

## **Modularer Simulationsbaukasten zur Modellierung und Optimierung der Instandhaltungsabläufe in Zugdepots**

### ***Modular simulation toolkit for maintenance processes in rail vehicle depots***

Toni Donhauser, Siemens Mobility GmbH, Erlangen (Germany),  
toni.donhauser@siemens.com

Niklas Natterer, Siemens Advanta Consulting, München (Germany),  
niklas.natterer@siemens.com

Emin Genc, Siemens Mobility GmbH, München (Germany),  
emin.genc@siemens.com

**Abstract:** The planning of plants for the maintenance of rail vehicles is subject to a wide range of influences with a high degree of mutual dependencies. If these remain unconsidered during the planning phase, the calculation is affected on the one hand by unnoticed erroneous assumptions that lead either to an overpriced offer or to unplanned costs when in operation. On the other hand, these planning errors cannot be corrected after the construction of the depot and result in inefficiencies or additional costs. For the validation of bid calculations, Siemens Mobility reproduces the planned layout and the intended workflows in the maintenance depot in a simulation model. By means of such a dynamic approach, bottlenecks and system deficiencies can be identified and avoided at the very beginning of the planning phase in order to submit a reliable offer with regard to viability and cost security. Due to the developed modular simulation toolkit, any depot can be modeled with very little effort to verify its suitability for the maintenance contract or to optimize existing operations.

### **1 Anforderungen an die Planung von Instandhaltungsabläufen für Schienenfahrzeuge**

Trotz ihres Charakters eines Werkstattbetriebes weist die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen aufgrund der wiederkehrenden Arbeitspläne Parallelen zu einer Serienproduktion auf. Aus diesem Grund bietet die Anwendung etablierter Ansätze zur Material- und Informationsflussoptimierung aus dem Produktionsumfeld (z.B. Lean, PPS) erhebliches Potenzial zur Steigerung der Effizienz. Um derartige Einsparungseffekte zu erzielen, hat die Siemens Mobility GmbH das „Maintenance Operational Excellence“-Programm aufgesetzt. In diesem Rahmen werden in

verschiedenen Workstreams die Erkenntnisse aus dem Shopfloor mit den verantwortlichen Bereichen für die Planung von Instandhaltungsdepots zusammengeführt. Hieraus entstehen Best Practices zur durchgängigen Ausübung einer effizienten Instandhaltung über alle Projekte hinweg, die entsprechend als Standards beschrieben werden.

Im Bereich des Workstreams „Produktionssystem“, der sich unter Einbezug aller Depotfunktionen für eine effiziente Aufbau- und Ablauforganisation und den zielgerichteten Einsatz digitaler Unterstützungstools verantwortlich zeigt, sind viele Fragestellungen hinsichtlich des Depotbetriebs isoliert nicht vollumfänglich bewertbar. Vielmehr ist es hierbei erforderlich, Zusammenhänge aus verschiedenen Bereichen (Disposition, Personal, Logistik u.a.) zu berücksichtigen und deren Wechselwirkungen zu quantifizieren.

Einen bewährten Ansatz zur Untersuchung derartiger Fragestellungen stellt die Ablaufsimulation dar, da diese im Zeitverlauf auftretende dynamische Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systembestandteilen berücksichtigt. In einem Instandhaltungsdepot für Schienenfahrzeuge treten diese insbesondere durch das Rangieren der Fahrzeuge, durch unvorhersehbare Ereignisse, wie Infrastrukturdefekte oder Ablaufverzögerungen, oder durch Verspätungen bei der Bereitstellung von Fahrzeugen auf. Die dadurch bedingten Einflüsse auf die Arbeitsabfolge sowie Wartezeiten an den einzelnen Bearbeitungsstationen lassen sich in statischen Planungsverfahren nicht abbilden und führen in der Folge zu Ungenauigkeiten oder überflüssigen Puffern als Kapazitätsreserve.

