

# HERAKLIT-Fallstudie: 8-Sekunden-Hölle

Peter Fettke<sup>1,2</sup>[0000–0002–0624–4431] und Wolfgang Reisig<sup>3</sup>[0000–0002–7026–2810]

<sup>1</sup> Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Saarbrücken,  
Deutschland

`peter.fettke@dfki.de`

<sup>2</sup> Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

<sup>3</sup> Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Deutschland

`reisig@informatik.hu-berlin.de`

**Zusammenfassung.** HERAKLIT dient zur Modellierung großer, rechnerintegrierter betrieblicher Systeme. In dieser Fallstudie werden wesentliche Modellierungskonzepte anhand der 8-Sekundenhölle illustriert. Die 8-Sekundenhölle beschreibt plakativ die Situation im Motorsport, bei der ein Fahrzeug kurzfristig in der Box gestoppt wird, um beispielsweise die Reifen zu wechseln oder es aufzutanken. Dieser erste Teil der Fallstudie widmet sich der Modellierung des Systems. Regelmäßig verfolgt die Modellierung keinen Selbstzweck, sondern ist Ausgangspunkt der Optimierung des modellierten Systems. Die dabei entstehenden Herausforderungen sind Gegenstand des zweiten Teils der Fallstudie.

## 1 Das zu modellierende System

Ein Boxenstopp ist ein Ausdruck aus dem Motorsport. Ein solcher Stopp des Fahrzeugs im Rennen ist häufig notwendig, um beispielsweise das Fahrzeug in der Box aufzutanken, die Reifen zu wechseln, Fahrzeugeinstellungen zu korrigieren, kleine Reparaturen oder Säuberungen vorzunehmen. Die genauen Möglichkeiten, was bei einem solchen Boxensport erlaubt oder verboten ist, legt das Regelwerk der jeweiligen Motorsportart fest. Die Boxen der an einem Rennen teilnehmenden Mannschaften sind typischerweise in einer Boxengasse angeordnet, die parallel zur Start- und Zielgraden einer Rennstrecke verläuft. In unmittelbarer Nähe der Box befindet sich typischerweise auch eine Garage, in der die Autos für das Rennen vorbereitet werden und in der sich die Mechaniker während dem Rennen aufhalten. Falls der Fahrer beim Boxenstopp nicht gewechselt wird, verbleibt dieser während des Boxenstopps im Wagen. Zeitpunkt, Umfang und Dauer eines Boxenstopps können rennentscheidend sein. Ein kürzerer Boxenstopp führt offensichtlich zu einem Zeitvorteil. Gleichzeitig kann der Boxenstopp aber auch als taktisches Element eingesetzt werden, da neue Reifen bessere Fahreigenschaften versprechen.

---

zu zitieren als: FETTKE, P.; REISIG, W.: HERAKLIT-Fallstudie: 8-Sekunden-Hölle. 2020. – HERAKLIT-Arbeitspapier, v1, 8. November 2020, <http://www.heraklit.org>

Das in Abbildung 1 dargestellte Foto zeigt exemplarisch einen solchen Boxenstopp bei der Formel 1. Deutlich zu erkennen ist die Vielzahl der Teammitglieder, denen alle ganz bestimmte Aufgaben zukommen. So gibt es Mechaniker für den Reifenwechsel, die Signalgebung, den Wagenheber, das Tanken und viele andere. Es ist offensichtlich, dass hierfür eine erhebliche Koordination der Arbeiten notwendig ist, sodass die Situation von jeder Mannschaft intensiv geübt wird. Reale Boxenstopps dauern in der Regel nur wenige Sekunden. Diese extreme Situation und Belastung wird in der Fallstudie plakativ als 8-Sekundenhölle bezeichnet.



Abb.1: Typische Situation beim Boxenstopp, hier: Fernando Alonso und sein Ferrari-Team beim Großen Preis von Italien 2012 (Foto lizenziert unter Creative Commons Attribution 2.0 Generic, <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>, ursprünglich veröffentlicht von Francesco Crippa, <https://www.flickr.com/photos/8791553@N03/7967994338>)

## 2 HERAKLIT-Modelle

Im Folgenden werden verschiedene HERAKLIT-Modelle aufgezeigt, welche das zuvor eingeführte System beschreiben. Dabei wird nicht das Regelwerk einer bestimmten Motorsportart beim Boxenstopp modelliert, sondern typische Aktionen, die bei einem Boxenstopp möglich sind.

