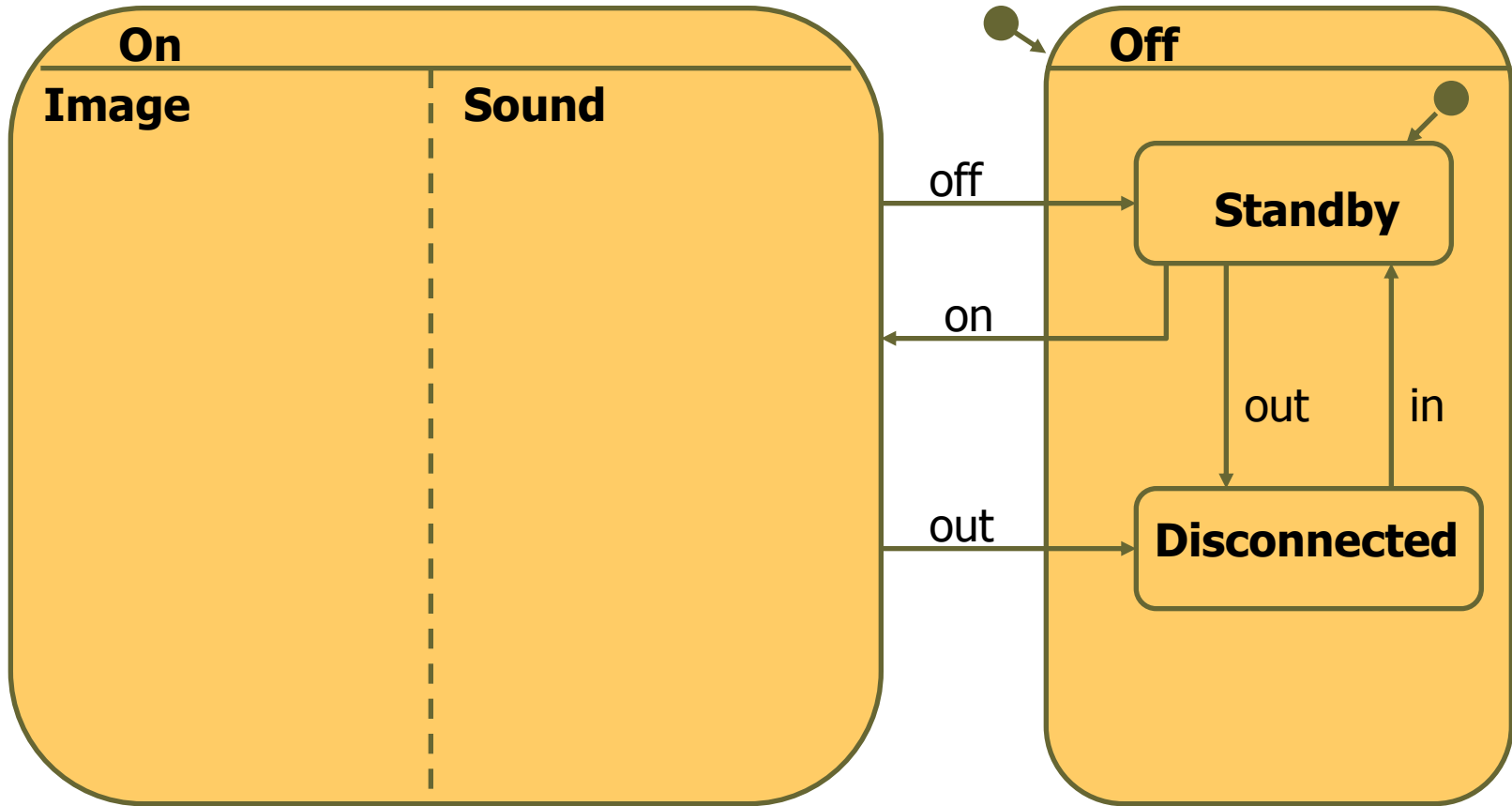


Példa: Állapotfinomítás



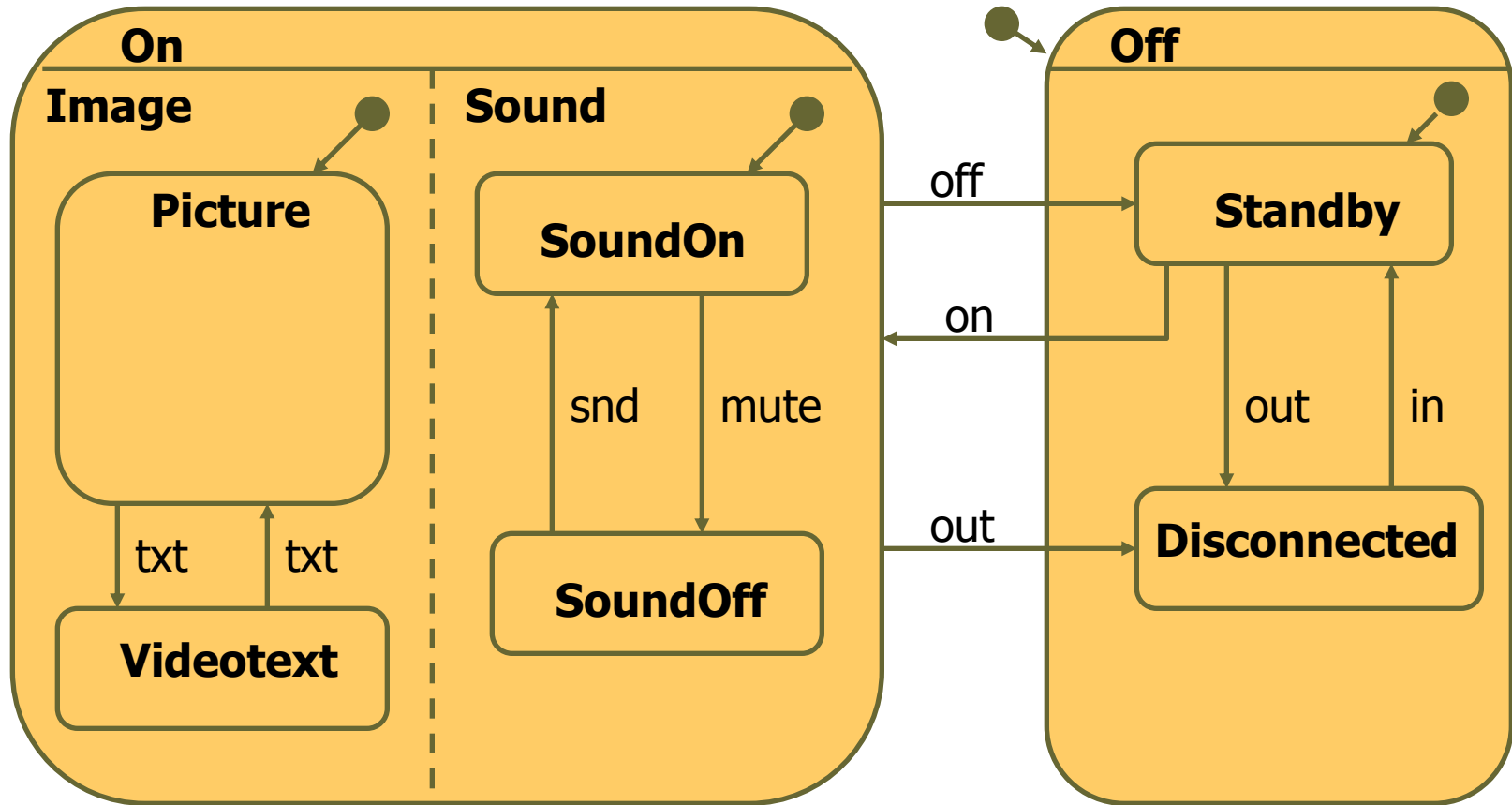
OR jellegű finomítás

Példa: Állapotfinomítás



AND jellegű finomítás

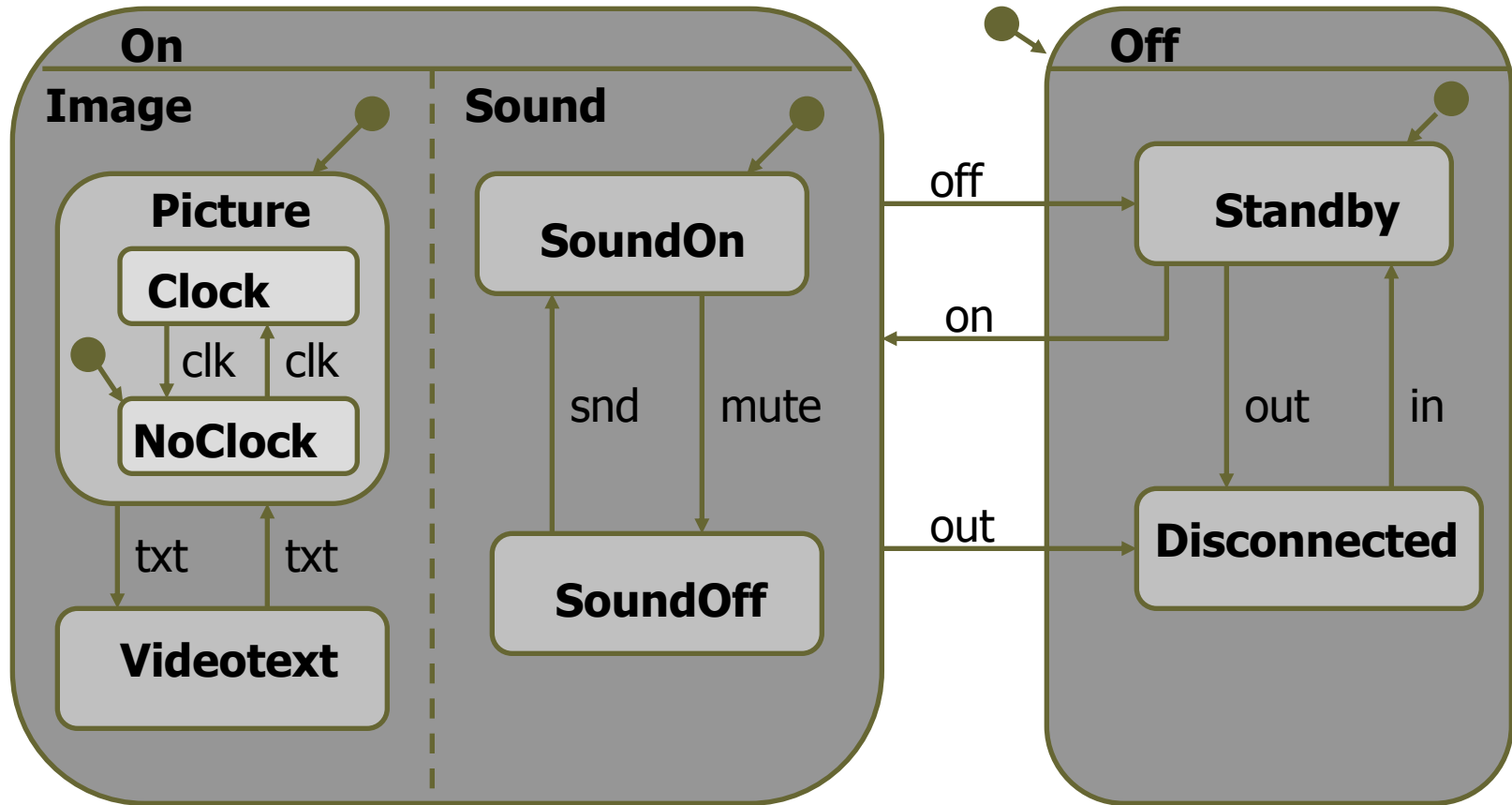
Példa: Állapotfinomítás



AND jellegű finomítás

OR jellegű finomítás

Példa: Állapotfinomítás

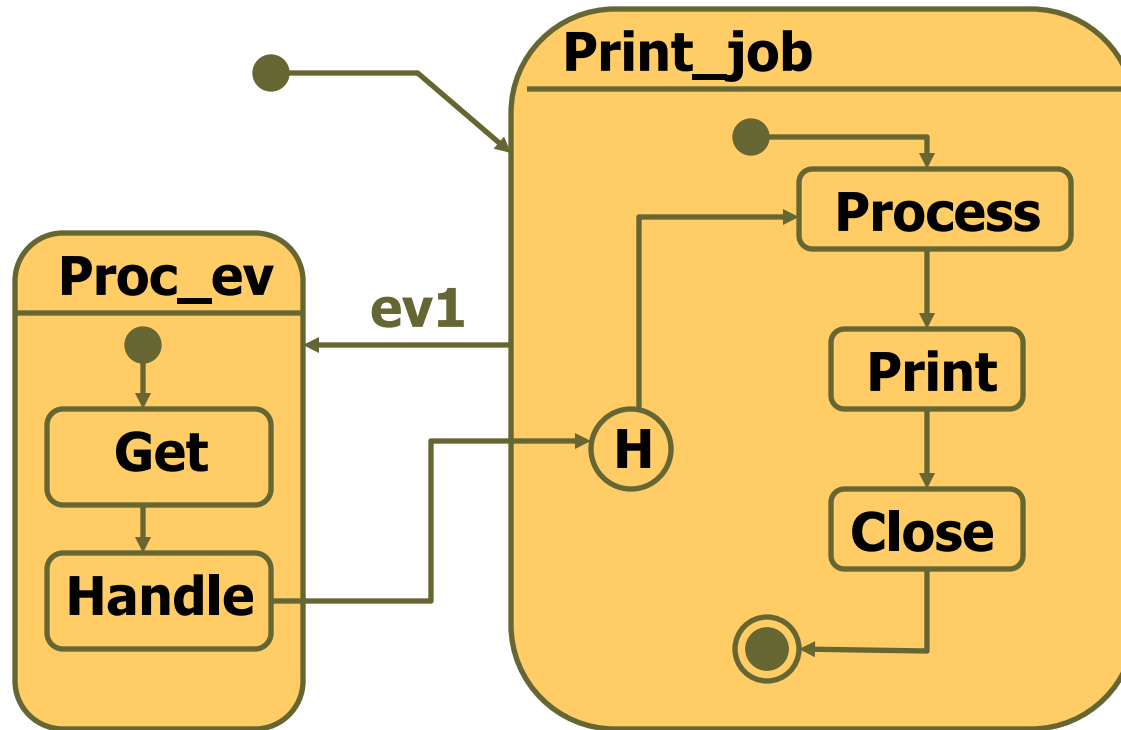


Pszeudo-állapotok

- **Kezdőállapot** jelzés: régióba való belépéskor lesz aktív
 - Minden OR finomításban egy
 - Minden AND régióban egy
- **Végállapot** jelzés: állapotgép terminálás
- **Emlékező** állapotok (history state)
 - A legutolsó aktív állapotkonfigurációt „tárolja”
 - **Egyszerű** emlékező állapot: csak az adott finomítási szinten
 - **Mélyen emlékező** állapot: a mélyebb finomítási szinteket is
 - Mit jelent az emlékező állapothoz húzott **bemenő** átmenet?
 - Tüzelésekor a „tárolt” állapotkonfigurációba kerül az objektum
 - Az emlékező állapot egy „hivatkozás” a tárolt állapotkonfigurációra
 - Mit jelent az emlékező állapotból húzott **kimenő** átmenet?
 - Alapértelmezett „tárolt” állapotot jelöl ki arra az esetre, ha előzőleg még nem volt aktív állapot