## 2 Systembeschreibung und Problemstellung

Von der Planungsphase bis hin zum operativen Betrieb treten die geschilderten Herausforderungen in jedem Depot in unterschiedlichen Ausprägungen auf. Verteilt über das Gelände eines Instandhaltungsdepots erfolgen sowohl die klassischen Instandhaltungstätigkeiten wie planmäßige, korrektive oder werterhaltende Maßnahmen einschließlich Abdrehen der Radsätze, als auch weitere Services wie Außenreinigung, Innenreinigung, Enteisung oder Vorbereitungsdienste. Eine wesentliche Anforderung bei der Abarbeitung der entsprechenden fahrzeugindividuellen Arbeitspläne besteht darin, die Verfügbarkeit der Fahrzeuge für die täglichen Betriebsumläufe sicherzustellen. Dies kann beispielsweise in Nachtzeiten zu einem dichten Verkehrsaufkommen führen, das einen sehr hohen Dispositionsaufwand nach sich zieht. Dieser Umstand wird dadurch verstärkt, dass aufgrund des Gleislayouts ein zeitgleiches Rangieren mehrerer Fahrzeuge in bestimmten Bereichen oftmals nur eingeschränkt möglich ist. Aufgrund der Vielfalt an Einflussgrößen, wie Ankunftszeiten, Fahrzeuganzahl, Arbeitspläne oder Personalverfügbarkeit, ist ohne Simulation nur schwer zu ermitteln, ob die geplante Arbeitslast innerhalb des verfügbaren Zeitrahmens umzusetzen ist.

Gleichermaßen lässt sich ohne Berücksichtigung der Zeitdynamik der maßgebliche Engpass im Depotlayout oftmals nicht eindeutig bestimmen, genauso wie die erforderliche Personalkapazität an den einzelnen Arbeitsstationen. Dies erschwert beispielsweise die Bewertung, ob eine Änderung im Schichtmodell eine Entzerrung der Auslastung an einem Engpass herbeiführen kann.

### 3 Lösungsansatz: Simulationsbaukasten

Um die erforderliche Transparenz für die genannten Zielstellungen zu erreichen, ist für ein Instandhaltungsdepot ein Simulationsmodell zu erstellen und entsprechend der genannten Freiheitsgrade anzupassen, um in beliebigen Szenarien die Realität möglichst exakt nachzubilden. Anylogic bietet für die Simulation des Schienenverkehrs eine zugeschnittene Bausteinbibliothek (Eisenbahnbibliothek - Anylogic Simulationssoftware, 2021) an, die jedoch nicht auf die spezifischen Instandhaltungsprozesse ausgelegt ist, welche beispielsweise im Bereich der Komponentenüberholung einer klassischen Werkstattfertigung ähneln. Gleichermäßen verhält es sich bei den für den Eisenbahnbetrieb entwickelten Simulationsprogrammen OpenTrack (Nash & Huerlimann, 2004) und RailSys (Bendfeldt, Mohr, & Müller, 2000), die ihre Stärken in der Bewertung von Fahrplänen für ein vorgegebenes Netz haben, jedoch nicht für die Simulation von Instandhaltungsprozessen bzw. der Abläufe in einem Depot vorgesehen sind. Erste Ansätze zur Abbildung der Instandhaltungsabläufe in einer hierfür geeigneten ereignisdiskreten Simulation wurden von (Greasley, 2000; Hani, Amodeo, Yalaoui, & Chen, 2008) veröffentlicht, welche jedoch fallspezifische Individualmodelle beschreiben oder im Fall von (Bury, Spieckermann, Wortmann, & Hübler, 2018) durch die Betrachtung der Interaktion von Fahrzeugumläufen mit Instandhaltungsslots eine andere Abstraktionsebene ansprechen.