2.1 Die Aktionen des Systems

Abbildung 2 zeigt die Struktur des Modells als eine Sequenz dreier abstrakter Module, die das Ankommen an der Box, die Services und das Verlassen der Box beschreiben. Die vier Services (Tanken, Scheibenputzen, Kontrolle und Reifenwechsel) sind voneinander unabhängig. Dabei hat der Reifenwechsel in sich eine vorbereitende und eine nachbereitende Phase. Damit bilden die abstrakten Module aus Abbildung 2 einen Baum mit 11 Blättern.

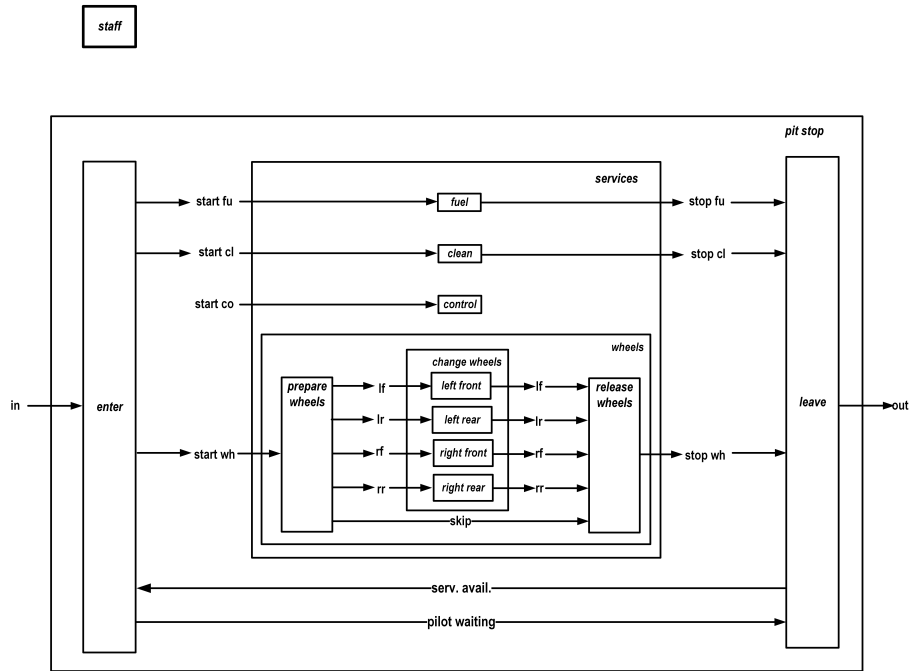


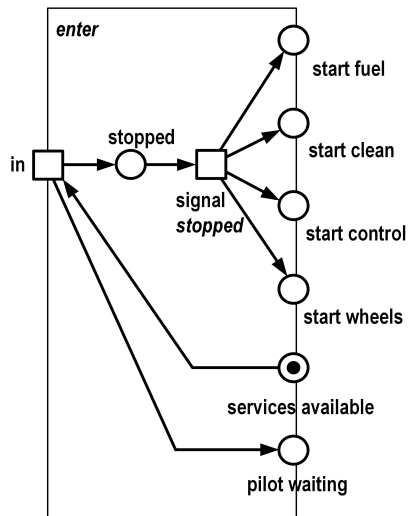
Abb. 2: Systemstruktur

Die Abbildungen 3 bis 10 verfeinern jedes dieser 11 abstrakten Module zu einem ausführbaren Modul. Diese ausführbaren Module sind in Abbildung 11 zu einem großen ausführbaren Modul komponiert. Jede der insgesamt 29 Aktionen des Systems, die wir als elementar ansehen (beispielsweise das Aufbocken für den Radwechsel oder das Abschrauben des rechten Vorderrades) modellieren wir als Transition eines Petrinetzes (in Abbildung 11 gelb markiert).

Im Modell kann höchstens ein Auto zugleich in der Servicebox abgefertigt werden. Bei so einem Boxenstopp können einzelne Services übersprungen werden. Kriterien dafür formulieren wir aber nicht im Einzelnen; vielmehr wird in jedem Ablauf aufs Neue der Service entweder ausgeführt oder übersprungen.

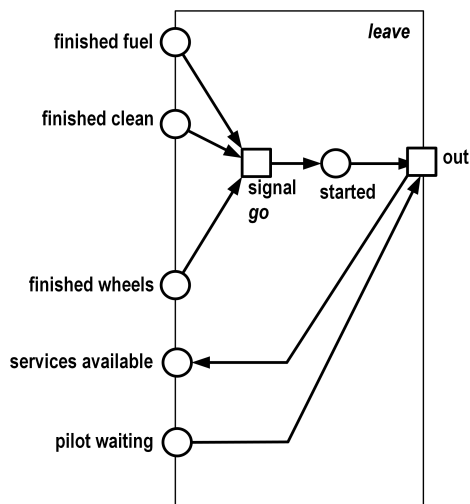
Im Modell in Abbildung 11 geht es ausschließlich um die Synchronisation von Aktionen. Jeder Platz beschreibt eine Bedingung, die in einem aktuell vor-

liegenden Zustand entweder erfüllt oder unerfüllt ist. Technisch formuliert, hat in jedem erreichbaren Zustand jeder Platz entweder keine oder genau eine Marke.