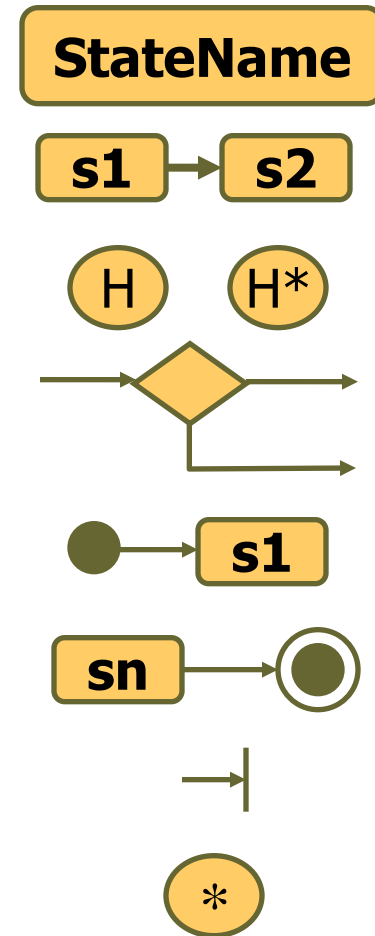


Példa: Emlékező állapot



Állapottérképek elemei

- Állapot
- Állapotátmenet
- Emlékező állapot
- Feltétel
- Kezdőállapot
- Végállapot
- Állapotcsonk
- (Szinkronizáció)



(Állapot)átmenetek

- Állapotátmenetek megadása
- Szintaxis:

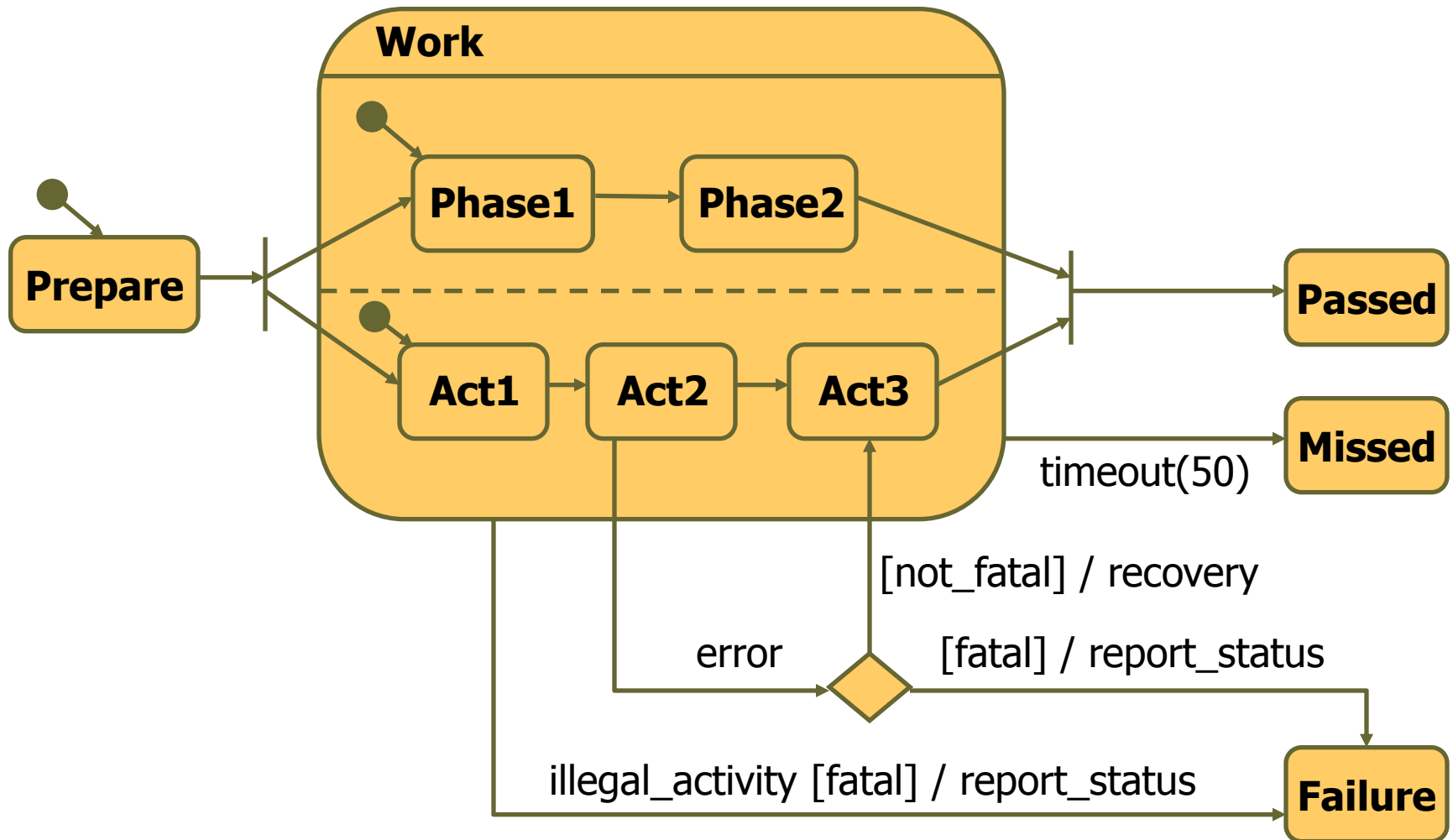
trigger [guard] / action

- **trigger**: kiváltó esemény
- **guard**: az átmenet őrfeltétele
 - Predikátum az állapotváltozók és esemény paraméterek felhasználásával
 - Állapotra való hivatkozás is lehet: `is_in(state)`
- **action**: akció (művelet)
 - akció szemantika: művelet részletezése

Átmenetek specialitásai

- Time-out mint trigger:
 - Fennáll, ha az objektum az átmenethez tartozó kiindulási állapotban tartózkodik végig az adott időintervallumban
- Összetett átmenetek:
 - Szétváló (fork): konkurens régiókban lévő állapotokba való együttes belépés
 - Egyesülő (join): konkurens régiókban lévő állapotokból való együttes kilépés
 - Elágazó (condition): több, őrfeltételtől függő átmenet egyszerűsített jelölése (szegmensek)
- Állapothierarchián átívelő átmenetek
 - Megengedett (nem elegáns)

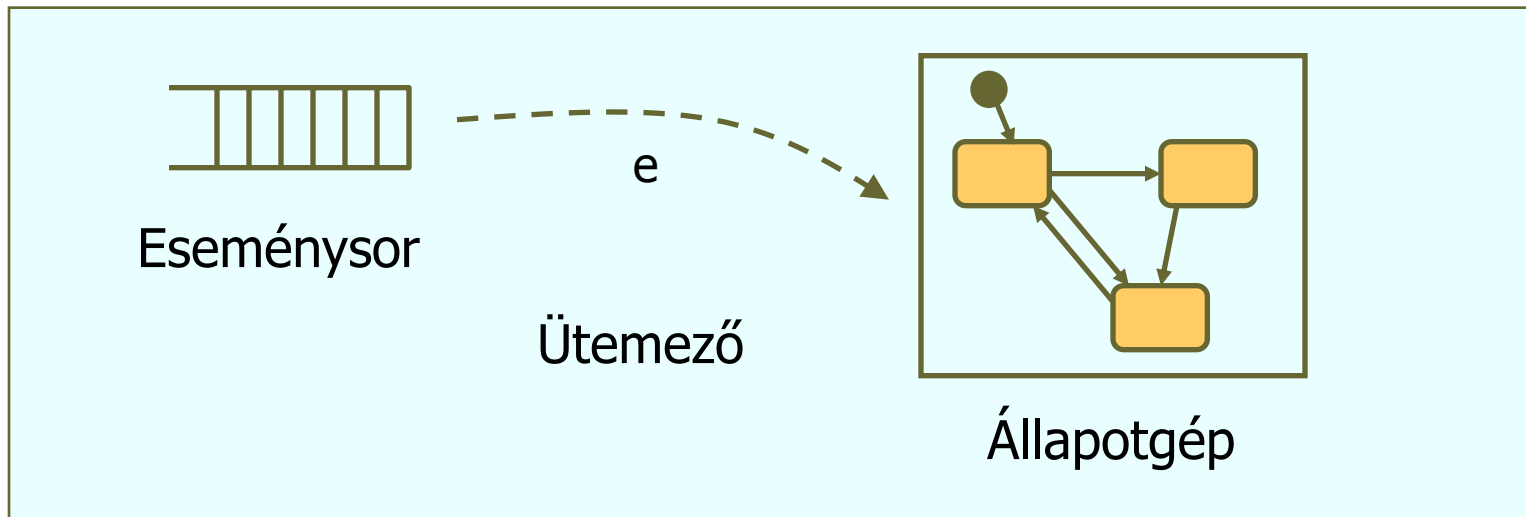
Példa: Állapotátmenetek



Az állapottérképek informális szemantikája (UML szerinti szemantika)

Szemantika: Hogyan működik?

- Alapelemek:
 - **Állapotgép:** Az állapottérkép írja le a viselkedését
 - **Eseménysor + Ütemező:** „Futtató rendszer”
(az állapotgép szempontjából külső elemek)



Mit ad meg a szemantika?

Mit tesz az állapotgép egy esemény hatására

→ állapotgép egy **lépése**

- **Állapotátmenetek tüzelnek**

- Újdonság: egy esemény hatására több konkurens állapotátmenet tüzelhet

- **Állapotkonfiguráció változik**

- **Több aktív állapot lehet**

- Aktív állapot minden régiójában kell legyen egy aktív állapot

- Aktív állapot OR finomításában kell legyen egy aktív állapot

- Egy OR finomításban illetve egy régióban csak egy aktív állapot lehet

- Rekurzívan érvényes

A szemantika alaptulajdonságai

- Egyenként feldolgozott események
 - Az ütemező akkor küld újabb eseményt, ha az előző feldolgozása teljes egészében megtörtént
 - Stabil állapotkonfiguráció kialakult: nincs trigger nélküli átmenet
- Események teljes feldolgozása (run to completion)
 - Átmenetek maximális halmaza tüzel
 - Minden engedélyezett átmenet tüzel, kivéve ha ezt konfliktus megakadályozza
 - Ezek tüzelése után dolgozza fel a következő eseményt
- Az eseményfeldolgozás a szemantika lényege
 - Ez alapján lehet programkód alakjában megvalósítani az állapotgépet (forráskód generálás)

Az eseményfeldolgozás lépései 1/4

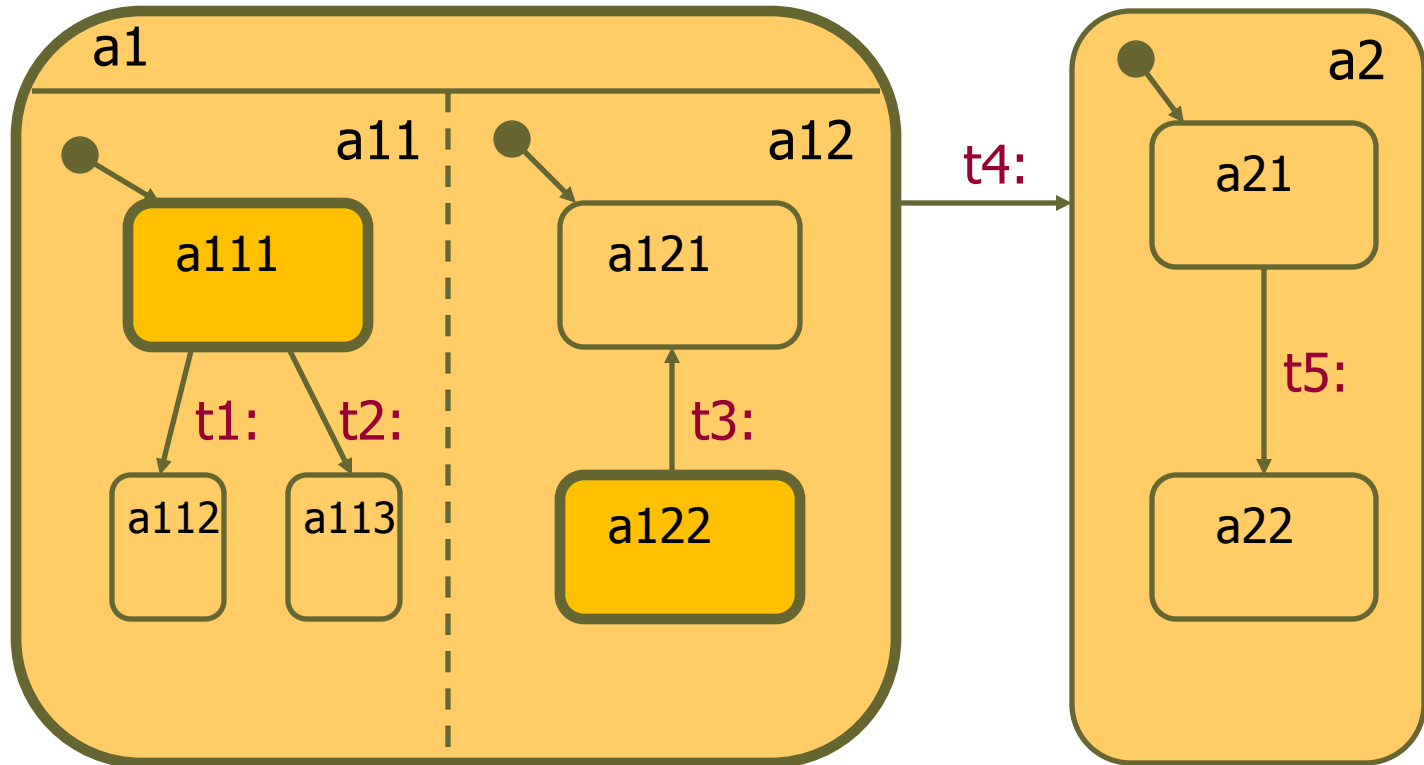
- Külső feltétel: Ütemező a stabil konfigurációban lévő állapotgépnek egy eseményt juttat
- **Engedélyezett átmenetek:**
 - Kiindulási (forrás-) állapot aktív
 - A kiválasztott esemény az átmenet triggere
 - Az őrfeltételek teljesülnek