Daher wurde zur Minimierung des Erstellungs- und Anpassungsaufwands über diverse Projekte hinweg eine Bausteinbibliothek entwickelt, die einen Instandhaltungsbetrieb vom Geländelayout bis zur Abarbeitung von Arbeitsplänen integriert abbilden lässt. Diese enthält spezifische Standardbausteine für die Instandhaltung von Schienenfahrzeugen, die die folgenden Funktionen beinhalten:

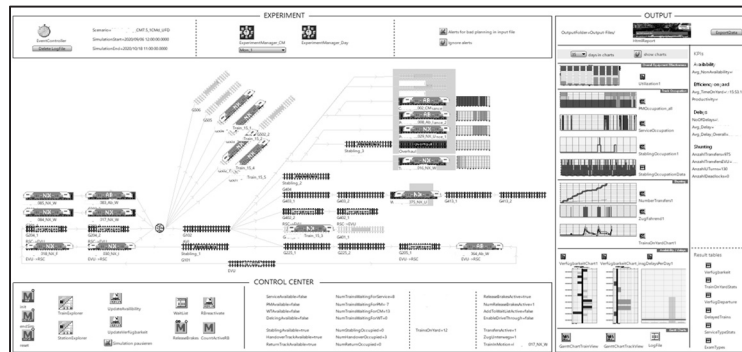
- Ausführung spezifischer Arbeitspläne: planmäßige Inspektionen, Instandsetzungsmaßnahmen, Revisionen am Fahrzeug und in der Komponentenwerkstatt
- Instandhaltungs- und Serviceeinrichtungen/-anlagen: Außenreinigungsanlage, Werkstattgleise, Unterflurdrehbank, automatisierte Fahrzeuginspektionsanlage, Enteisungsanlage, Servicegleise, Abstellgleise
- Parameterabhängige Rangierlogik
- Generator für Instandhaltungspläne auf Basis von wiederkehrenden Zugaufenthalten: Ankunfts-/Bereitstellungszeiten, Arbeitsaufträge, Zugtyp, Betreiber u.a.
- Personelle Ressourcen: Schichtmodelle, Einsatzplanung, Kompetenzen
- Automatisierter Standard-KPI-Report zur Auswertung der Simulationsläufe

Durch den generischen Aufbau der Bausteine sowie eine zentrale Steuerungslogik lassen sich die einzelnen Module beliebig zusammensetzen und ohne weitere Modellierung in den Simulationsablauf integrieren. Insbesondere ermöglicht dies eine aufwandsarme Generierung neuer Szenarien, was vor allem bei der Bewertung von möglichen Anpassungen des Depotlayouts von Vorteil ist.

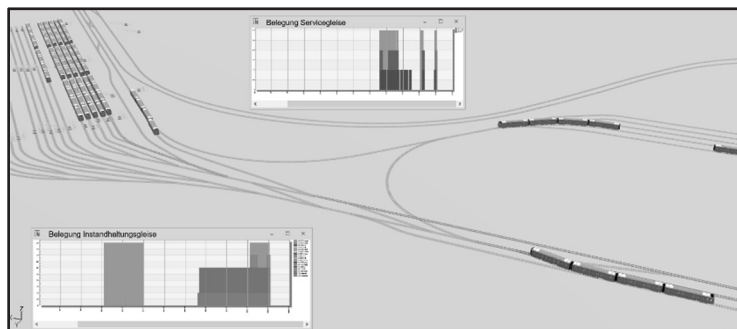
### 4 Modellierung und Implementierung

Der beschriebene Modulbaukasten wurde auf Basis eines Referenzmodells für die Abläufe in einem Zugdepot in Tecnomatix Plant Simulation implementiert. Grundsätzlich lassen sich Instandhaltungsdepots hiermit nach zwei unterschiedlichen Modellierungsansätzen abbilden. Liegt der Fokus weniger auf dem exakten Ablauf

der Zuggewegungen hinsichtlich Kollisionsvermeidung und Wartepunkten, eignet sich die in Abbildung 1 dargestellte Modellierungsform, bei der anstelle exakter Distanzen und Geschwindigkeiten reine Zeitannahmen für Rangierfahrten angesetzt werden. Dies ermöglicht kürzere Laufzeiten und somit umfangreichere Untersuchungen. Der in Abbildung 2 dargestellte Ansatz basiert auf exakteren Dimensionen und fahrphysikalischen Eigenschaften und eignet sich somit für detailliertere Untersuchungen in Bezug auf die Fahrwege der Züge.