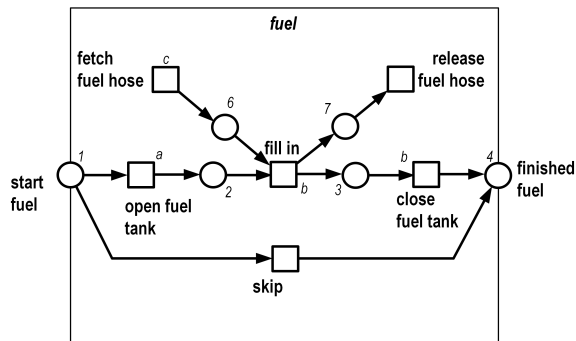
Ein Fahrer kann in die Box fahren, wenn ihm „services available“ signalisiert wird. Sobald das Auto zum Stillstand gekommen ist, erscheint ein allen Mitarbeitern sichtbares Signal als Aufforderung, mit den vier Services **fuel**, **clean**, **control** und **wheels** zu beginnen. Derweilen wartet der Fahrer auf das Ende der Services.

Abb. 3: Einfahrt in die Box



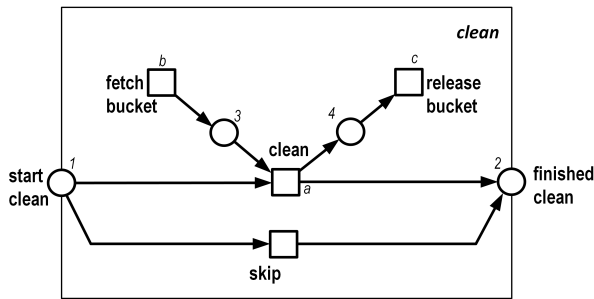
Sobald das Ende von Tanken, Säubern und Reifen wechseln signalisiert wird, erscheint für den Fahrer ein „go“-Signal. Der wartende Fahrer verlässt die Box; sie wird frei für den nächsten Fahrer.

Abb. 4: Ausfahrt aus der Box



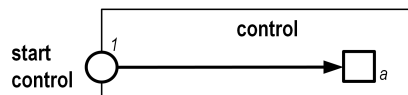
Zunächst besteht die Möglichkeit, bei einem Boxenstop gar nicht zu tanken. Beim Tanken wird der Tankdeckel geöffnet und der Schlauch herangeholt. Nach dem Tanken wird der Tankdeckel geschlossen und der Schlauch zurückgenommen.

Abb. 5: der Service: Betankung



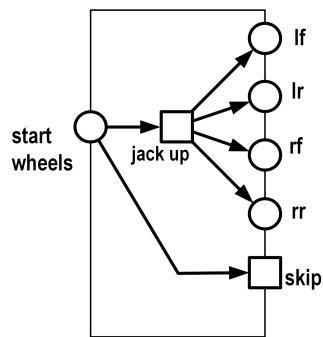
Gegebenenfalls wird die Windschutzscheibe gereinigt.

Abb. 6: der Service: Reinigung



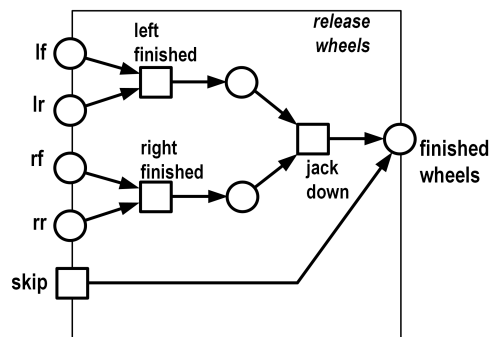
Ohne feste Zielsetzung wird hier ganz allgemein nach kleinen Beschädigungen oder Unregelmäßigkeiten gesucht, so lange das Fahrzeug in der Box steht.

