

# **Virtuelle Inbetriebnahme eines Leitsystems für die roboterbasierte automatische Kommissionierung in der Automobilindustrie**

## ***Virtual Commissioning of a Control System for automated robot-based Picking in automotive Environment***

Xinyi Xie, Thomas Büttner, Marko Friedemann, Ken Wenzel, Fraunhofer Institut  
für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany),  
xinyi.xie@iwu.fraunhofer.de, thomas.buettner@iwu.fraunhofer.de,  
marko.friedemann@iwu.fraunhofer.de, ken.wenzel@iwu.fraunhofer.de

**Abstract:** Robot-based commissioning in combination with automated guided vehicles (AGVs) for material provisioning is a solution for coping with changing requirements due to increasing product variety. To control such a system a software is required that optimizes the picking sequence and that coordinates the robot, the AGV and the safety equipment. Due to the complexity of the technical system, it is challenging to test the control software with real hardware. Therefore, this paper presents a virtual commissioning approach for such a software system called AutoLog. A simple programmed model is used for unit and regression tests and a more complex material flow model with stochastic behaviour for integration tests.

## **1 Motivation und Problemstellung**

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Produktion auch bei steigender Variantenvielfalt vor allem in Hochlohnländern zu sichern, müssen manuelle Tätigkeiten in der Fahrzeugmontage zunehmend automatisiert werden. Dies hat auch Auswirkungen auf damit verbundene Logistikprozesse. Besonders die Kommissionierung von Bauteilen entsprechend der Perlenkette oder deren Zusammenstellung in einem Warenkorb wurden bisher manuell durchgeführt. Durch Fortschritte in der Robotertechnik und den Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) können hier aber vor allem bei der Kommissionierung von großen Bauteilen Potentiale erschlossen werden. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Entlastung der Werker von körperlich schweren Arbeiten als auch im Hinblick auf die Reduzierung der notwendigen Fläche zum Aufbau der Anlagentechnik und zur Lagerung der Materialbehälter.

Dazu wurden vom Fraunhofer IWU zusammen mit einem Automobilhersteller entsprechende technische Lösungen wie Greifmittel, Sensortechnik und Roboterprogramme zum Aufbau einer automatischen Kommissionierungsanlage für

Fahrzeugteile entwickelt, die nach dem Ware-zur-Person-Prinzip vollautomatisch, unter Nutzung von fahrerlosen Transportsystemen, arbeitet.

Die Anlage ist für die Kommissionierung von Großbauteilen, wie Frontscheiben oder Getrieben, vorgesehen und hält jeweils eine gewisse Teilmenge in Behältern auf Pufferplätzen und in direkter Reichweite des Roboters vor. Bei großer Variantenanzahl kann es erforderlich sein, einige dieser Plätze mit wechselnden Teiletypen zu belegen. Die dynamische Versorgung dieser Pufferplätze mit den entsprechenden Teiletypen durch ein FTS, der wahlfreie Zugriff auf Teile- und Sequenzbehälter sowie die Bestimmung einer Kommissionierungsreihenfolge stellen ein mehrdimensionales Optimierungsproblem dar. Deshalb wurde ein Softwaresystem entwickelt, das die Operationen von FTS zur Materialbereitstellung und Roboter zur Bauteilentnahme anhand der Aufträge vorausplant und deren Ausführung koordiniert.

Da durch die Nutzung eines FTS auf schwankende Transportzeiten und auch Ereignisse, wie notwendige Ladevorgänge reagiert werden muss, erweist sich ein umfassender Test des Softwaresystems als schwierig. Auch wenn einzelne Sonderfälle durch programmatische Tests abbildbar sind, können komplexe Testszenarien nur durch ein Simulationsmodell mit entsprechend stochastischem Verhalten durchgeführt werden. Mit Inbetriebnahme einer ersten Version des Softwaresystems hat sich gezeigt, dass im Realbetrieb sehr viele unerwartete, zufällige Ereignisse auftreten, die durch die Steuerungsalgorithmen in der Software nicht berücksichtigt wurden. Dies führte zu Fehlern und letztendlich zu einer langen Inbetriebnahme. Unterstützen kann hierbei eine virtuelle Inbetriebnahme (VIBN). Sie „wird zum Aufdecken und Beheben von Fehlern aus dem Engineering des Automatisierungssystems durchgeführt [...] und bedeutet das entwicklungsbegleitende Testen einzelner Komponenten und Teilfunktionen des Automatisierungssystems mithilfe von auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmten Simulationsmethoden und -modellen“ (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2016). Um die Anlaufphase zu verkürzen, wurde die Methode der VIBN durch Kopplung des Leitsystems mit einer Materialflusssimulation gewählt.