**Abbildung 1:** Ereignisdiskretes Simulationsmodell der Instandhaltungsabläufe in einem Zugdepot modelliert in Tecnomatix Plant Simulation



**Abbildung 2:** Ereignisdiskretes Simulationsmodell eines Zugdepots in 3D-Visualisierung (Tecnomatix Plant Simulation)

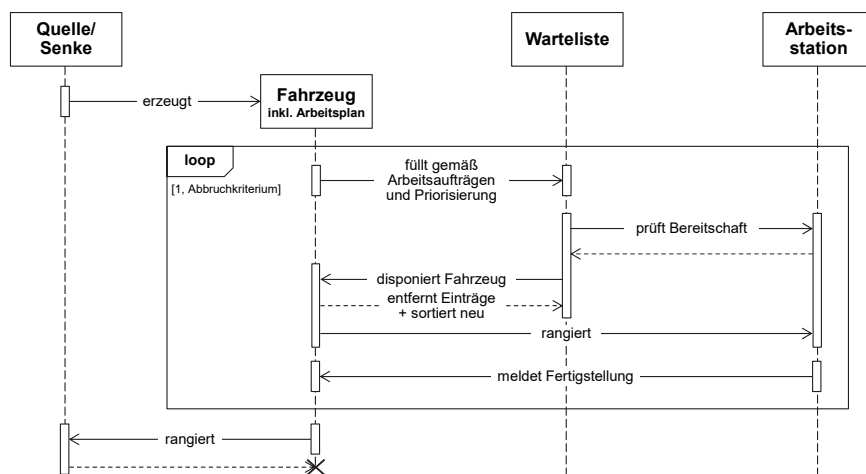
#### Modellbausteine

Für den Grundaufbau des Modells werden Standardbausteine aus Plant Simulation herangezogen. Sie werden in generischer Form auf den jeweiligen Einsatzzweck in der Zuginstandhaltung hin zugeschnitten, sodass diese Objekte für die entsprechende Verwendung in einem spezifischen Depot instanziiert werden können. So basiert eine Zugeinheit auf dem Fahrzeug-Baustein und ein Gleiselement auf einem Weg-Objekt. Dies hat zum Vorteil, dass die implementierte automatisierte Routenfindung direkt weiterverwendet werden kann. Die besagten Objekte können je nach gewählter Ausprägungsform (z. B. Abstell-, Übergabe-, Instandhaltungsgleis u. a.) bestimmte Eigenschaften annehmen und Methoden aufweisen.

An alle Gleiselemente, auf denen Arbeitsaufträge abgearbeitet werden, sind über Eingangsmethoden oder Sensoren Arbeitsstationen angebunden, die die Ausführung der dort vorzunehmenden Tätigkeiten steuern. Diese führen schließlich alle Daten und Informationen mit, die zur Bewertung der Effizienz des Gesamtsystems oder einzelner Bereiche heranzuziehen sind. Für diese Auswertungen sind für einen Instandhaltungsbetrieb spezifizierte Standarddiagramme angelegt, die je nach Typ der Arbeitsstation deren Einsatzgrad visualisieren.

#### Ablauflogik

Um die Fahrzeuge innerhalb des Depots an die erforderlichen Arbeitsstationen zur Erfüllung der zugeordneten Arbeitsaufträge zu disponieren, sind Termindaten (Ankunftszeit, späteste Ausfahrzeit u. a.), Arbeitspläne, Fahrzeugeigenschaften sowie Steuerungsregeln erforderlich. Abbildung 3 stellt die im Baukasten implementierte Steuerungslogik in einem Sequenzdiagramm dar.