Abb. 7: der Service: Reparatur



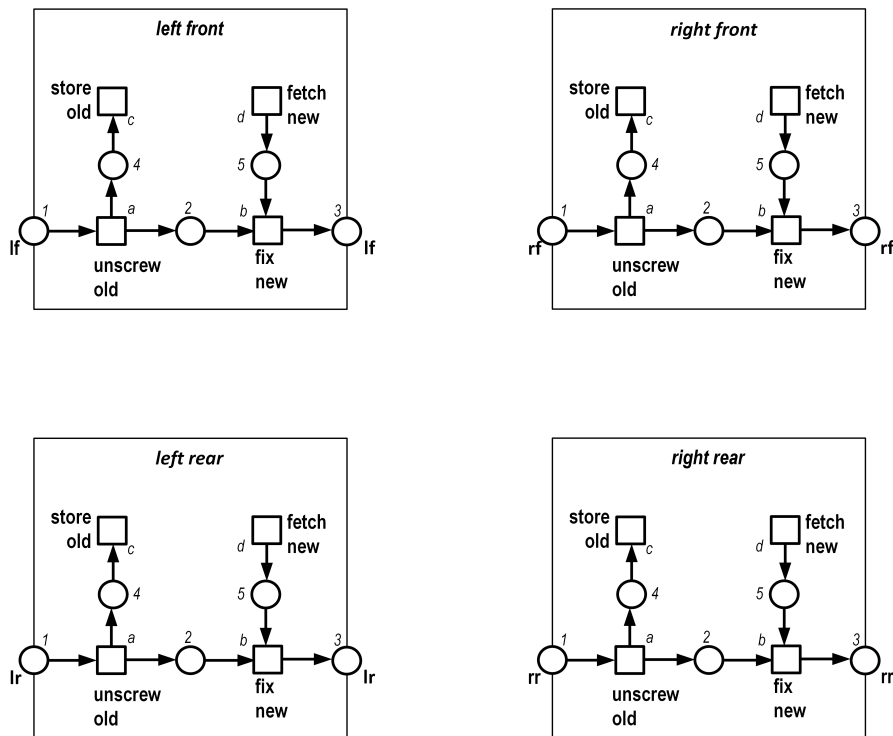
Zunächst besteht die Möglichkeit, bei einem Boxenstop die Reifen nicht zu wechseln. Für den Reifenwechsel wird das Fahrzeug aufgebockt und signalisiert, dass die Reifen gewechselt werden können.

Abb. 8: Vorbereitung des Reifenwechsels



Wer einen Reifen festgeschraubt hat, signalisiert das einem Beobachter der entsprechenden Wagenseite. Die Beobachter beider Seiten signalisieren wiederum, dass der Wagen abgesenkt werden kann.

Abb. 9: Nachbereitung des Reifenwechsels



Der alte Reifen wird abgeschraubt und weggebracht, der neue Reifen wird herangebracht und festgeschraubt.

Abb. 10: Reifenwechsel

## 2.2 Personal als knappe Ressource

In einem realen Autorennen wird bei einem Boxenstopp jede Aktion von einer Person durchgeführt. Dabei kann eine Person durchaus hintereinander mehrere Aktionen erledigen. So bietet es sich an, dass der Wagenheber von einer Person bedient wird, also dieselbe Person „jack up“ und „jack down“ durchführt. Dagegen ist es vielleicht keine gute Idee, wenn dieselbe Person ein Hinterrad abschraubt und dann den Tankschlauch heranschafft. Der signifikante Unterschied zwischen beiden Beispielen: Wie man in Abbildung 11 sieht, sind „jack up“ und „jack down“ hintereinander angeordnet. Eine zweite Person würde den Ablauf nicht beschleunigen. Hingegen sind „unscrew old“ und „fetch fuel hose“ unabhängig voneinander. Die benötigte Zeitdauer beträgt bei einer Person die

Summe der benötigten Zeitdauern für beide Aktionen. Bei zwei Personen ist es lediglich die größere Zeitdauer.

Es gibt nun ganz verschiedene Strategien, Personal für die Aktionen einzusetzen und den Einsatz vorher zu planen. Ein Extremfall wäre für jede Aktion eine eigene Person. Dann bräuchte man also 29 Personen an der Box. Um das zu modellieren, ergänzen wir das Modell aus Abbildung 11: Jede Transition, die eine Aktion darstellt (also in Abbildung 11 die gelb gekennzeichneten Transitionen) wird mit einer Schlinge (Pfeil in beiden Richtungen) mit einem neuen, anfangsmarkierten Platz verbunden (Abbildung 12a). Jeder Platz modelliert eine Person, die die entsprechende Aktion ausführt. Ein anderer Extremfall wäre eine einzelne Person, die alle Aktionen durchführt. Hier gibt es wiederum unterschiedliche Varianten. Man kann die Reihenfolge der 29 Aktionen ganz offenlassen (diesen Fall zeigt Abbildung 12b), teilweise festlegen oder ganz festlegen.