## **2 Einordnung in das Themenfeld und wissenschaftlicher Beitrag**

Das Anwendungsumfeld in diesem Beispiel ist gekennzeichnet durch einen Entwicklungsprozess in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2019). Die Hauptschritte können gegliedert werden in Anforderungsanalyse, Konzeptentwicklung, Machbarkeit, Umsetzung der priorisierten Lösung und iterative Anpassungen, Implementierung in ein bestehendes System mit Anlaufphase und Betrieb.

Sowohl die Konzeptentwicklung als auch anschließende Machbarkeitsuntersuchungen werden heutzutage standardmäßig mit digitalen Werkzeugen aus Produktentwicklung und Fabrikplanung unterstützt. Beide letztgenannte Betrachtungsbereiche sind dabei unabdingbar miteinander verknüpft (Westkämper 2008; Scheer 2015).

Mit Entwicklung spezieller Fertigungssysteme im Automotive-Bereich kommen in der Praxis ereignisdiskrete Simulationsmodelle, wie bspw. Siemens Plant Simulation oder Process Simulate, zum Einsatz. Diese dienen unter anderem der Absicherung des Materialfluss- und Anlagenkonzepts. Die Ergebnisse der Simulationsstudien werden anschließend in technische Ausschreibungsunterlagen überführt, in diesem Fall jeweils für die Softwareentwicklung und den Anlagenbau. Durch die Abkapselung der Simulationsmodelle in den Konzeptphasen und abhängig vom Komplexitätsgrad des technischen Systems sind die Validierungsergebnisse für das reale System schwierig annehmbar. Vielmehr ist es notwendig, die Modelle als Emulation der realen Welt, für die technische Umsetzung mitzuführen, was wiederum selten oder gar nicht praktiziert wird. Mit der Befähigung bzw. Erweiterung, die Modelle über Schnittstellen miteinander kommunizieren zu lassen, können ebendiese für eine VIBN genutzt werden.

Gerade in komplexen Systemwelten, wie in diesem Anwendungsfall bestehend aus Roboter, FTS, Anlagen-SPS, kundenseitige Auftrags- und Lagerverwaltungssysteme sowie der Interaktion untereinander, fehlt aktuell eine mittels VIBN umfassend qualifizierte Leitsteuerung als Software-in-the-Loop.

Im Themengebiet der virtuellen Inbetriebnahme existieren bereits viele Arbeiten. Hauptsächlich werden maschinennahe, Hardware-in-the-Loop-Anwendungen thematisiert, die auf die Entwicklung und Qualifizierung von Verhaltensmodellen von Maschinen und Anlagen ausgerichtet sind. Software-in-the-Loop sowie Model-in-the-Loop-Anwendungen bilden dabei den kleineren Anteil.

Grzona et al. (2019) beschreiben ein praxisnahes Vorgehen innerhalb der Fabrikplanung, bei dem physische Komponenten einer realen Versuchsanlage emuliert werden. Die Simulationsumgebung übernimmt Funktionalitäten in Form von Prozessbausteinen und steuert das Realsystem ereignisbasiert über eine reale Steuerung. Für die Kommunikation untereinander wurden innerhalb der Simulation Bausteine für einen Datenaustausch mit einem OPC UA-Server erstellt.