Esetek az engedélyezett átmenetek száma alapján:

- Ha csak egy van: Tüzelhet!
- Ha nincs: Halasztott-e az esemény?
 - Igen: tárolás, új esemény kérése az ütemezőtől
 - Nem: esemény eldobható (hatás nélküli)...
- Ha több van: Tüzelő átmenetek **kiválasztása** szükséges
 - Befolyásol: A konfliktus

Példa: Konfliktus

A t_1, \dots, t_5 átmenetek ugyanazon e eseményre triggereltek.
Melyek nem tüzelhetnek együtt?



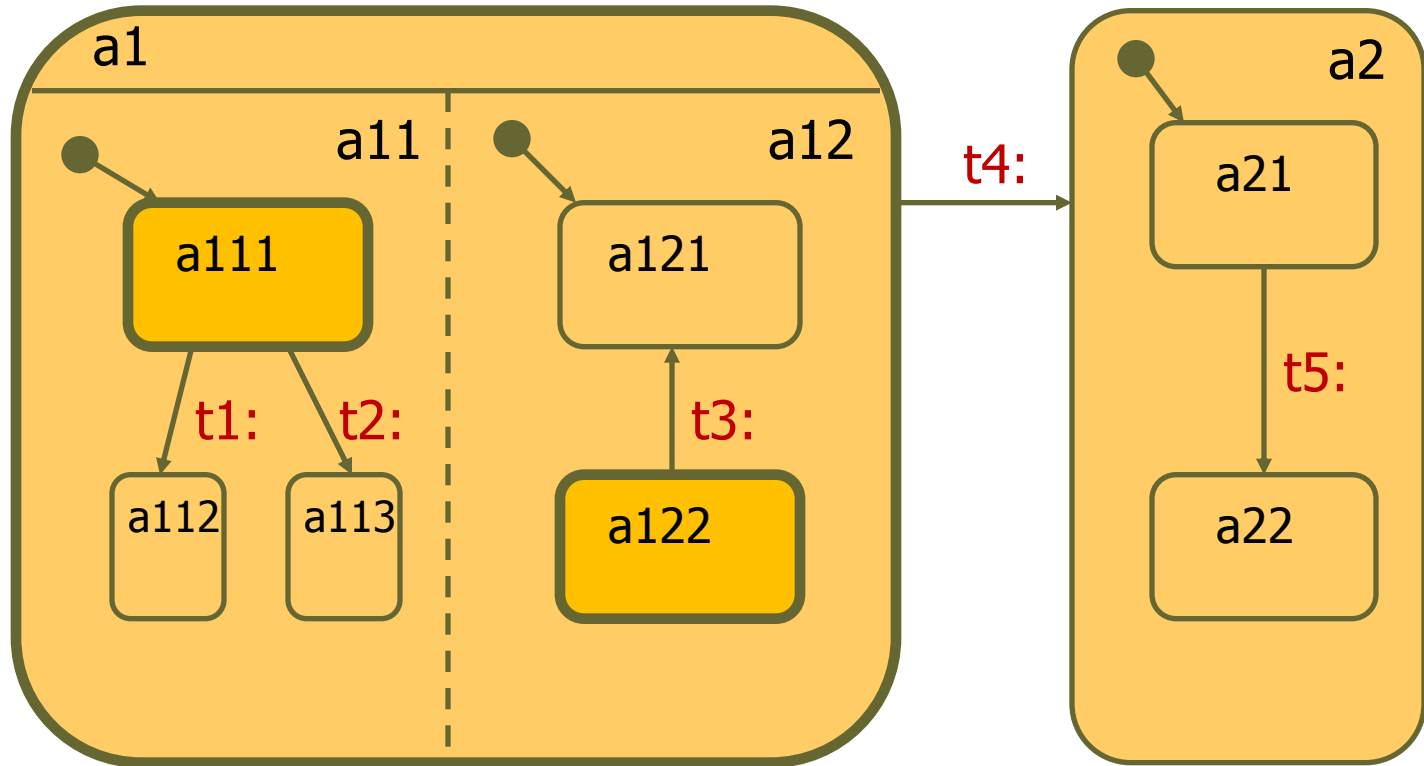
- Nem engedélyezett: t_5 (forrásállapota nem aktív)
- Egyszerre nem tüzelhetnek: (t_1, t_2) ; (t_1, t_4) ; (t_2, t_4) ; (t_3, t_4)
- Egyszerre is tüzelhetnek: (t_1, t_3) ; (t_2, t_3) ;

Eseményfeldolgozás lépései 2/4

- **Tüzelő átmenetek kiválasztása:**
 - Maximális számú átmenet, nem lehet közöttük konfliktus
 - Konkurens átmenetek szimultán tüzelése
- **Konfliktusban lévő átmenetek:**
 - Ugyanazt az állapotot hagyják el, pontosabban az elhagyott állapothalmazok metszete nem üres
- **Konfliktus feloldása:**
 - **Prioritás alapján:** egy átmenet prioritása nagyobb, ha az átmenet kiindulási állapota az állapothierarchiában (finomításban) **alacsonyabb szintű**
 - OO koncepció: a finomítás „felüldefiniál”
 - **Véletlenszerű választás,** ha azonos prioritásúak

Példa: Konfliktusfeloldás

A t_1, \dots, t_5 átmenetek ugyanazon e eseményre triggereltek.
Melyek tüzelhetnek együtt?

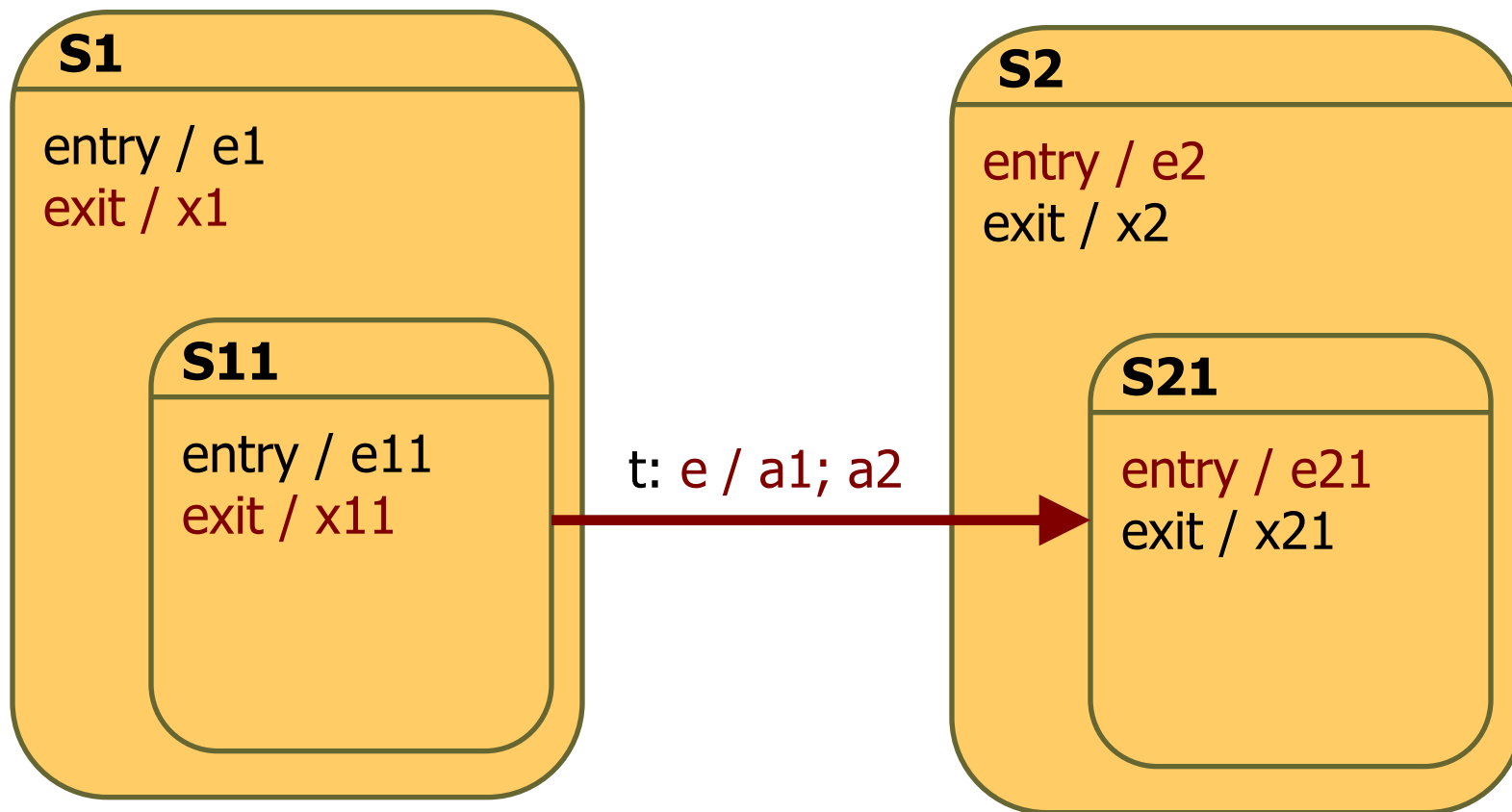


- Nagyobb prioritású t_4 -nél: t_1 és t_2
- Tüzelhet: (t_1, t_3) vagy (t_2, t_3)

Eseményfeldolgozás lépései 3/4

- Kiválasztott átmenetek **tüzelnek**:
 - Sorrend véletlenszerű (nincs köztük konfliktus)
 - Akció végrehajtási sorrend nemdeterminisztikus
- Egy átmenet **tüzelése**:
 1. Kiindulási állapotok **elhagyása**
 - Alacsonyabb hierarchiaszinten először
 - Kilépési akciók végrehajtása (**exit** akciók)
 2. Átmenetek akcióinak **végrehajtása**
 3. Célállapotokba való **belépés** → új konfiguráció
 - Magasabb hierarchiaszinten először
 - Belépési akciók végrehajtása (**entry** akciók)