Im allgemeinen Fall ist jede Person im Team für eine oder mehrere Aktionen spezialisiert, so dass es insgesamt für jede Aktion mindestens einen Spezialisten gibt. Abbildung 12c zeigt diesen Fall: Jedes der Symbole  $a_1, \dots, a_{29}$  repräsentiert symbolisch eine der 29 Aktivitäten des Systems. Die Funktion  $f$  ordnet jeder Person im Team die Menge der Aktivitäten zu, für die sie spezialisiert ist. Abbildung 14 zeigt die zugehörige Signatur dieser Modellierungsvariante. Ebenso skizziert die Abbildung eine exemplarische Instantiierung zur Verdeutlichung.

In Abbildung 12 stellt sich nun die Frage, in welchen Modulen die neu eingeführten Plätze  $a_1, \dots, a_{29}$ ,  $b$  und  $c$  liegen. Für jeden der Plätze  $a_i$  wäre ein natürlicher Kandidat das Modul, in dem  $t_i$  liegt. Für  $b$  und  $c$  gibt es aber keine vergleichbar intuitiv vernünftige Lösung. Deshalb schlagen wir ein eigenes Modul *staff* vor, in dem – abhängig von der gewählten Variante – der neue Platz  $b$  beziehungsweise  $c$  liegt. Für die Schlingen mit den Transitionen  $t_1, \dots, t_{29}$  wählen wir Pfeile als Schnittstellen-Elemente. Abbildung 13 skizziert schematisch die Ergänzung der Abbildung 11 um den Platz  $c$  und die Schlingen mit den Transitionen (blaue Pfeile). Auf eine explizite Darstellung sämtlicher Pfeile der Schnittstellen-Elemente wird aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Graphik verzichtet. Auch ist graphisch nicht eindeutig ersichtlich, ob die Schnittstellen-Elemente in der linken oder rechten Schnittstelle des Moduls liegen.



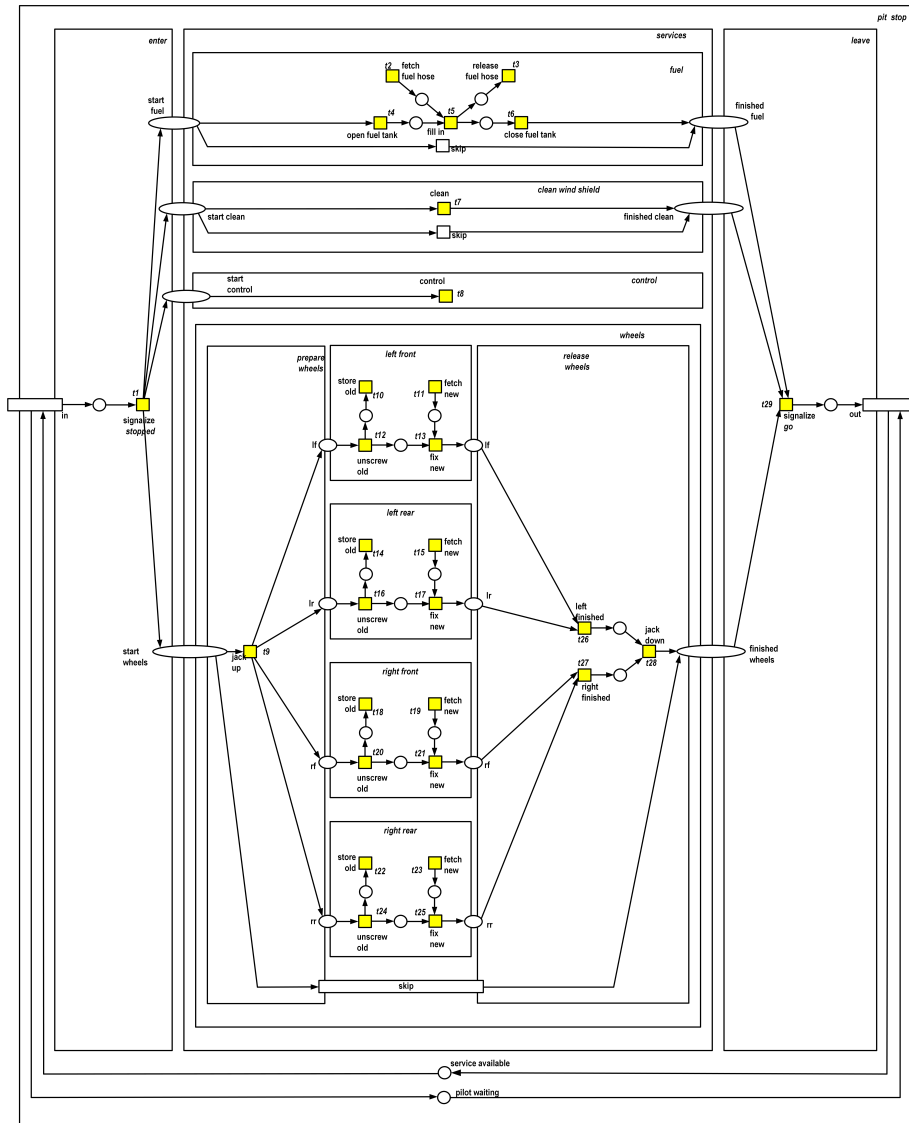
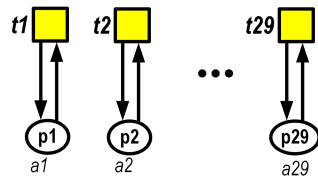
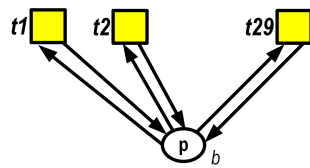
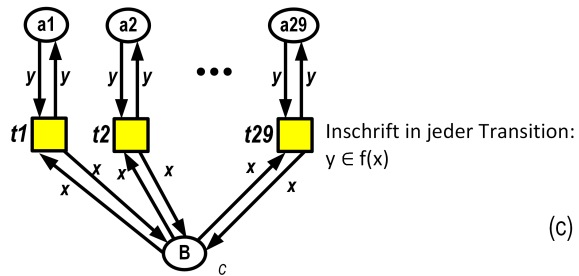