**Abbildung 3:** Steuerungslogik für Fahrzeuge zur Erfüllung der Arbeitsaufträge

Ausgehend von einem Terminplan für den zu simulierenden Zeitraum werden zu den festgelegten Zeitpunkten in einer Quelle Fahrzeuge generiert und ihnen der hinterlegte Arbeitsplan sowie spezifische Fahrzeugeigenschaften angehängt. Daraufhin wird das Fahrzeug zu einem der dedizierten Übergabegleise navigiert. Anhand der dortigen Eingangssteuerung wird der hinterlegte Arbeitsplan an die Warteliste kommuniziert und anhand von depotspezifisch festgelegten Priorisierungsregeln in die bereits bestehenden Fahraufträge eingeordnet. Mittels verschiedener Trigger wird die Warteliste kontinuierlich durchlaufen und hierbei geprüft, ob ein Fahrauftrag ausgeführt werden kann.

Ist für ein Fahrzeug nach verschiedenen Fahraufträgen und Aufenthalten an Arbeitsstationen ein Abbruchkriterium erfüllt (z. B. vorgegebene Abfahrtszeit erreicht, alle Arbeitsaufträge abgeschlossen), so wird es, bei Bedarf über Übergabegleise, einer Senke (z. B. Depotausfahrt) zugeführt. Während des gesamten Depotaufenthalts werden sämtliche Bewegungen und Aufenthalte aufgezeichnet und stehen im Nachgang zur Auswertung des jeweiligen Szenarios zur Verfügung.

## 5 Exemplarische Fallstudien

In der gewählten Form eignet sich der Baukasten für eine Vielzahl verschiedener Fragestellungen, die ohne Simulationseinsatz nur unzureichend bewertet werden können. Dies kann in verschiedenartigen Fallstudien nachgewiesen werden.

### 5.1 Bottleneck-Analyse

Bei der Planung neuer Depots sind Instandhaltungseinrichtungen und Gleisanlagen in optimaler Menge und Lage auf begrenzter Grundstücksfläche zu verorten, um effiziente Abläufe bei geringen Investitions- und Betriebskosten zu gewährleisten. Da eine nachträgliche Anpassung erheblichen Aufwand erfordert, wird bei unzureichender Transparenz bezüglich der zu erwartenden Abläufe mit großen Kapazitätspuffern gearbeitet. Um diese zu vermeiden, wird in einem neuen Instandhaltungsprojekt das geplante Depotlayout anhand der künftigen Umlaufpläne und Einbestellungen simulativ im Voraus bewertet und an den identifizierten Engstellen angepasst.

Dank der Simulation ist ersichtlich, aufgrund welcher Arbeitsstation Züge wie lange auf eine Weiterfahrt warten müssen bzw. in wie vielen Fällen diese auf ein Abstellgleis ausweichen müssen. Hierzu werden die Aufenthaltsorte der Züge sowie die entsprechenden Entscheidungen in der Steuerungslogik in Bezug auf die geplante Weiterfahrt geloggt und ausgewertet. Ferner können belastbare Aussagen in Bezug auf die erforderliche Anzahl an Abstellgleisen, an Triebfahrzeugführern sowie die erzielbare Außenreinigungsfrequenz für die Flotte getroffen werden.

### 5.2 Einfluss der Rangierstrategie auf die Fahrzeugverfügbarkeit

In einem bereits bestehenden Depot sind viele Freiheitsgrade aufgrund des starren Depotlayouts frühzeitig festgelegt. Hier sind vorrangig die operativen Entscheidungsvariablen zu optimieren, um die Effizienz im Depotbetrieb zu erhöhen. Hierzu kann der Einfluss der Disposition der Züge zu den einzelnen Arbeitsstationen innerhalb des Depots untersucht werden. Als Variablen für die Generierung auszuwertender Szenarien sind beispielsweise die Priorisierung einzelner Arbeitsstationen oder einzelner Zugtypen, die Nutzung von Abstellgleisen als Ausweichrouten oder unterschiedliche Schichtmodelle anzusetzen. Ziel solcher Simulationsstudien ist die Ermittlung einer robusten Strategie zur Erreichung einer maximalen Verfügbarkeit der Fahrzeugflotte für den Betrieb.