Példa: Akciók sorrendezése

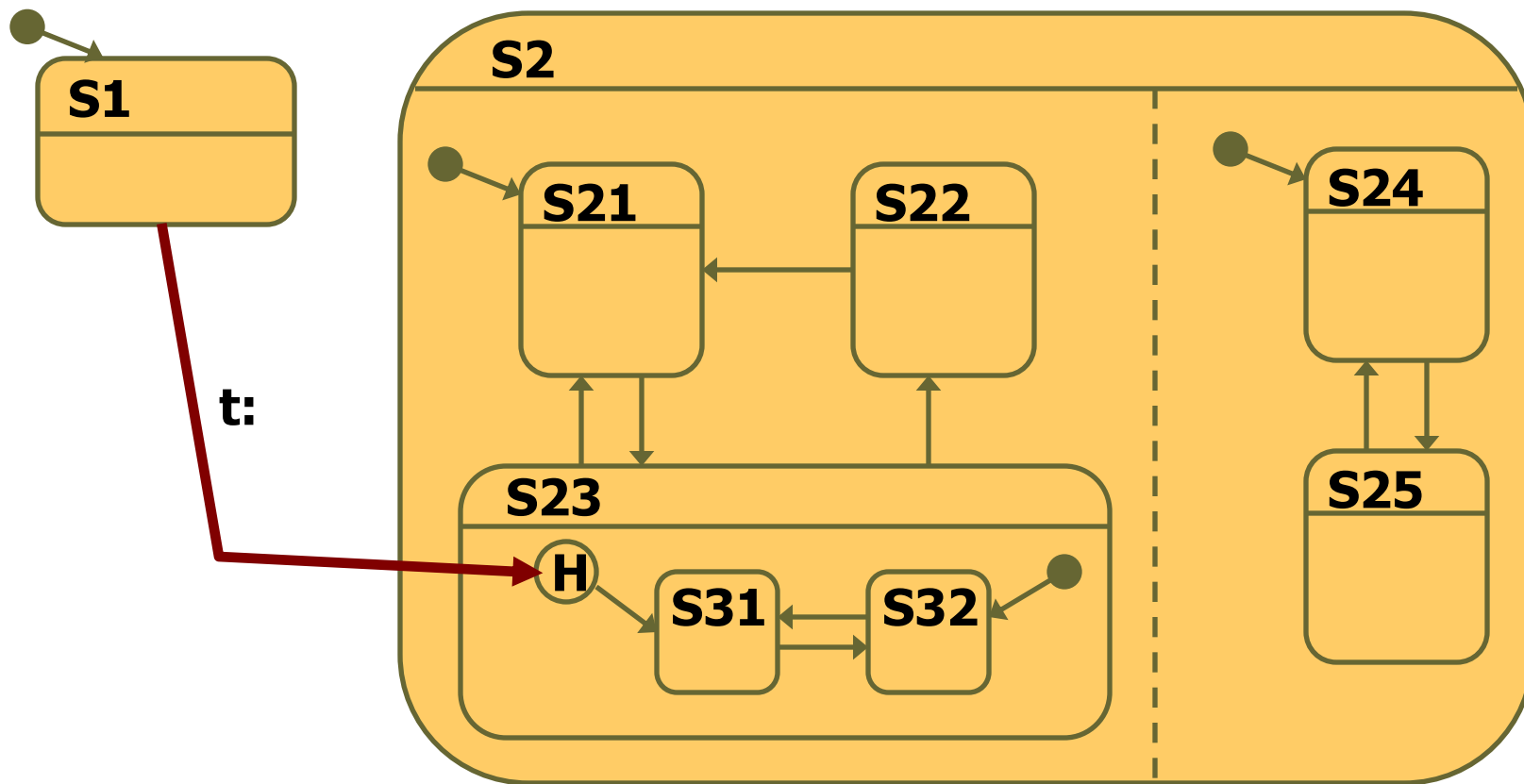


Akciók sorrendje: x11; x1; a1; a2; e2; e21

Eseményfeldolgozás lépései 4/4

- **Belépés új konfigurációba különféle jellegű célállapotok esetén:**
 - **Ha egyszerű (nem finomított) a célállapot:**
 - Új konfiguráció része lesz
 - Ős állapotai (amelyek finomításában szerepel) is aktívak lesznek
 - Aktívvá váló ős állapotok minden régiójában lesz aktív állapot (kezdőállapot jelöli ki)
 - **Ha OR finomítása van a célállapotnak:**
 - A finomításban a kezdőállapot jelöli ki az aktív állapotot
 - **Ha AND finomítása van a célállapotnak:**
 - Minden régiójában kell legyen aktív állapot (kezdőállapot jelöli ki)
 - **Ha emlékező állapot:**
 - Az utoljára elhagyott állapotkonfiguráció lesz újra aktív
 - Ha nem volt még ilyen: a kimenő él határozza meg
 - **Ha nem stabil az állapot: azonnali továbblépés**

Példa: Belépés konkurens állapotba

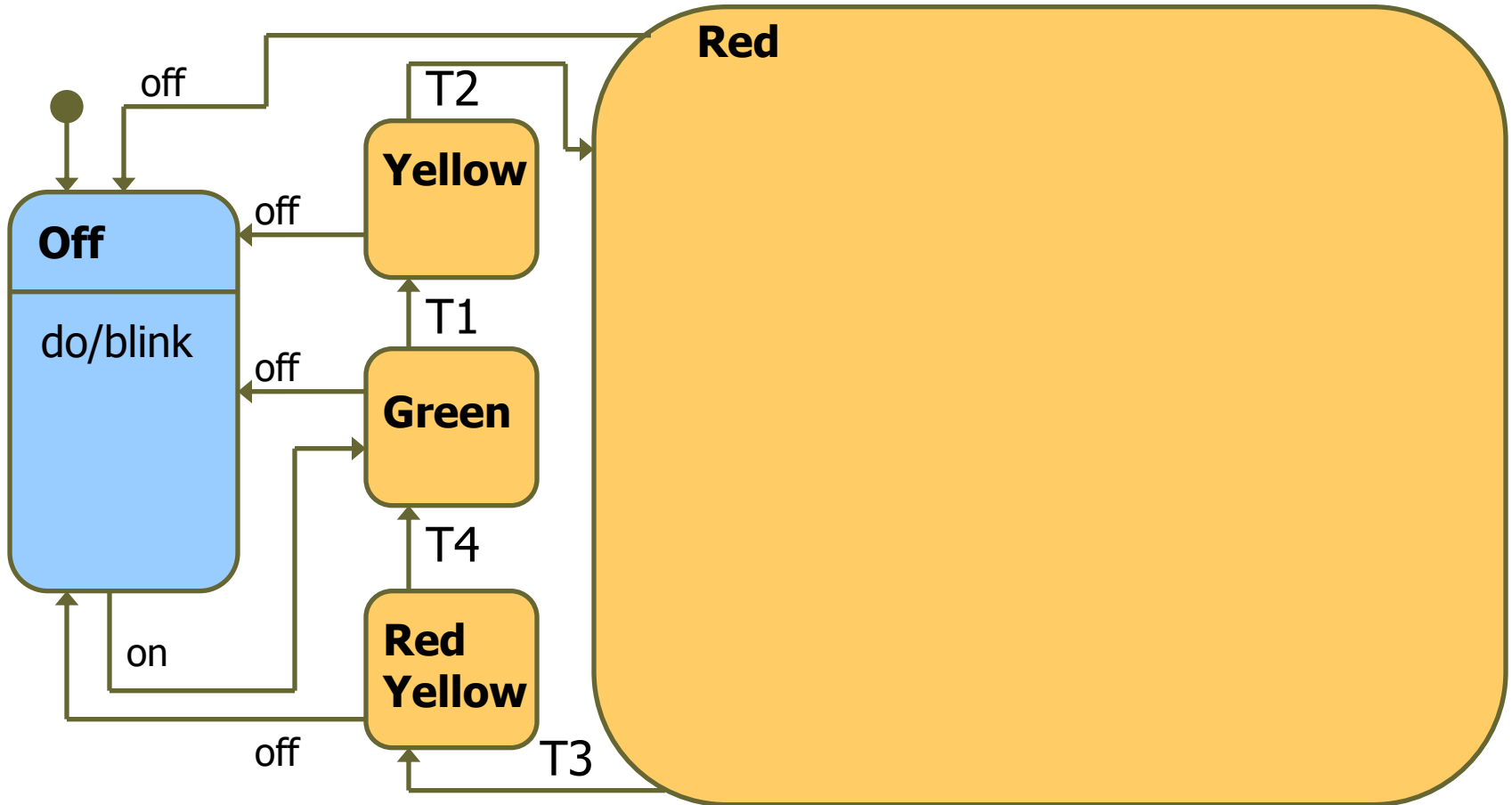


A **t** átmenet tüzelése után mi lesz az új állapotkonfiguráció?

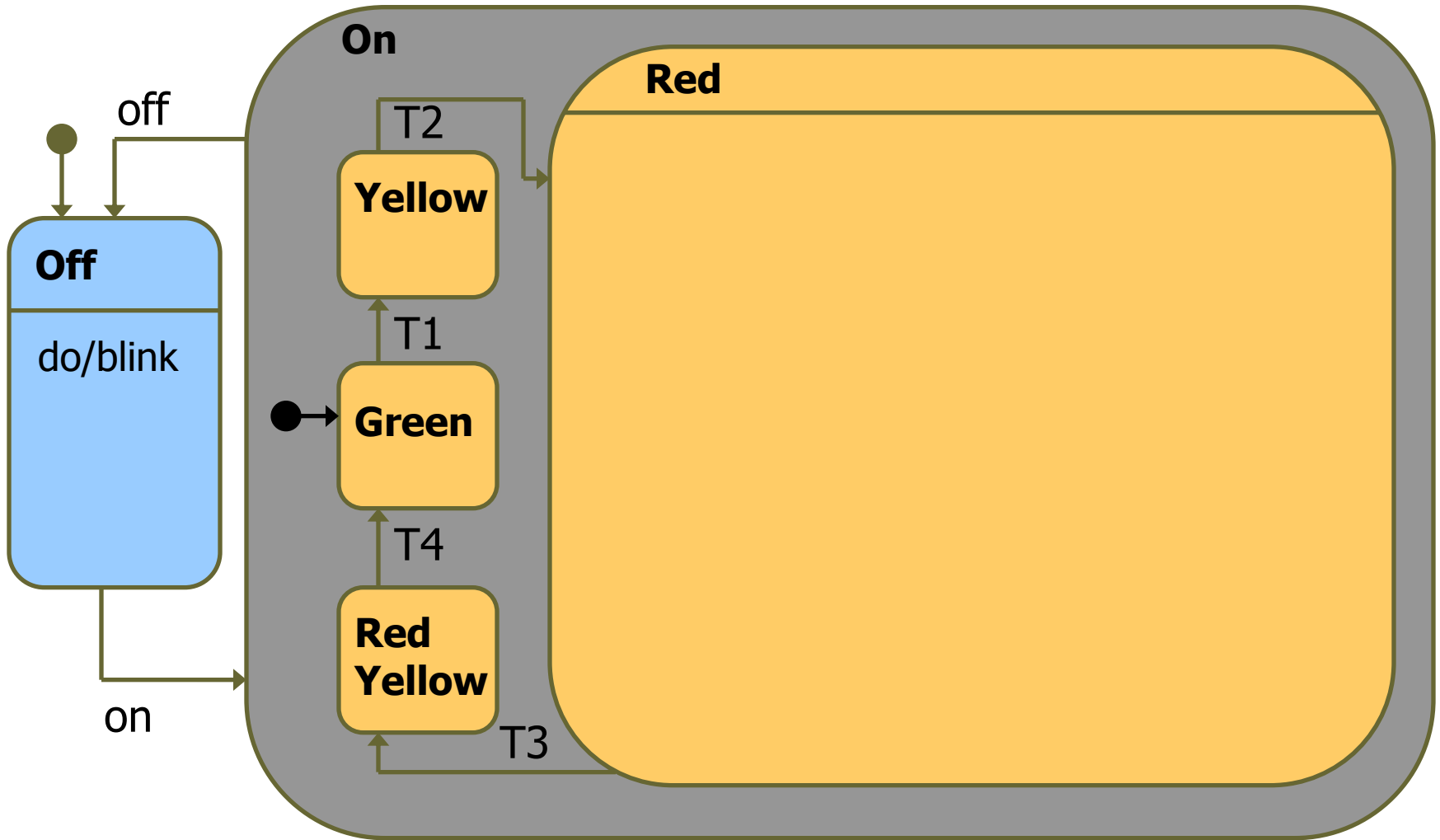
Modellezési mintapélda

- Közlekedési lámpa vezérlője egy főútvonal és egy mellékútvonal kereszteződésében
 - Bekapcsoláskor: kezdetben főútvonal számára zöld
 - Kikapcsoláskor: villogó sárga
 - Zöld, sárga, piros váltás: időzítő eseményre
 - Főútvonalon 3 várakozó: időzítőtől függetlenül zöld jelzés szükséges
 - Főútvonalon tilosban áthajtók: fényképezés
 - Ez a funkció kézzel ki-be kapcsolható