Abb. 11: ausführbares Gesamtmodell



(a) für jede Aktion eine eigene Person

(b) dieselbe Person,  $p$ , für alle Aktionen

(c) Gruppen von Personen

Abb. 12: Personen und Aktivitäten

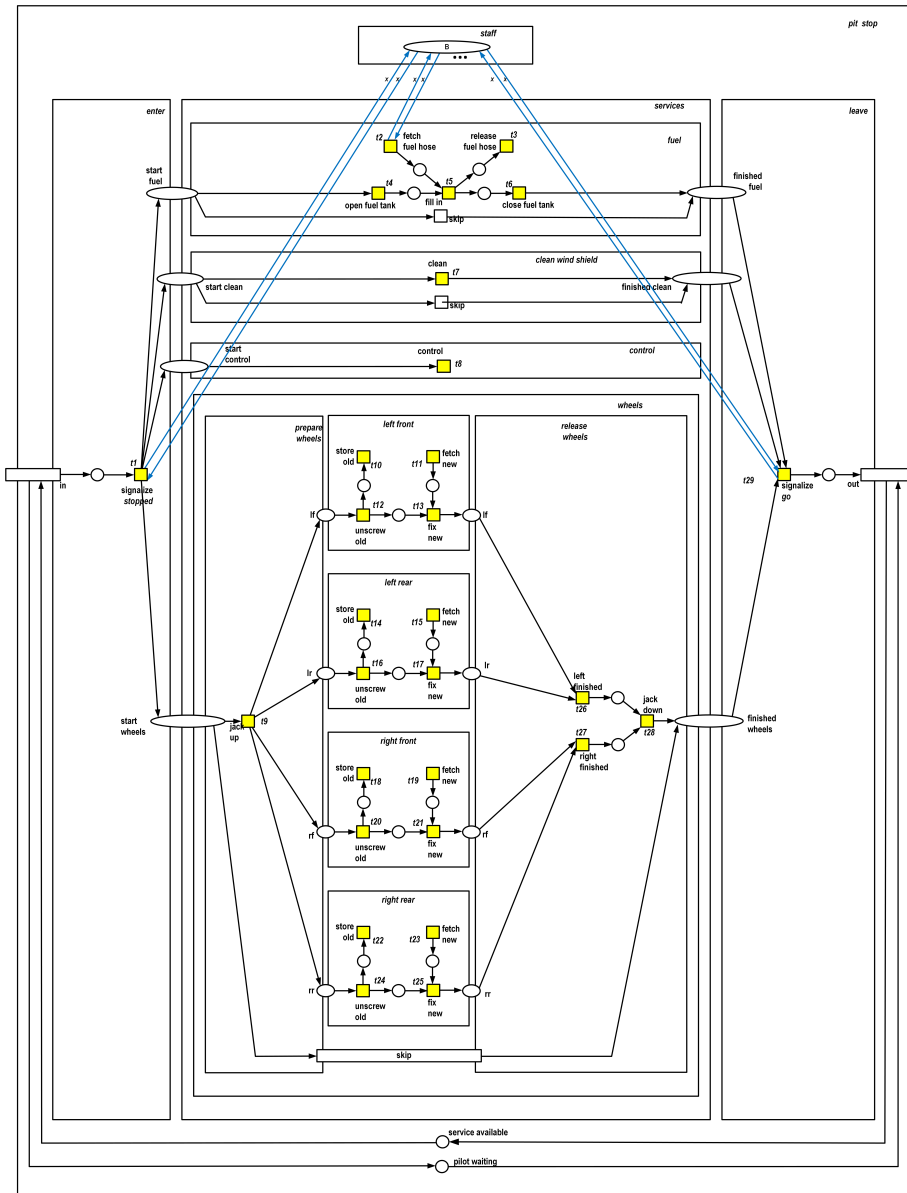


Abb. 13: Ergänzung um *staff*

### 2.3 Beispiele für Aufgabenverteilung

Bei hinreichend viel Personal würde man vielleicht eine Person für die Aktivitäten *signal stopped* und *signal go* vorsehen (also für die Transitionen  $a_1$  und  $a_{29}$ ) und je eine Person für jeden der vier Services. Das ist vernünftig für

die beiden Services *clean windshield* und *control*, da jede der beiden nur einer Aktion hat (*clean*, Transition  $t_7$ , beziehungsweise *control*, Transition  $t_8$ ). Wenn für den Service *fuel* nur eine Person zuständig ist, zeigt Abbildung 17 eine mögliche Reihenfolge (in rot gekennzeichnet). Entsprechend zeigt Abbildung 18 einen sinnvollen Einsatz zweier Personen. Im Service *wheels* würde vielleicht eine Person die beiden Aktivitäten *jack up* und *jack down* übernehmen und je eine Person *left finished* und *right finished* erkennen und signalisieren. Für jeden der vier paarweise unabhängigen Module des Reifenwechsels (*left front*, *left rear*, *right front* und *right rear*) zeigen die drei Abbildungen 19, 20 und 21 jeweils sinnvolle Reihenfolgen der Durchführung der Aktivitäten.