## 6 Ergebnisse der Fallstudien

Als Nachweis für die Anwendbarkeit und den Nutzen des Simulationsbaukastens für komplexe Fragestellungen bei der Planung der Aufbau- und Ablauforganisation sowie des Layouts eines Instandhaltungsdepots, werden nachfolgend umgesetzte Fallstudien vorgestellt. Als Vergleichsreferenz dienen klassische Planungsansätze ohne Einsatz von Simulationsverfahren.

### *Kostenminimale Erweiterung zur Erreichung des Zieldurchsatzes*

Bei neuen Instandhaltungsprojekten gelingt basierend auf Erfahrungswerten eine gute Annäherung an erforderliche Ressourcen zur vollständigen Erledigung des

Arbeitspensums. Sind hierbei jedoch wechselseitig einschränkende Einflussfaktoren zu berücksichtigen (z. B. Depotlayout, Schicht- und Umlaufpläne, variierende Prozesszeiten), so sind für die endgültige Festlegung Sicherheiten vorzusehen. In einer Fallstudie waren in einem zweiwöchigen Referenzzeitraum in der Nacht 182 Fahrzeuge in einem Depot zu behandeln. Der Untersuchungsfokus lag auf einer rechtzeitigen Betriebsfreigabe aller Fahrzeuge bei möglichst geringen Wartezeiten durch kostenminimale Erweiterung der Arbeitsstände innerhalb der Geländegrenzen.

Ausgehend von einem Referenzszenario wurden zusätzliche Abstell- und Innenreinigungsgleise als günstige Erweiterungen auf deren Einfluss auf den Durchsatz untersucht. Diese wurden anhand von Engpassanalysen als maßgebliche Verursacher von Verzögerungen identifiziert. Tabelle 1 zeigt, dass durch ein zusätzliches Abstellgleis weiterhin viele Fahrzeuge die vorgesehene Abfahrtszeit nicht einhalten können. Ein zusätzliches Gleis für die Innenreinigung hingegen führt zu einem frühen Zeitpunkt zu einer Reduzierung der Aufstauung und so zu einer zügigen Weiterbearbeitung. Dies lässt in der Folge lediglich sechs der 182 Fahrzeuge übrig, deren pünktliche Ausfahrt nicht ohne Weiteres sichergestellt werden kann. In einer Einzelfallbetrachtung konnten jedoch organisatorische Maßnahmen identifiziert werden, um auch diese Fahrzeuge rechtzeitig freizugeben.

**Tabelle 1:** Szenarienvergleich zur Identifizierung erforderlicher Erweiterungen

|                            | Referenzszenario | Ref.-sz. + Abstellgleis | Referenzszenario + Innenreinigungsgleis |
|----------------------------|------------------|-------------------------|---|
| Freigabe kritisch [# Fzg.] | 35               | 23                      | 6                                       |
| Ø Wartezeit im Depot       | 86 min           | 71 min                  | 37 min                                  |