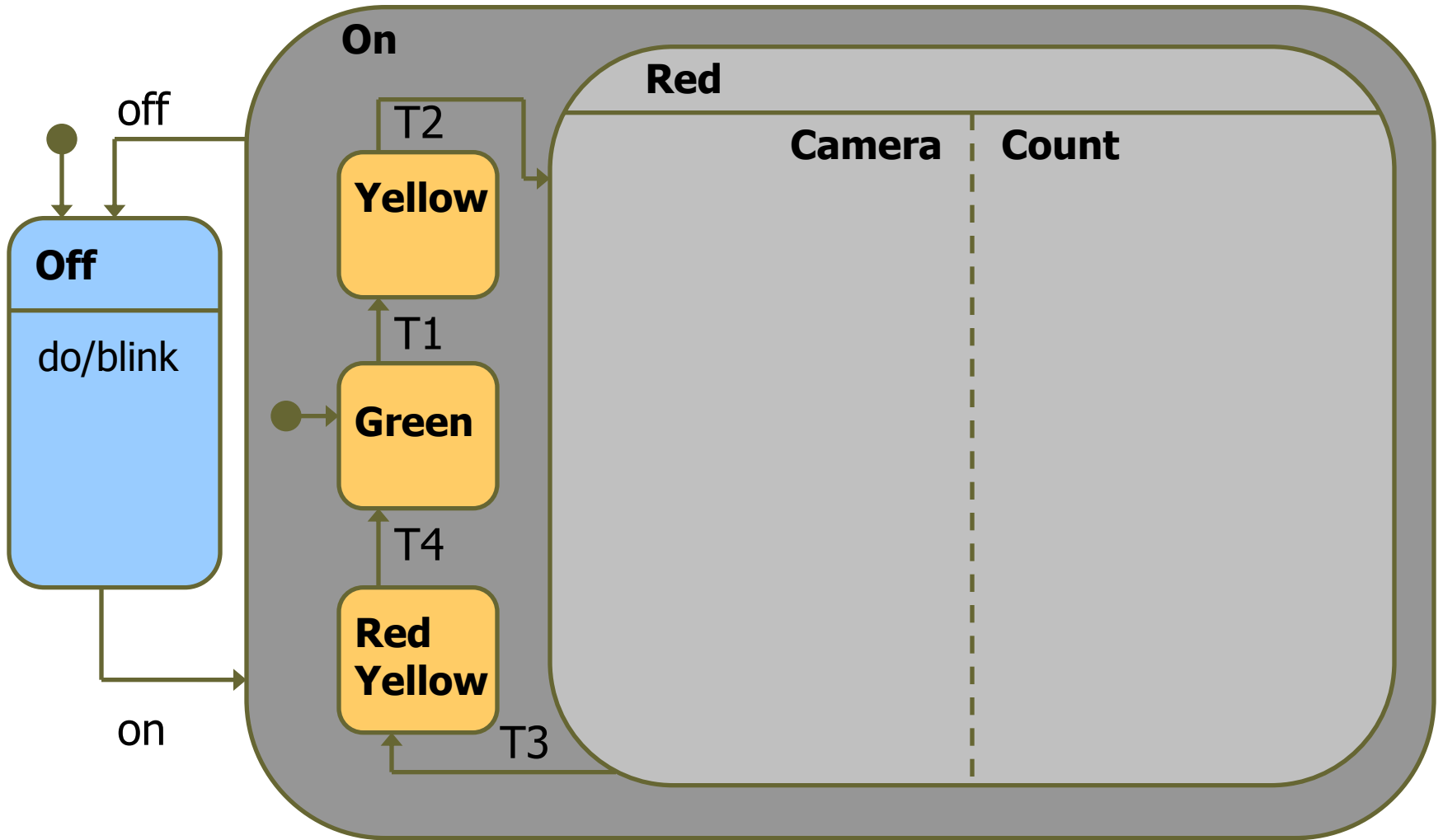
1. Lámpaváltás



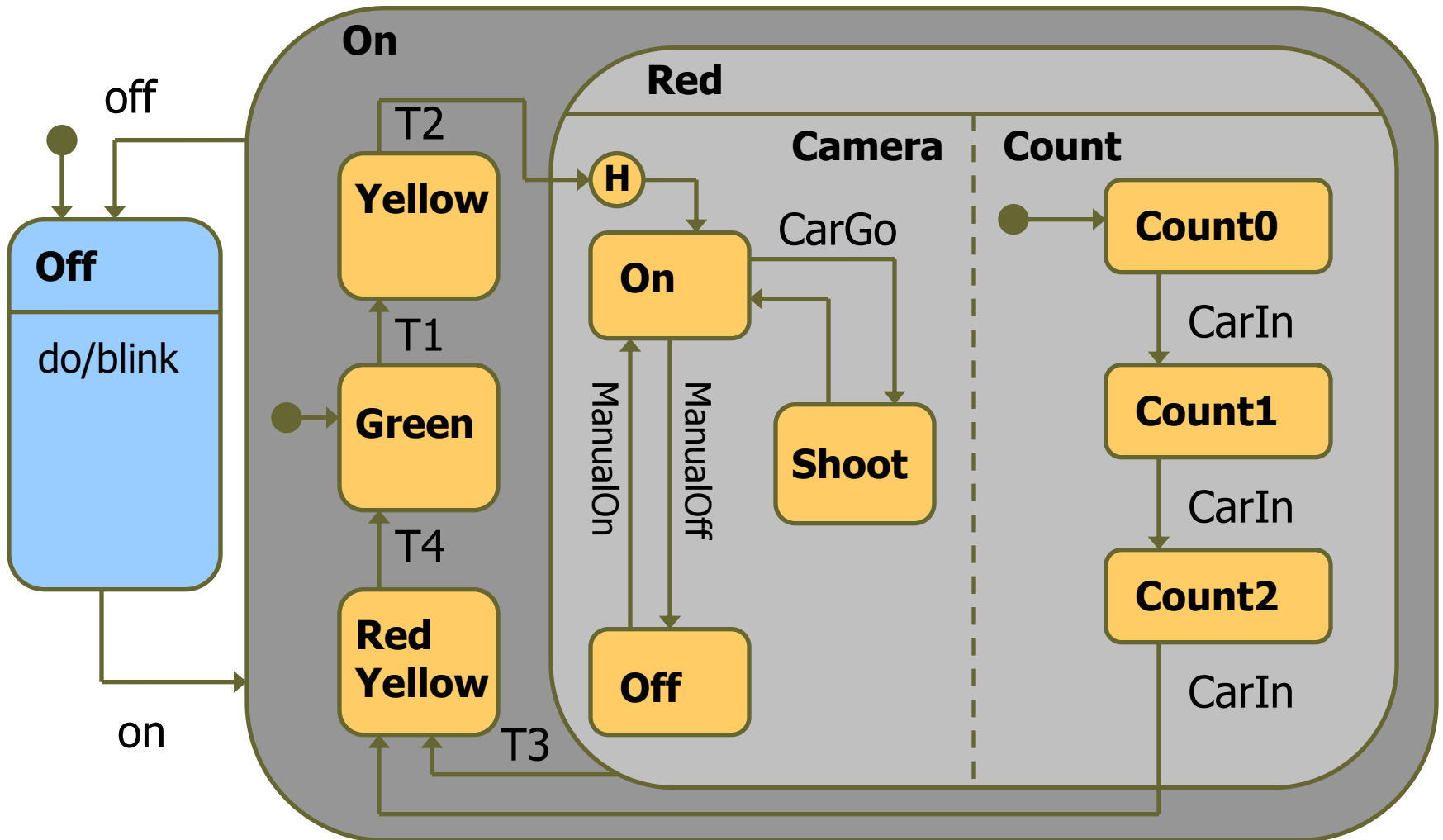
2. Állapothierarchia



3. Konkurens állapotok



4. Teljes vezérlő



Állapottérképek szerepe az UML 2 esetén

- **Állapot alapú, eseményvezérelt működés leírása**
 - Aktív objektumok viselkedésének leírása
- **Felhasználás:**
 - Viselkedés szintű kódgenerálás
 - Viselkedés verifikációja
- **Akciók formalizálása: UML 2 Action Semantics**
 - Metódushívás
 - Attribútum olvasás, írás
 - ... (sokféle művelet)
 - Színezett Petri-hálókhöz hasonlító alapelvek (ld. később)

Állapottérképek alapjai (összefoglalás)

- Kiterjesztések
- Állapottérkép szintaxis
 - Állapothierarchia, konkurens régiók, emlékező állapotok
 - Összetett átmenetek
- Állapottérkép (nem formális) szemantika
 - Átmenetek engedélyezettsége
 - Tüzelő átmenetek kiválasztása
 - Átmenetek tüzelése
 - Új állapotkonfiguráció kialakulása
- Állapottérkép eszközök
 - UML 2 támogató eszközök
 - Yakindu Statechart Tools (statecharts.org)
 - Quantum Programming (state-machine.com)

Mit kezdhetünk az állapottérképekkel?

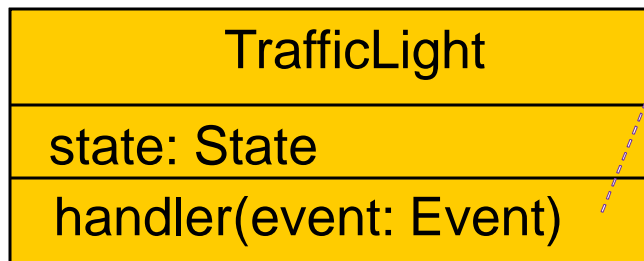
- Forráskód generálása
 - Több megvalósítási minta
- Modellellenőrzés
 - PLTL „testreszabható” állapottérkép modellekre
 - Alsóbb szintű modellre való leképzéssel is ellenőrizhető
- Tesztek generálása
 - Modellellenőrzővel megvalósítható (ld. korábban)
- Futási idejű verifikáció: Monitorkód generálása
 - Állapottérkép mint referencia
(helyes vezérlési folyamat megadása az ellenőrzéshez)

Forráskód szintézis állapotterkép specifikáció alapján

Megvalósítási minták

- Cél:
 - Vezérlési struktúra szintézise
 - Akciók részletezése: Akció nyelv szükséges
- Többféle megvalósítási minta
 - Kettős elágazás
 - State, Hierarchical State Machine
 - Extended Hierarchical Automata
- Különbségek
 - Állapottérkép elemkészlet támogatása
 - Memóriafooglalás
 - Sebesség (eseményfeldolgozás, vezérlési struktúra)

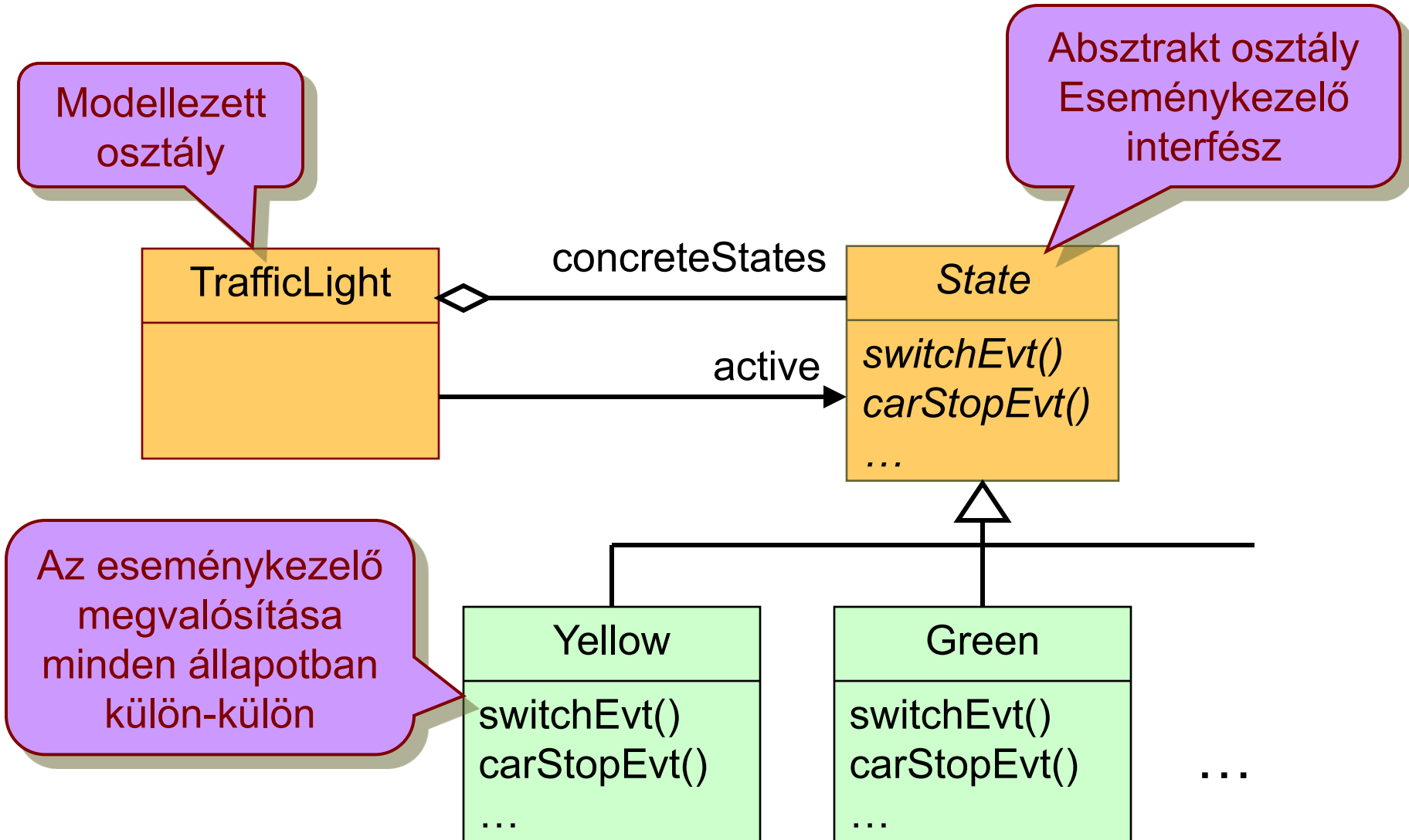
„Kettős elágazás” megvalósítási minta



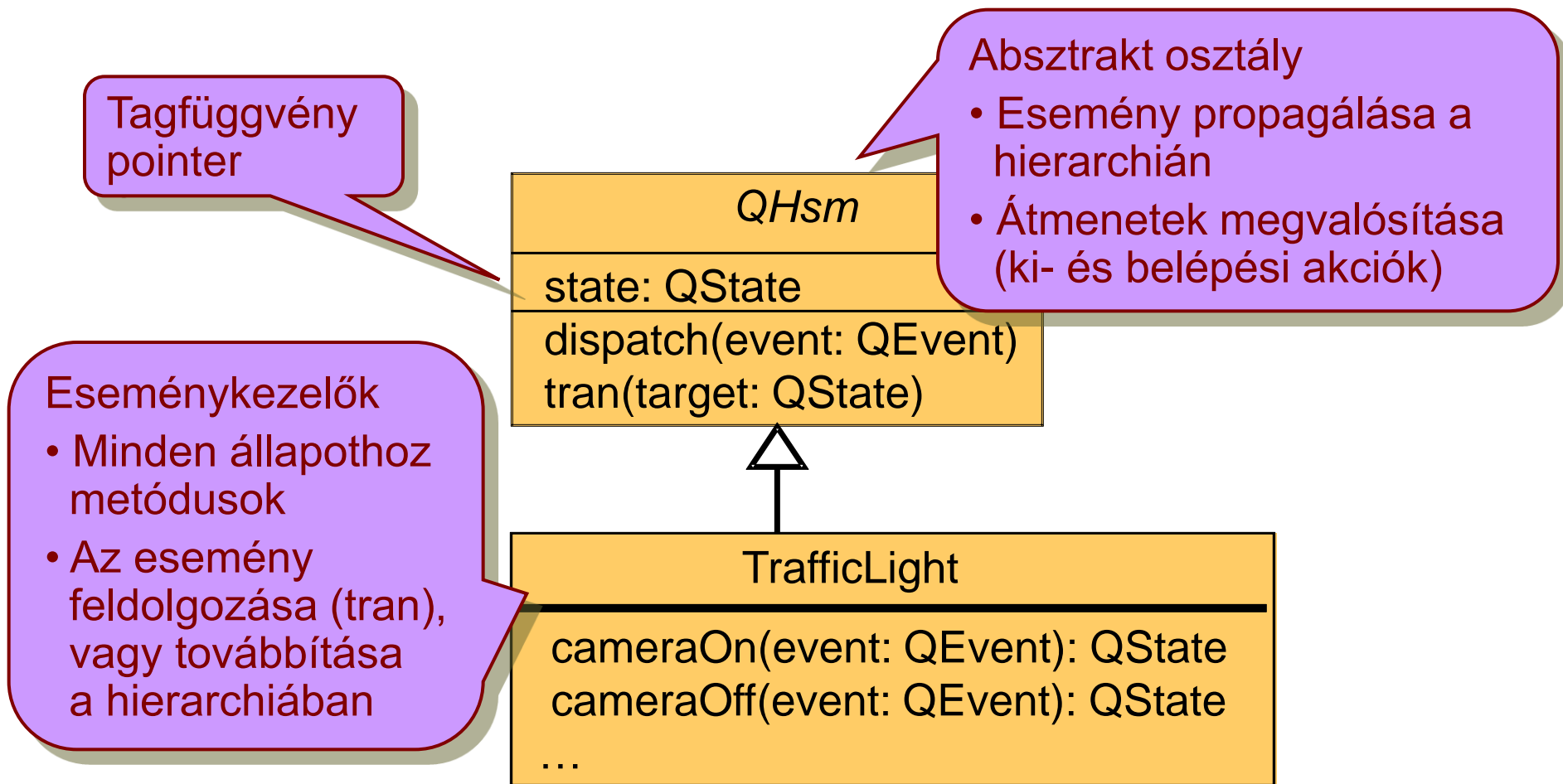
```
switch (state) {  
  case GREEN:  
    switch (event) {  
      case tGreen:  
        /* Yellow - entry */  
        state = YELLOW;  
        break;  
      ...  
    }  
    ...  
}
```