Süß et al. (2015) konzentrieren sich auf das Verhaltensmodell von Komponenten beziehungsweise dessen Erstellung, durch Austausch mit bestehenden Modellinformationen aus dem Entwicklungsprozess der Komponentenhersteller. Damit sollen Abschätzungen hinsichtlich der Integrierbarkeit neuer Produkte im Brown-Field einer Fabrik verbessert werden, um Entscheidungen in der Beschaffung zu unterstützen. Eine analoge Entwicklungsrichtung wurde im Projekt ENTOC (Festo SE & Co. KG) am Demonstrator einer Hochzeitsstation in der Automobilproduktion verfolgt.

Makris et al. (2012) beschreiben einen Workflow zur virtuellen Inbetriebnahme einer Roboterzelle mit zwei arbeitsteiligen Robotern. Der Fokus liegt hier auf der Abstimmung von Roboterbewegungen für einen gemeinsam benutzten Bereich. Dementsprechend sind detaillierte Eingangsdaten, wie beispielsweise Werkstückgeometrie, Kinematik, Layout der Roboterzelle und technologischer Prozessfluss, notwendig.

Wallner (2021) schlägt generell ein modellbasiertes Entwicklungsvorgehen vor und beschreibt, eher kurz, wie ein etablierter Workflow aus der Automobilbranche auf die Maschinenbaubranche übertragen werden kann. Dies stellt er exemplarisch mit den Werkzeugen Simulink und Simscape vor. Weiterhin gibt er einen kurzen Überblick

über die Architektur des Hardware-in-the-Loop-Prinzips und wie der Austausch der echtzeitfähigen Maschinen-Codes mit der SPS verbunden werden.

Bernard (2019) berichtet, analog wie zuvor, vom prinzipiellen Vorgehen bei einer virtuellen Inbetriebnahme aus einem Forschungsprojekt zwischen Volkswagen und Siemens. Im Beispiel der Heckklappenmontage existierten bereits mehrere ablauffähige Simulationsmodelle einzelner Anlagenkomponenten in jeweils unterschiedlicher Simulationsumgebung. Herausforderung war es, diese Modelle zusammenzuführen, wofür ein Framework entwickelt wurde, um ein Gesamtmodell, inklusive Steuerungssoftware, zu erhalten. Die Zusammenführung verschiedener Modelle zu einer Co-Simulation entspricht laut Einschätzung der Autoren den heutigen Anforderungen, ist allerdings nicht Fokus dieses Beitrags.

Kaffka (2019) beschreibt die Entwicklung eines Emulations-Controllers, welcher als konfigurierbare Schnittstelle zwischen Simulationsmodell eines Hochregallagers und einem Warehouse-Management-System als Produktivsystem dient. Mehrere emulierte Teilmodelle kommunizieren über diese Schnittstelle miteinander und tauschen Befehle und Status aus. Das Szenario ähnelt dem im hier vorliegenden Beitrag beschriebenen Szenario. Im Unterschied zu Kaffka liegt der Fokus auf einer Befähigung eines eigenständig ablauffähigen Simulationsmodells hin zu dessen externer Steuerung durch ein übergeordnetes Leitsystem, AutoLog. Des Weiteren sind auch Auftragsverwaltung und Behälterverwaltung integraler Bestandteil der Simulation, so dass jegliche, auch physische, Systemelemente in ihrem Ablaufautomatismus voneinander zu entkoppeln sind. Letztendlich dient die Simulation im vorliegenden Beitrag dazu, das Leitsystem als Software-in-the-Loop zu qualifizieren.

Weitere Praxisberichte sind in Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme (Riedel et al. 2020) zu finden. Hier werden prinzipielle Vorgehensweisen für unterschiedliche Einsatzzwecke in Kürze dargestellt. Unter anderem werden bausteinorientierte Simulationsplattformen mit Vereinigung von Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop und Model-in-the-Loop für durchgängige virtuelle Inbetriebnahmen vorgeschlagen. Der hier vorliegende Bericht konzentriert sich hingegen auf die spezifische Entkopplung von Prozessen innerhalb der Materialflusssimulation, welche über Socket-Schnittstellen von einem externen Leitsystem angestoßen werden und gleichzeitig Rückkopplungen aus dieser emulierten Umgebung zurückgespielt werden.