#### *Nachweis der zu erreichenden Übergabetaktung in den Umlauf*

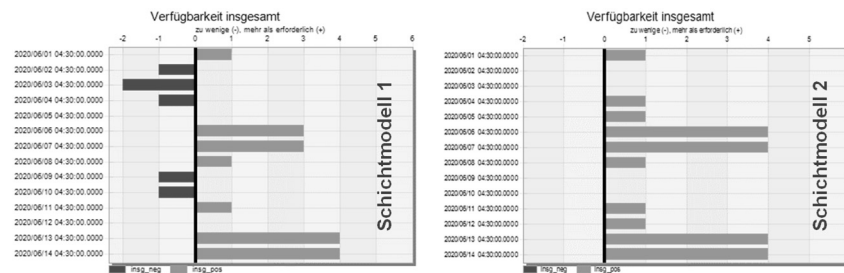
In vielen Lightrail-Projekten erfolgen sowohl die Abstellung als auch die Reinigung und Instandhaltung auf demselben Depotgelände. Dies bringt die Anforderung mit sich, einen Großteil der Fahrzeuge zu Beginn der Hauptverkehrszeiten sehr kurz getaktet an den Betrieb zu übergeben. Aufgrund großer Distanzen sowie Restriktionen wie Maximalgeschwindigkeiten oder abschnittsweisen Einzelzugbewegungen kann dies eine große Herausforderung darstellen. In einem entsprechenden Projekt sind zur Bedienung des morgendlichen Passagieraufkommens 18 Fahrzeuge im 90-Sekunden-Takt in den laufenden Betrieb einzugliedern. Aufgrund der dort auftretenden Interaktion des Depotverkehrs mit dem Fahrzeugumlauf ist die Eignung der geplanten Streckenführung und Signalgebung im Depot simulativ zu bewerten.

Ausgehend von einem Referenzszenario mit zehn verspäteten Übergaben wurden verschiedene Strategien entwickelt, um die Übergabeanforderungen vollständig zu erfüllen. Durch eine veränderte Routenführung, ein verlängertes Ausziehgleis sowie die vorzeitige Bereitstellung einzelner Fahrzeuge an den Endhaltestellen ist dies abschließend gelungen.

#### *Analyse des Einflusses von Schichtmodellen*

Der erhebliche organisatorische Aufwand zur Änderung eines Schichtmodells sollte vorab hinsichtlich der erwarteten Effizienzerhöhung abgesichert werden. In der

vorliegenden Fallstudie war zu analysieren, welche Auswirkungen die Vermeidung von Nacharbeiten in der Instandhaltung auf die Verfügbarkeit der Fahrzeuge für den Betrieb hat. Durch die Entzerrung des nächtlichen Rangierbetriebs sind geringere Wartezeiten und somit eine rechtzeitige Betriebsfreigabe für die zur Außenreinigung einbestellten Fahrzeuge zu erwarten.



**Abbildung 4:** Fahrzeugverfügbarkeit in Abhängigkeit des Schichtmodells

Abbildung 4 zeigt die Einhaltung der geforderten täglichen Fahrzeugverfügbarkeit über zwei Musterwochen in Abhängigkeit des gewählten Schichtmodells. Ein nächtlicher Instandhaltungsbetrieb (Schichtmodell 1) führt zu erhöhtem Verkehrsaufkommen und somit zu Verzögerungen in der Abwicklung der kurz getakteten Rangierfahrten zwischen den Reinigungsanlagen. Ändert man lediglich das Schichtmodell ohne Erhöhung des Personaleinsatzes, so treten keine Nicht-Verfügbarkeiten mehr auf und es verbleiben überdies Puffer für die Kompensation von unerwarteten Ereignissen oder zur Optimierung des Ressourceneinsatzes.

## Literaturverzeichnis

- Bendfeldt, J.-P., Mohr, U., & Müller, L. (2000). RailSys, a system to plan future railway needs. *WIT Transactions on The Built Environment*(50).
- Bury, H., Spieckermann, S., Wortmann, D., & Hübler, F. (2018). A case study on simulation of railway fleet maintenance. *Winter Simulation Conference (WSC)* (S. 2851-2860). IEEE.
- Eisenbahnbibliothek - Anylogic Simulationssoftware. (19. Juli 2021). (The AnyLogic Company) Von <https://www.anylogic.de/resources/libraries/rail-library/> abgerufen
- Greasley, A. (2000). Using simulation to assess the service reliability of a train maintenance depot. *Quality and Reliability Engineering International*(3), S. 221-228.
- Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., & Chen, H. (2008). Simulation based optimization of a train maintenance facility. *Journal of intelligent manufacturing*(3), S. 293-300.
- Nash, A., & Huerlimann, D. (2004). Railroad simulation using OpenTrack. *WIT Transactions on The Built Environment*(74).