- Egyszerű és hatékony
- Állapothierarchiát és konkurens viselkedést nem támogat

A „State” megvalósítási minta (Gamma, 1994)

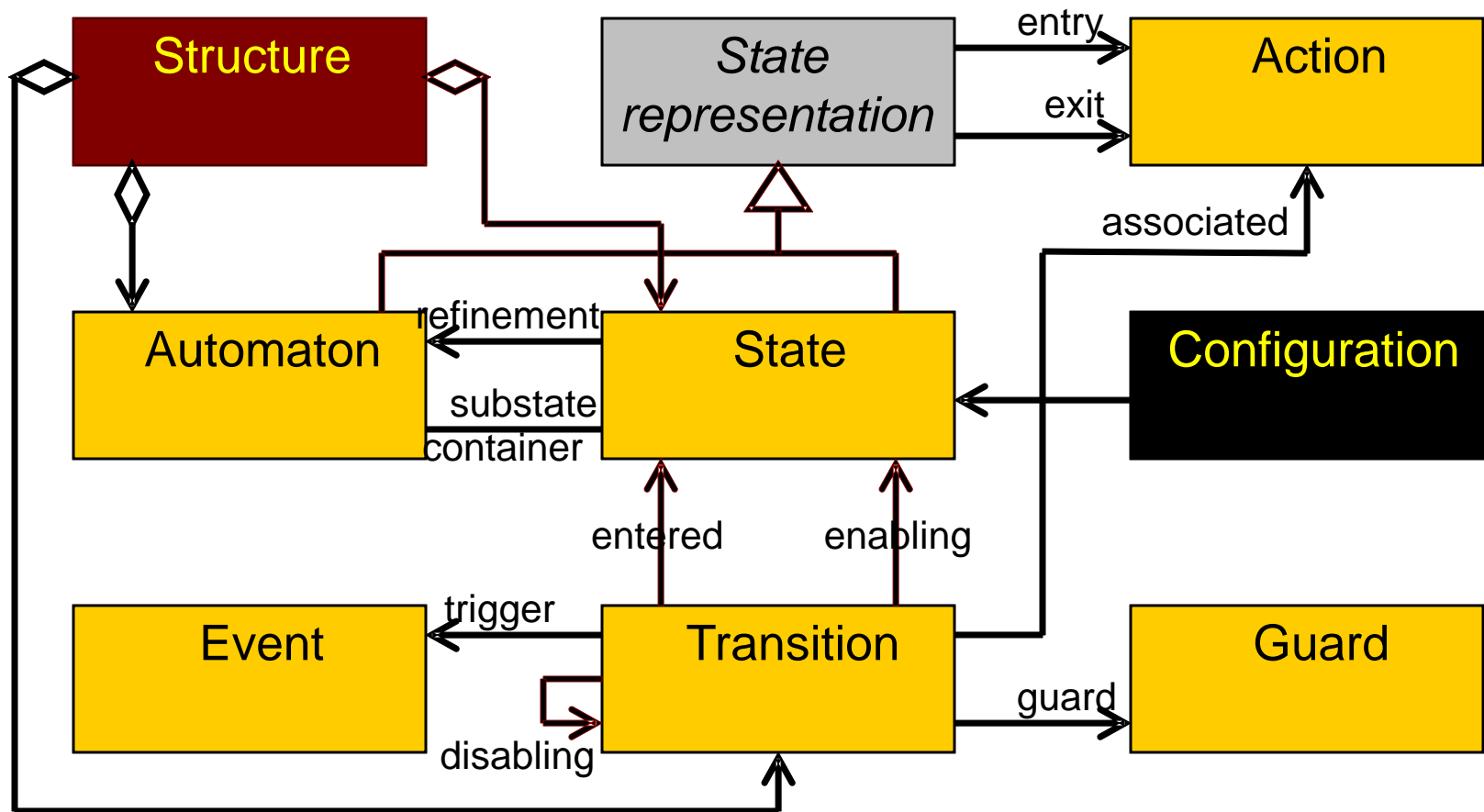


„Hierarchikus állapotgép” minta (Samek, 2002)



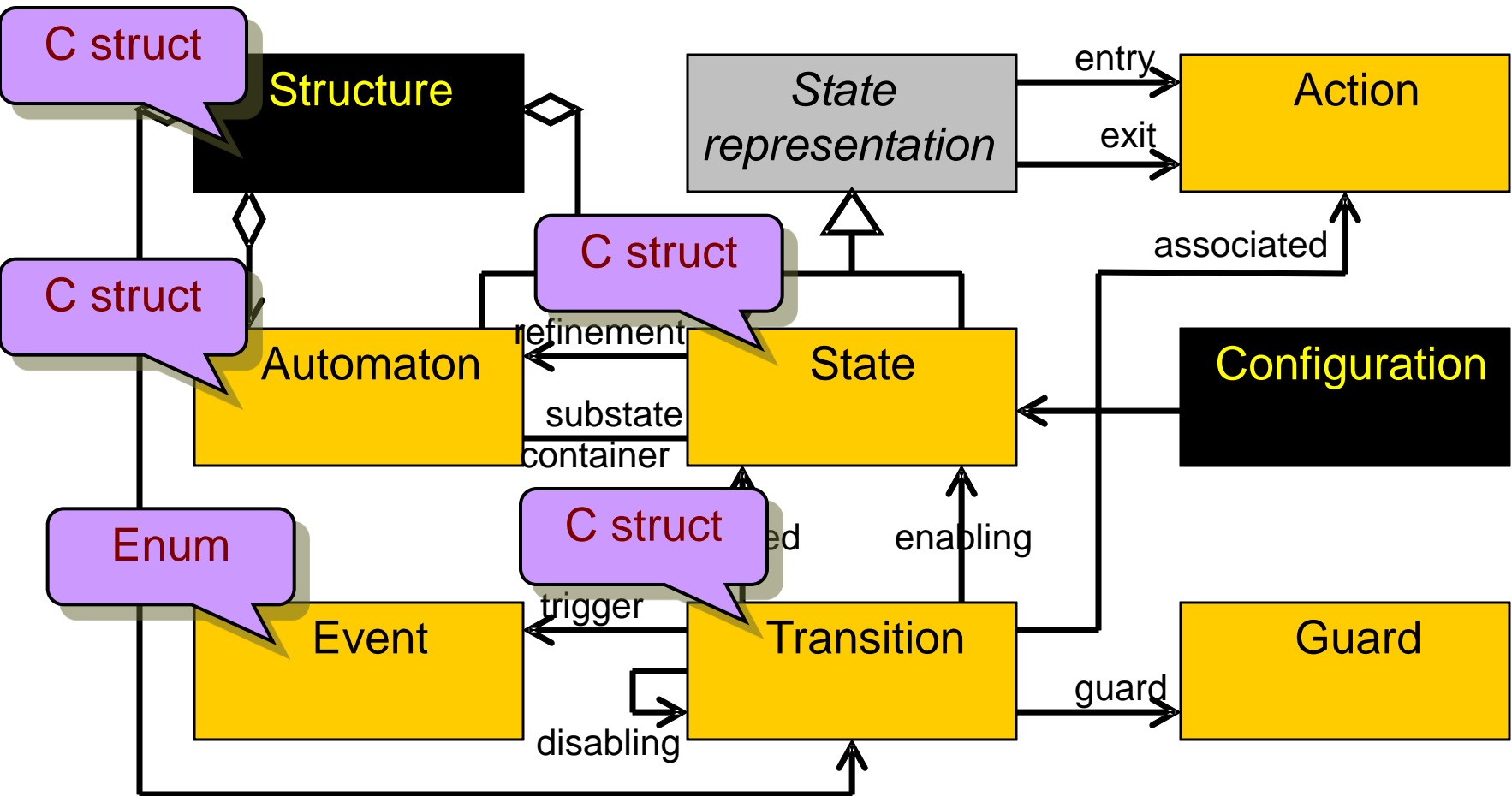
- OR jellegű finomítást támogat
- Konkurens viselkedést nem támogat

„Kiterjesztett hierarchikus automata” minta



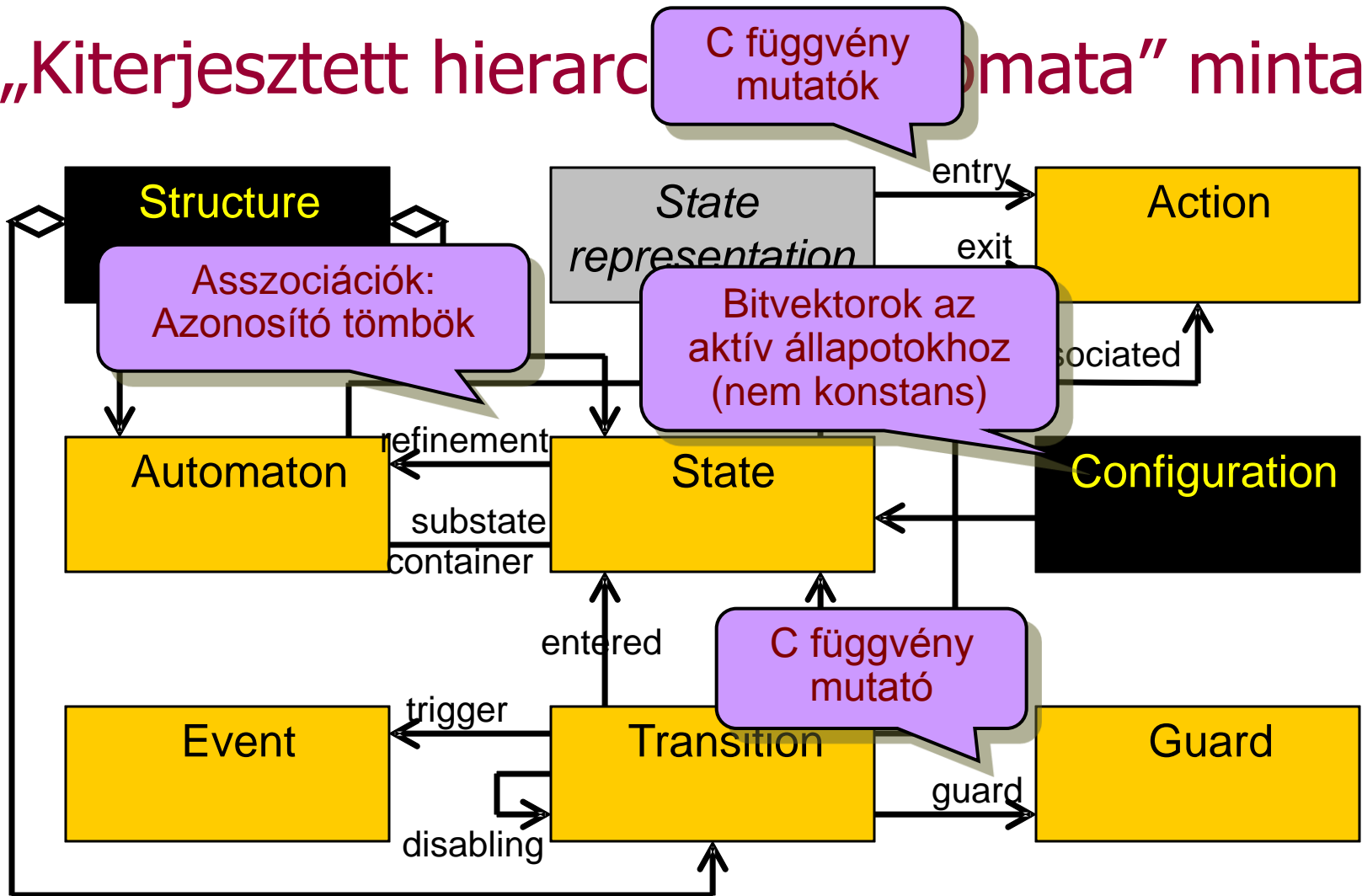
- A statikus struktúra a hierarchikus automata metamodelje alapján
 - <<ordered>> asszociációk (sorrend kötött a modell alapján)
 - Pl. belépési sorrend, akció sorrend, ...
- Konfiguráció: aktív állapotok kijelölése