<b>Signatur <math>\Sigma</math>:</b>	<b>Instanziierung</b>
	Bem. =i steht für "wird instanziiert durch ..."
<b>Grundsorten</b>	<b>Grundsorten</b>
<b>S</b> <i>Staff</i>	<b>S</b> =i {Bob, Don, Jan, Kim, Max, Per, Pit, Ron, Sam, Tom, Ulf, Ute}
<b>A</b> <i>Aktivitäten</i>	<b>A</b> =i {signalize <i>stopped</i> , open fuel tank, ..., signalize go }
<b>Abgeleitete Sorten</b>	<b>Konstanten-Symbole</b>
<b>SKILS = P(A)</b> <i>Fähigkeiten</i>	<b>a1</b> =i signalize <i>stopped</i>
	<b>a2</b> =i open fuel tank
	...
<b>Konstanten-Symbole</b>	<b>a29</b> =i signalize go
<b>B: P(S)</b> <i>das Personal</i>	<b>f(Bob)</b> =i {signalize <i>stopped</i> , signalize go }
<b>a1, a2, ..., a29: A</b>	<b>f(Don)</b> =i {open fuel tank}
<b>Funktions-Symbole</b>	
<b>f: S <math>\rightarrow</math> SKILS</b>	
<b>Variablen</b>	
<b>x: S</b>	
<b>y: A</b>	
<b>Forderungen:</b>	
1. $\text{dom}(f) = B$	
2. Die Aktivitäten <b>a1, a2, ..., a29</b> sind paarweise verschieden.	
3. Für jede der Aktivitäten <b>a1, a2, ..., a29</b> gibt es mindestens einen $s \in V$ so dass $a \in f(s)$ .	