### **3 Aufbau der Systemarchitektur**

#### **3.1 Übersicht der Systemkomponenten**

Die Systemkomponenten für die virtuelle Inbetriebnahme lassen sich in die drei Hauptkomponenten: das Simulationsmodell, den Adapter als Vermittler zwischen Modell und Leitsystem sowie das Leitsystem selbst, einteilen.

Das zur Simulation der realen Umgebung verwendete Modell wurde vom Auftraggeber als eigenständiges Modell zur Verfügung gestellt. Es besteht aus mehreren Komponenten: dem fahrerlosen Transportfahrzeug (FTF), inklusive dessen Auftragssteuerung, dem Roboter mit Steuerung und dem Auftragswesen für die

Erstellung der Kommissionier-Sequenz. Das FTF versorgt den Roboter bedarfsgerecht mit den angeforderten Teilen und tauscht die Behälter dynamisch aus. Für die Verwendung des Modells zur virtuellen Inbetriebnahme des Leitsystems mussten Anpassungen vorgenommen werden (siehe Kapitel 4). Über eine Schnittstelle werden einfache Textnachrichten für Aufträge und Rückmeldungen in Richtung Leitsystem gesendet. Ein Adapter wandelt die Nachrichten in das Format der Schnittstellen der Produkivsysteme um, mit denen im Realbetrieb interagiert wird. Das Leitsystem sendet Aufträge an den Roboter und das FTF zurück, die im Adapter wieder in Textnachrichten umgewandelt werden und im Simulationsmodell entsprechende Methoden zur Steuerung der Komponenten auslösen.

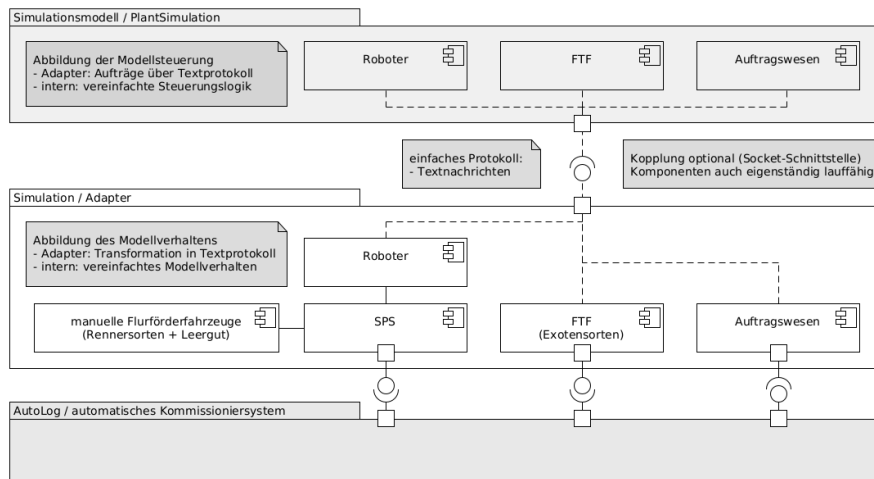


Abbildung 1: Übersicht der Systemarchitektur der VIBN

### 3.2 Prozesse und Funktionalität des Leitsystems

Zentrale Aufgabe des Leitsystems ist die Steuerung des automatischen Kommissionierungsprozesses entsprechend der eingehenden Aufträge. Neben dem Roboter für die eigentliche Kommissionierung sind daran mehrere FTF für die Zuführung von Exotensorten sowie den Transport fertig beladener Sequenzwagen zur Montagelinie beteiligt. Während für letztere nur ein Abfahrtsignal gesendet werden muss und sie ansonsten unabhängig vom Leitsystem arbeiten, ist die Erzeugung und Überwachung von Transportaufträgen zur zeitlich optimierten Bereitstellung von Exotensorten eine wichtige Teilaufgabe des Leitsystems. Unter Berücksichtigung von Behälterfüllständen, Anstellsituation und auch der Auftragsreihenfolge muss das System Transportaufträge einplanen, an das FTF übergeben und ihre Ausführung überwachen. Behältertransport und -tausch erfolgen dabei parallel zu Roboterbewegungen (dynamische Anstellung). Die dafür notwendige Synchronisation wurde in Form einer virtuellen Schranke am Behälteranstellplatz umgesetzt, nachfolgend Behältersperre genannt, die einen Behälterwechsel so lange blockiert, wie der Roboter mit der Teileentnahme beschäftigt ist. Die Synchronisation auf Seiten des Roboters wird gewährleistet durch den Erhalt der Steuerbefehle erst bei Verfügbarkeit des Materials.