„Kiterjesztett hierarchikus automata” minta



- Megvalósítás ANSI C-ben:
 - C struktúrák

„Kiterjesztett hierarchia” mintája



- Megvalósítás ANSI C-ben:
 - Függvény mutatók
 - Azonosító tömbök

„Kiterjesztett hierarchikus automata” megvalósítása

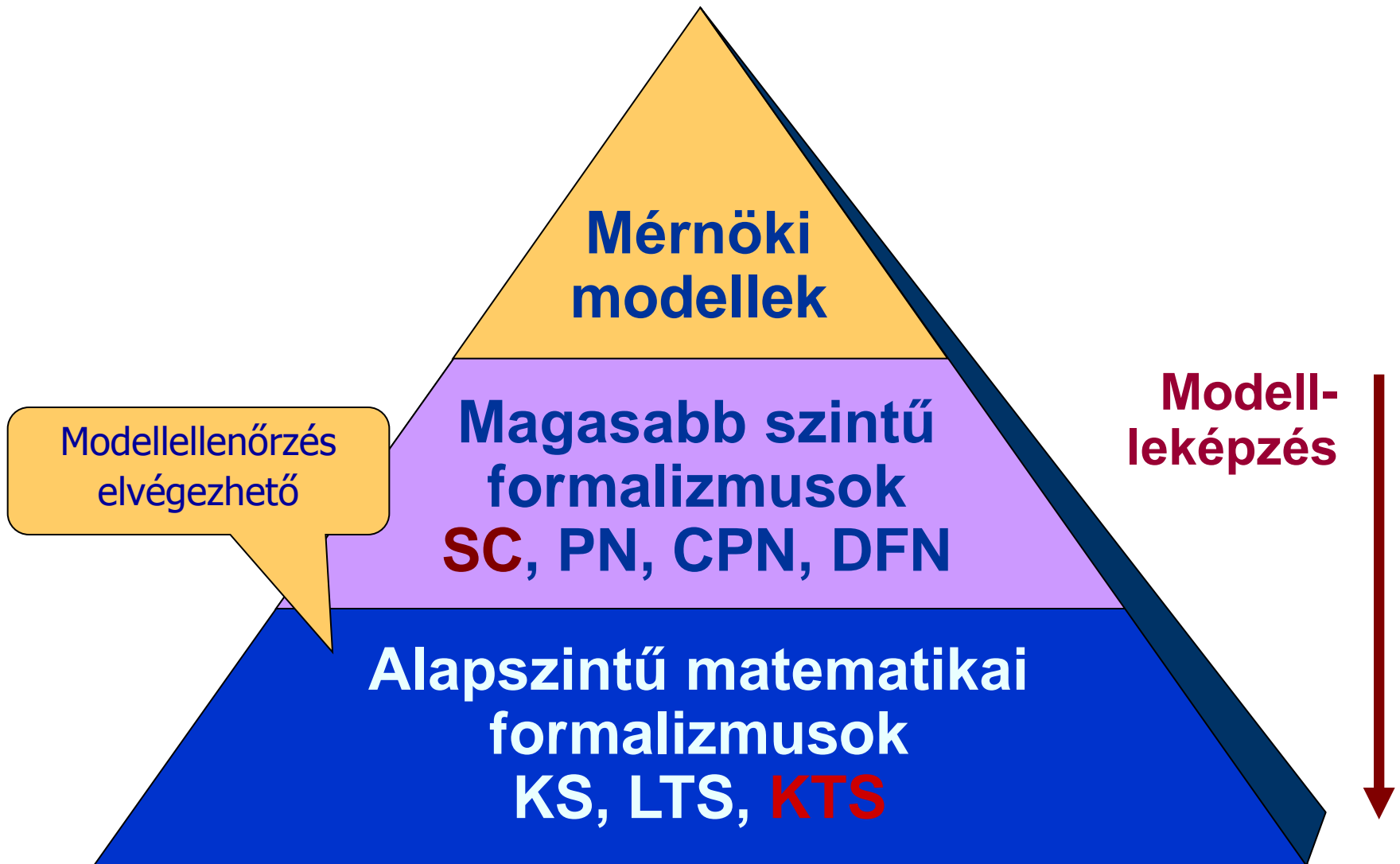
- Közös „interpreter” funkció
 - Formális szemantikán alapul
 - Állapot belépés: előre kiszámolva
 - Állapot kilépés: rekurzív függvényrel
 - Paraméterek:
 - Statikus struktúra: osztályonként egy
 - Konfiguráció: példányonként egy-egy
 - Feldolgozandó esemény
 - Visszatérési érték: Új állapotkonfiguráció
- Statikus struktúra (TrafficLight)
 - Állapotok azonosítóval hivatkozhatók pointer helyett; méret csökkenthető

Összefoglaló

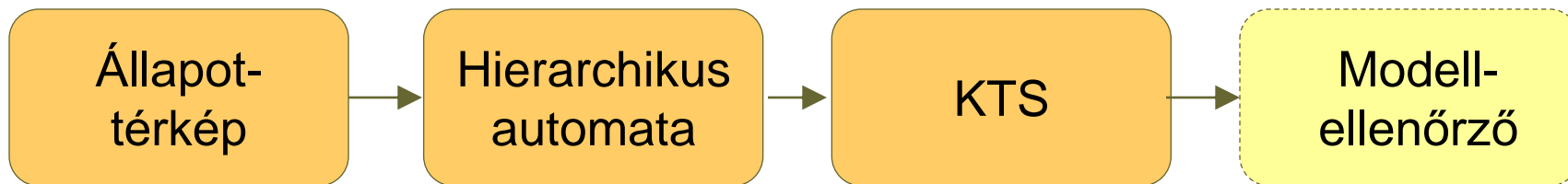
- Néhány kódgenerálási lehetőség állapotterkép modellek alapján
 - Kettős elágazás
 - „State” megvalósítási minta
 - „Hierarchikus állapotgép” (HSM) minta
 - „Kiterjesztett hierarchikus automata” (EHA) minta
- A modellelemek megvalósítása C-ben

Állapottérképek egy formális szemantikája:
Leképezés KTS-re
hierarchikus automatákon keresztül
(kiegészítő anyag)

Modellek a formális ellenőrzéshez



Szemantika hozzárendelés leképezéssel

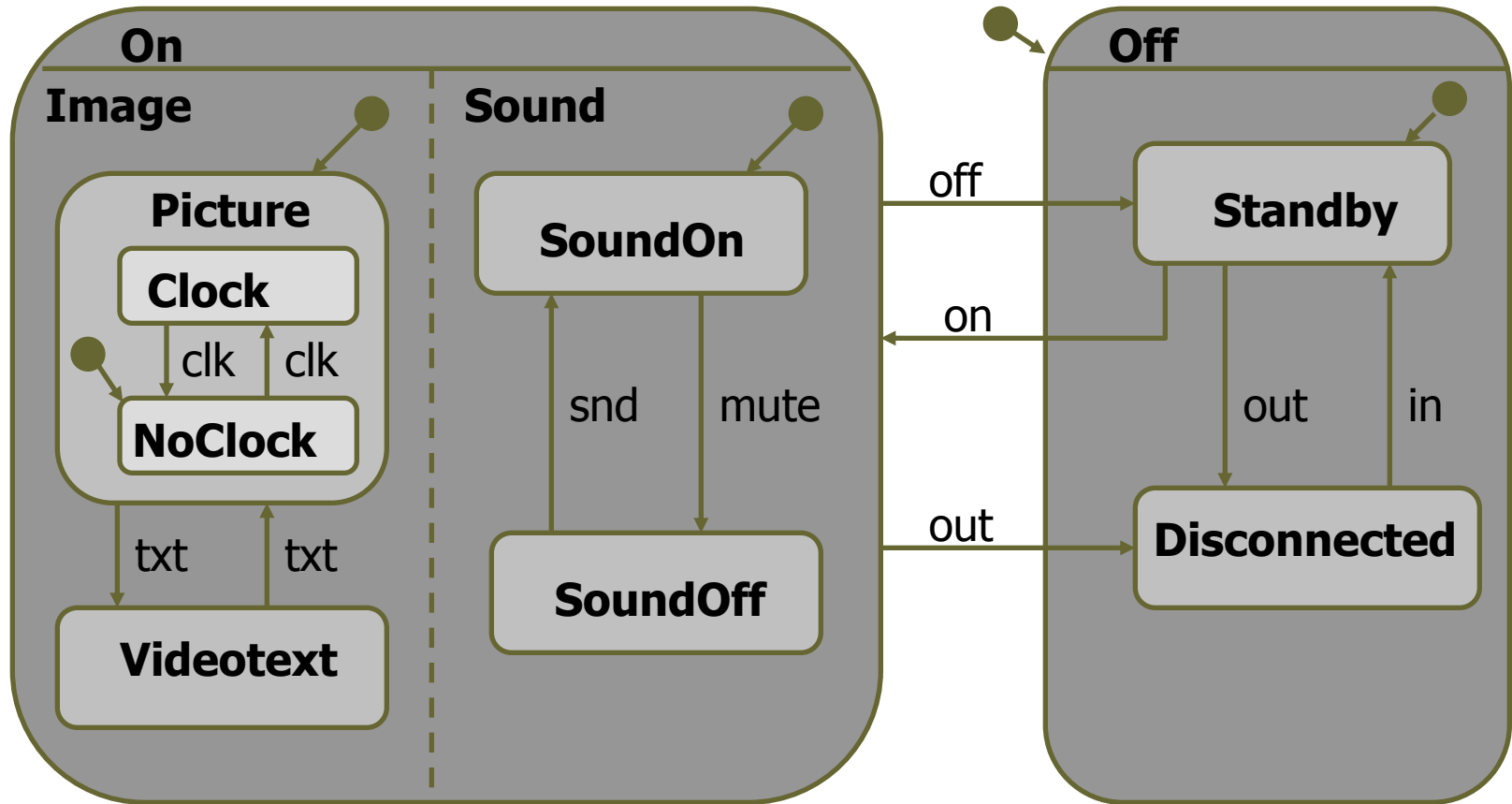


- **Hierarchikus automata:**
 - Absztrakt szintaxis az UML állapottérképekhez
 - Szintaktikai transzformáció
- **Kripke tranzíciós rendszer**
 - UML állapottérkép formális szemantikája
 - Formális verifikációra alkalmas formalizmus
- **Modellellenőrzés**
 - A formális szemantika egy felhasználása

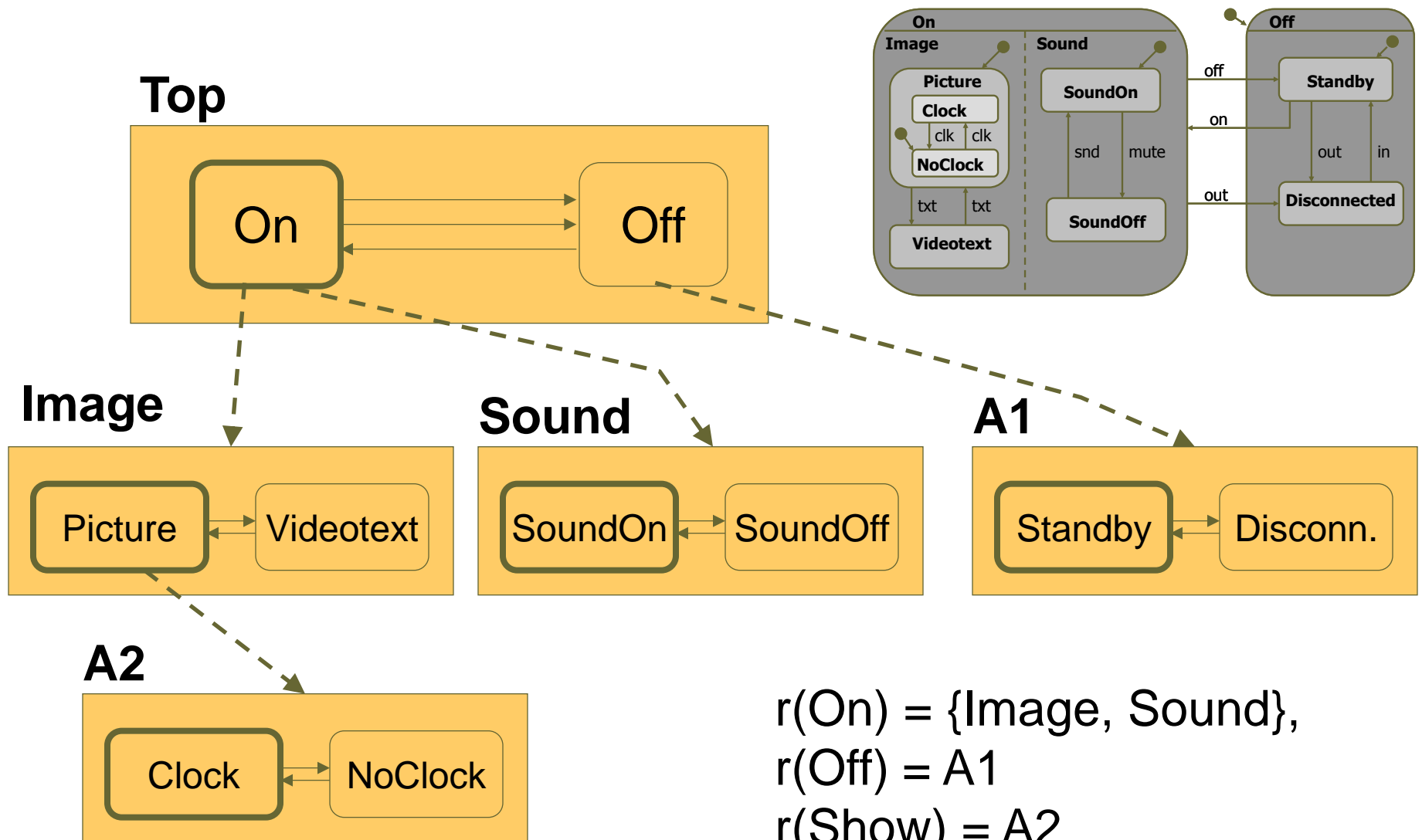
Hierarchikus automata

- Szekvenciális automata: $A = (S, \text{Act}, T)$
 - S állapotok halmaza, $s_0 \in S$ kezdőállapot
 - Act az állapotátmenetek címkéi (trigger, akció, ...)
 - T az állapotátmenetek $T \subseteq S \times \text{Act} \times S$
- Hierarchikus automata: $HA = (F, E, r, B)$
 - F szekvenciális automaták halmaza
 - E események halmaza
 - r finomítási reláció
 - B címkék halmaza