Abb. 14: Signatur und eine Instanziierung

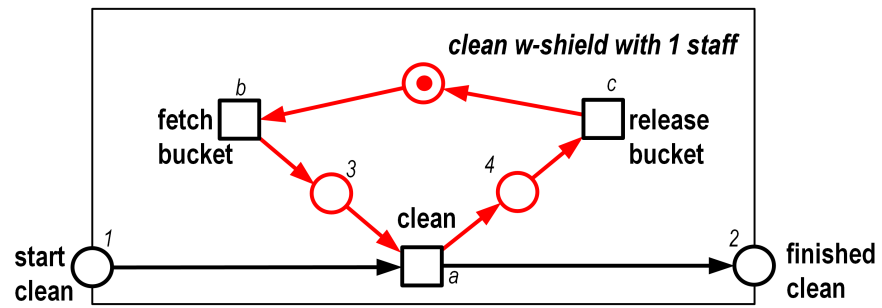


Abb. 15: Reinigung mit einer Person

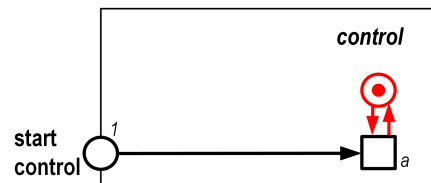


Abb. 16: Kontrolle mit einer Person

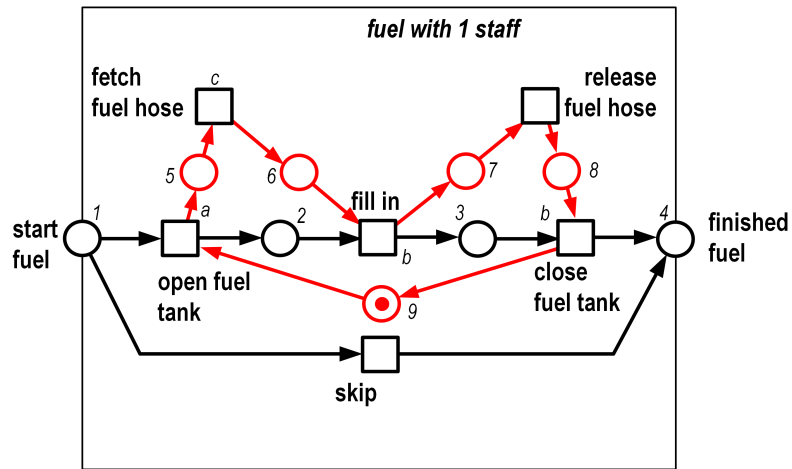


Abb. 17: Betankung mit einer Person

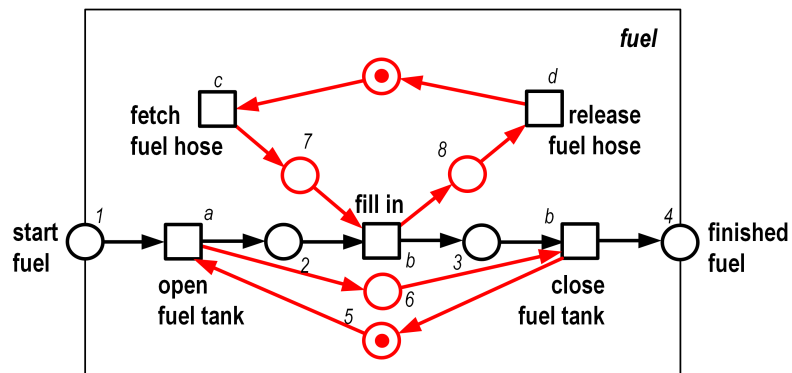


Abb. 18: Betankung mit zwei Personen

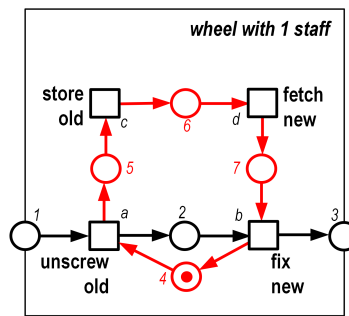


Abb. 19: Reifenwechsel mit einer Person

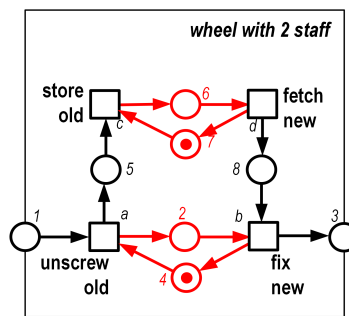


Abb. 20: Reifenwechsel mit zwei Personen

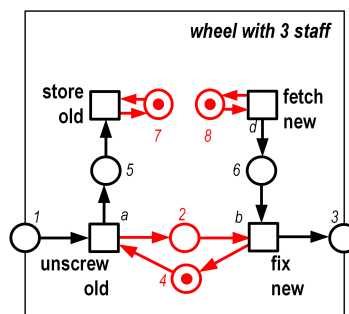


Abb. 21: Reifenwechsel mit drei Personen

### **3 Zusammenfassung und Ausblick**

Diese Fallstudie präsentiert eine exemplarische Modellierung des Boxenstopps mit HERAKLIT. In dieser Fallstudie wird insbesondere die Modellierung der Nebenläufigkeit verschiedener Aktionen und die sich daraus ergebenden Abhängigkeiten bei Ressourcenkonflikten deutlich. Im zweiten Teil der Fallstudie werden am Beispiel des modellierten Systems grundsätzliche Herausforderungen bei der Optimierung betrieblicher Systeme aufgezeigt.