Zur Minimierung von Stillstandszeiten des Roboters wird ein Genetischer Algorithmus verwendet, der die vom FTS durchzuführenden Tauschoperationen sowie Leergutfahrten für Behälter mit Exotensorten optimiert. Dabei kann gegebenenfalls auch die Reihenfolge von Greifoperationen innerhalb der Aufträge angepasst werden, soweit die Anlage bzw. der Sequenzwagen eine freie Ablagereihenfolge unterstützt. Für die Einhaltung der Gesamttaktzeit der Pilotanlage ist das erforderlich, da die Fahrzeiten des FTS die Prozesszeiten des Roboters um ein Mehrfaches überwiegen.

Der entstehende Plan ist die Basis für die Roboter- und FTF-Auftragssteuerung sowie die Synchronisation mit der Teileentnahme und der Behältersperre. Er dient auch zur Ankündigung manuell durchzuführender Ver- und Entsorgungsprozesse außerhalb der Kommissionierungszelle.

### **3.3 Anforderungen für die virtuelle Inbetriebnahme**

Durch die Kommunikation mit den unterschiedlichen Systemen innerhalb der Anlage (SPS, Roboter, Steuerungen der FTF) und in Verbindung mit den äußeren Ver- und Entsorgungsprozessen (Flurförderfahrzeuge, Routenzüge etc.) ist das Leitsystem einer Vielzahl von dynamischen Einflüssen und Fehlerquellen ausgesetzt. Diese können mit automatisierten Tests der einzelnen Teilkomponenten nicht ausreichend abgedeckt bzw. nachgebildet werden.

Ziel war es daher, mit einer virtuellen Nachbildung der Anlage, inklusive der äußeren Prozesse, das Leitsystem virtuell in Betrieb zu nehmen. Das heißt, die Kommissionierung einer großen Teilemenge zu simulieren sowie den Optimierungsalgorithmus bei vorgegebener Taktzeit und die FTF-Steuerung zu validieren. Um das System selbst dabei möglichst unverändert zu lassen, sollten alle virtuellen Komponenten die Schnittstellen der realen Anlage nachbilden. Die Simulation sollte also die Übermittlung von Auftragsdaten an das übergeordnete Leitsystem, das Verhalten von Roboter und Sensorik (SPS), das Verhalten der FTF sowie die äußeren Prozesse (Behältertausch) beinhalten.

### **3.4 Aufbau und Ablauflogik des Simulations-Modells**

Die Programmsteuerung des ursprünglichen Modells besteht aus mehreren Teilen: der Sequenzgenerierung, der Auftragsabwicklung, der Behälterverwaltung, der FTF-Auftragssteuerung, der Robotersteuerung und der FTF-Routenverwaltung.

Bei der Sequenzgenerierung generiert das Programm eine zufällige Abfolge von Kundenaufträgen entsprechend einer vorgegebenen Häufigkeitsverteilung. Es werden sowohl Renner-Bauteile als auch Exoten-Bauteile unterschieden. Exoten-Bauteile werden vom FTF am Kommissionierungs-Roboter bereitgestellt. Der Versorgungsprozess für die Renner-Bauteile steht nicht im Fokus. Hier wird eine unendliche Quelle angenommen. Die Auftragsabwicklung prüft dieses Kriterium in Verbindung mit der Materialverfügbarkeit an den Lagerplätzen und erstellt einen FTS-Auftrag mit FTF-Auftragsnummer, Lager- und Zielort. Die FTF-Auftragssteuerung ordnet den FTF die entsprechenden Aufträge zu und plant die Auftragsabwicklung. Die FTF-Routenverwaltung berechnet die FTF-Fahrstrecke zwischen aktuellem Entnahme- und Abstellplatz und plant das Fahrzeug entsprechend zeitlich ein. Die Behälterverwaltung steuert den Nachschub voller Behälter mit