Példa: TV hierarchikus állapottérkép



Példa: TV hierarchikus automata



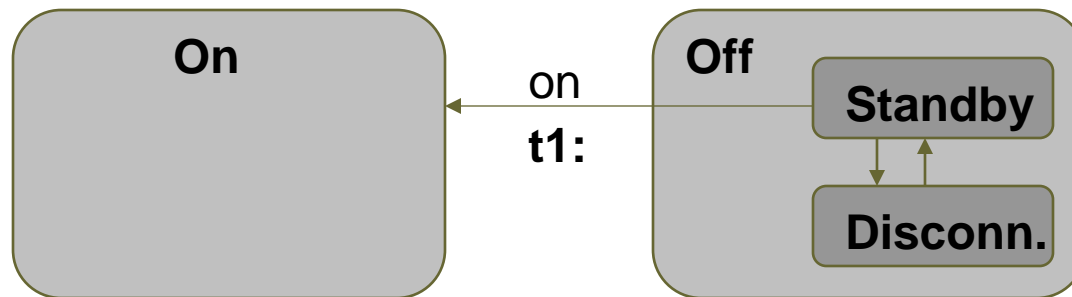
$r(\text{On}) = \{\text{Image}, \text{Sound}\},$
 $r(\text{Off}) = \text{A1}$
 $r(\text{Show}) = \text{A2}$

A hierarchikus automata átmeneteinek címkéi

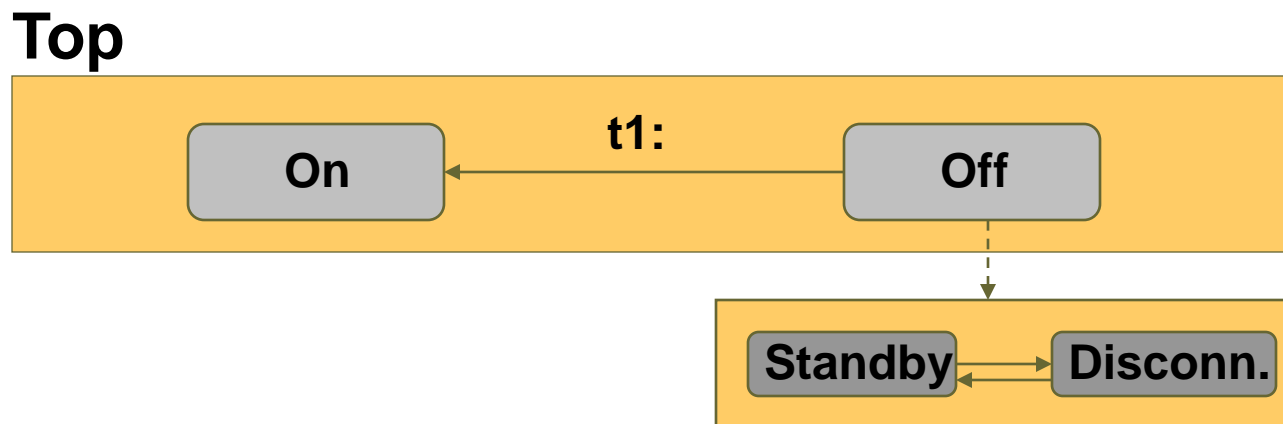
- Az állapottérkép hierarchián átívelő átmenetei:
Legkisebb közös ős szintjére vannak hozva
 - Forrás állapotok (amiket elhagy) befoglalva
 - Cél állapotok (ahová belép) befoglalvaÍgy látszik, mit kell elhagyni és hová kell belépni
Konfliktusok explicit megjelennek
- HA átmenet címkéjének elemei:
 - Eredeti forrás állapot (mélyebben lehet): $SR(t)$
 - Eredeti cél állapot (mélyebben lehet): $TD(t)$
 - Trigger esemény: $TG(t)$
 - Akciók: $AC(t)$
 - Örfeltétel: $GD(t)$

Példa: HA átmenetek címkéi

Állapottérkép
részlet:



HA
részlet:



t1 címkéje: (eredeti forrás, cél, trigger, akció, őrfeltétel)

$(\{\text{Standby}\}, \emptyset, \text{on}, \emptyset, \emptyset)$

$\text{SR}(t) = \{\text{Standby}\}$

Állapot-hierarchia és prioritás

- Konfliktusok meghatározása:
 - HA modellben az átmenet forrásának jelölése: $SRC(t)$
 - t_1 és t_2 átmenetek konfliktusban vannak, ha a finomítási hierarchiában (fában) azonos út mentén vannak, azaz $SRC(t_1) = SRC(t_2)$ vagy $SRC(t_1) \in r^*(SRC(t_2))$ vagy $SRC(t_2) \in r^*(SRC(t_1))$ itt r^* reláció kiterjesztett az alatta lévő teljes hierarchiára
- Állapotátmenetek prioritása:
 - A mélyebben lévő $SR(t)$ lehet a meghatározó
 - Ha nincs $SR(t)$ akkor $SRC(t)$, egyébként $SR(t)$ határozza meg:
$$\{s \mid s \in SRC(t) \text{ ha } SR(t)=0\} \cup SR(t)$$

Prioritás kezelése

- Egy állapotátmenet tüzelésének feltétele:
 - Nincs nagyobb prioritású engedélyezett átmenet a többi szekvenciális automatában
- HA hierarchia alsóbb szintjein:
 - Nagyobb prioritású átmenetek vannak
- HA hierarchia felsőbb szintjein:
SR miatt lehet nagyobb prioritású átmenet!
 - Bevezetett jelölés: $A \uparrow P$,
 P a „felülről származó”, de nagyobb prioritású engedélyezett átmenetek halmaza,
mint **kényszer** az A automata tüzelésekor

A környezet modellezése

Lehetőségek:

- **Zárt rendszer:**
 - A környezetet is modellezzük
 - Csak állapotgép(ek) állít(anak) elő új eseményeket
- **Nyitott rendszer:**
 - A környezetet nem modellezzük
 - Érkeznek „külső” események, amiknek a forrása nincs a modellben

Továbbiakban:

- Zárt rendszerrel foglalkozunk
- Adatkezeléstől eltekintünk (csak események)
- Emlékező állapotok nincsenek

Szemantika: Kripke tranzíciós rendszer

KTS = (S, \rightarrow , L) és Act

- S állapotok halmaza: (C,Q)
 - C: állapotkonfigurációk („top” HA-tól indulva lefelé)
 - Q: eseménysor állapotok
 - s0 kezdőállapot: (C0, Q0)
kezdő állapotkonfiguráció és eseménysor
- L állapot címkézés:
 - C állapotkonfigurációkhoz összegyűjtve
- \rightarrow átmenet reláció (lépés): (C,Q) \rightarrow (C',Q')
 - (1) $Q'' = \text{remove}(e, Q)$
 - (2)
$$\frac{\text{Top} \uparrow \emptyset :: (C, \{e\}) \rightarrow^T (C', Q')}{(C, Q) \rightarrow (C', \text{join}(Q', Q''))}$$

Szabálykészlet

- Kripke-struktúra \rightarrow relációjának megadása:
HA \rightarrow^T relációja segítségével történt
 - T-ben lévő átmenetek tüzelnek a HA-ban
 - Mely átmenetek lesznek T-ben?
- HA \rightarrow^T relációjának megadása:
A szekvenciális automaták tüzelése 3 szabály szerint történhet:
 - Lépés („progress”)
 - Kompozíció („composition”)
 - Henyélés („stuttering”)

1. A lépés szabálya

- Egy $A \uparrow P$ automata t átmenete lokálisan tüzel
- Feltételek:
 - A t átmenet az automatában engedélyezett: $SR(t)$, $SRC(t)$ az aktuális konfiguráció része
 - Nincs sem az $SRC(t)$ alatt lévő HA-kban, sem P -ben (a felső szintű automatákban) nagyobb prioritású engedélyezett átmenet
- Következmény: $A \uparrow P :: (C, \{e\}) \rightarrow^T (C', Q')$
 - T tüzelő átmenetek: $T = \{t\}$
 - C' új konfiguráció: t és $TD(t)$ határozza meg
 - Q' új események: $AC(t)$

2. A kompozíció szabálya

- Egy $A \uparrow P$ automata nem tüzel, hanem „összefogja” az alacsonyabb szintű automaták tüzeléseit
- Feltételek:
 - Az alatta lévő A_i HA-k tüzelnek:
 $A_i \uparrow P' :: (C, \{e\}) \rightarrow^{T_i} (C_i', Q_i')$
 - Vagy ha $\cup T_i = \emptyset$, akkor lokálisan sem tüzel (P miatt)
- Következmények:
 - Tüzelő átmenetek: $T = \cup_j T_j$
 - Új konfiguráció: $\{s\} \cup_j C_j'$ (s az eredeti állapot)
 - Új eseménysor: $\text{join_all}_j (Q_j')$

3. A henyélés szabálya

- Egy $A \uparrow P$ automata nem tüzel, állapota nem változik
- Feltételek:
 - Minden lokálisan engedélyezett átmenetnél van nagyobb prioritású P -ben, vagy
 - Nincs alsóbb szintű automata, amit összefoghat
- Következmények:
 - Tüzelő átmenetek: $T = \emptyset$
 - Új állapot: marad a régi...
 - Új eseménysor: nincs új generált esemény

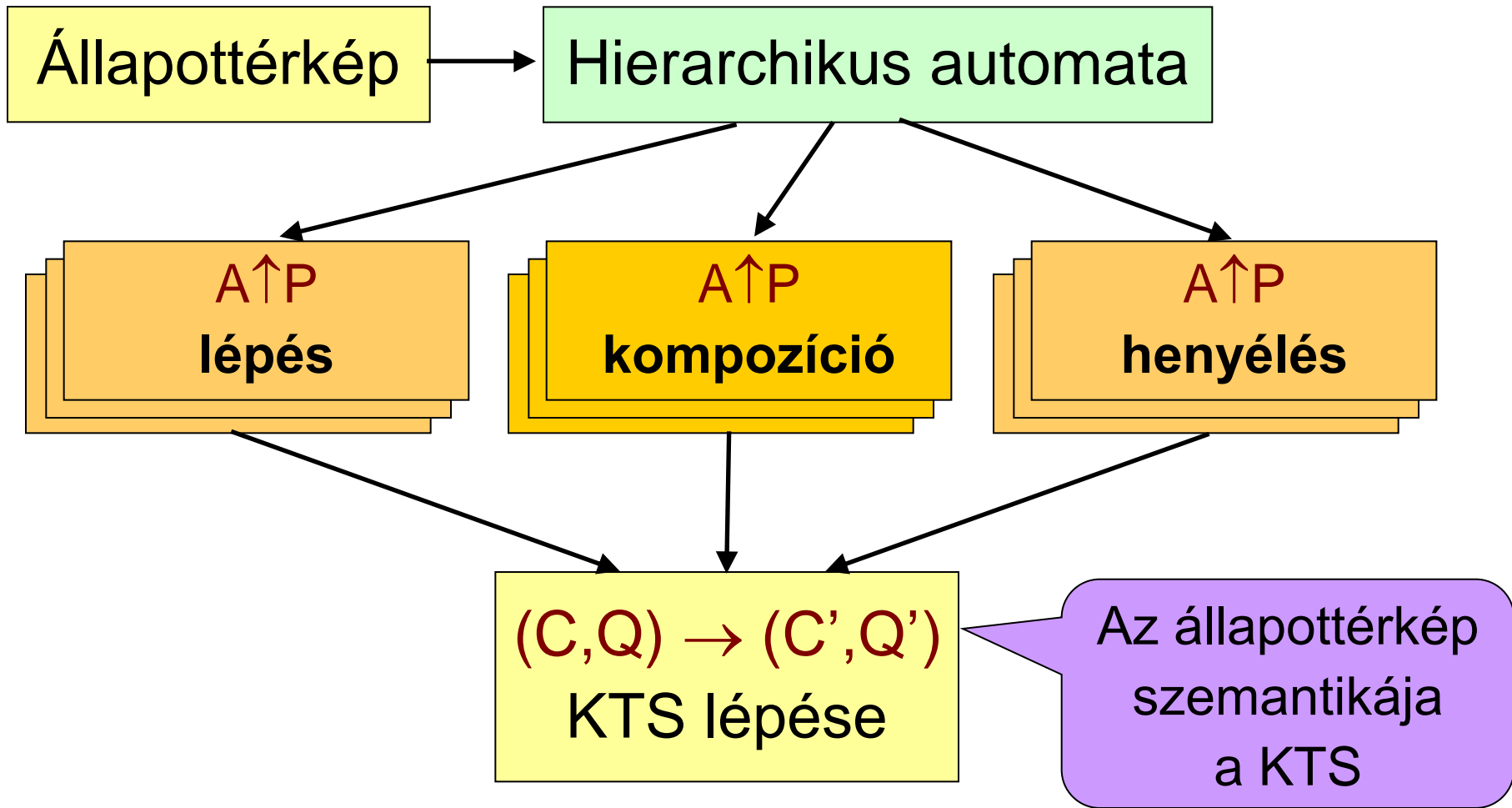
Szabályok használata

Rekurzív jellegű feltételek:

- Kompozíció szabálya
- Egy adott automata tüzelése függ
 - Hierarchiában alatta elhelyezkedő HA-któl: van-e engedélyezett átmenetük
 - Hierarchiában fölötte elhelyezkedő HA-któl; **P** mint "felülről származó" kényszer (ld. kompozíció)

Minden átmenet tüzel, amire van érvényes szabály

A szabályok áttekintése



KTS: $((C,Q) \rightarrow, L)$