Exoten-Bauteilen im Austausch mit leeren Behältern ein. Die Robotersteuerung bestimmt, wann und wo der Roboter das angeforderte Bauteil aufnimmt und in Sequenz auf die Ablage legt. Hat das FTF den Bereitstellplatz erreicht, kann der Roboter mit der Bauteilentnahme aus dem Behälter beginnen. Der Übergabeprozess zwischen FTF und Roboter ist für den Zweck der Anwendung unbedeutend. Der Roboter selbst wird lediglich mit einer Handhabungszeit von circa 30 Sekunden zwischen Entnahme und Ablage modelliert. Nach Entnahme des Bauteils wird der Behälter für weitere Transporte durch das FTF freigegeben. Sind aktuell keine Transportaufträge vorhanden, kehrt es zur nahegelegenen Warteposition zurück. Kommissionierungsaufträge werden aufgrund der Perlenkette strikt nach dem FIFO-Prinzip eingesteuert. Abbildung 2 zeigt die Beziehung zwischen den einzelnen Steuerungen.

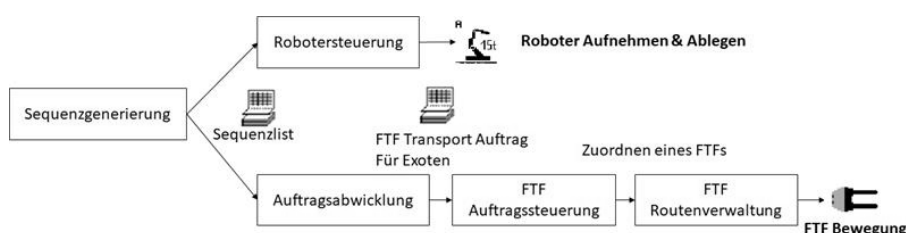


Abbildung 2: Relationen-Modell der Simulationskomponenten

## 4 Methodik

### 4.1 Kommunikation zwischen Leitsystem und Simulationsmodell

Bereits während der Entwicklung des Softwaresystems wurden automatisierte Tests erstellt, um sicherzustellen, dass Änderungen oder neue Funktionen keine Regressionen verursachen. Diese Tests wurden zunächst getrennt für die einzelnen Bestandteile der Software ausgeführt. Die angesprochene Komplexität im Zusammenspiel zwischen eingehenden Aufträgen, der Planung entsprechender Roboter- und FTS-Operationen sowie deren Abarbeitung durch die einzelnen, unabhängigen Systeme machte es jedoch erforderlich, vollständige Testläufe mit allen Komponenten durchführen zu können. Dazu wurden die in der frühen Entwicklungsphase, für die initialen Testszenarien entwickelten Bausteine zu einer vorerst deterministisch simulierten Umgebung kombiniert. Mit ihnen wurden das Verhalten von Roboter und FTS vereinfacht nachgebildet und die realen Schnittstellen von Auftragswesen, programmierbarer Steuerung (PLC) und FTS implementiert. Auf diese Weise war es möglich, frühzeitig vollautomatische Testläufe ausführen zu können.

Im Sinne der Qualitätssicherung wurde die Software anschließend gegen ein stochastisches, detaillierteres Simulationsmodell in Siemens Plant Simulation getestet. Es erzeugt ERP-, SPS- und Sensordaten und übermittelt diese an das Leitsystem. Dieses wiederum übermittelt die Steuerungsbefehle an die Systemelemente im Modell und steuert dort Roboter und FTF (siehe Abbildung 3).

Für die Kopplung beider Systeme wurde die vereinfachte Simulation zu einem Adapter mit Socket-Schnittstelle erweitert, der die im Realsystem verwendeten Schnittstellen für die Anlagensteuerung und das FTS sowie in Richtung Plant Simulation ein einfaches Textprotokoll anbietet. Dadurch ist es möglich, das Softwaresystem ohne Anpassungen, sowohl zusammen mit dem Simulationsmodell als auch in der realen Anwendung, auszuführen.

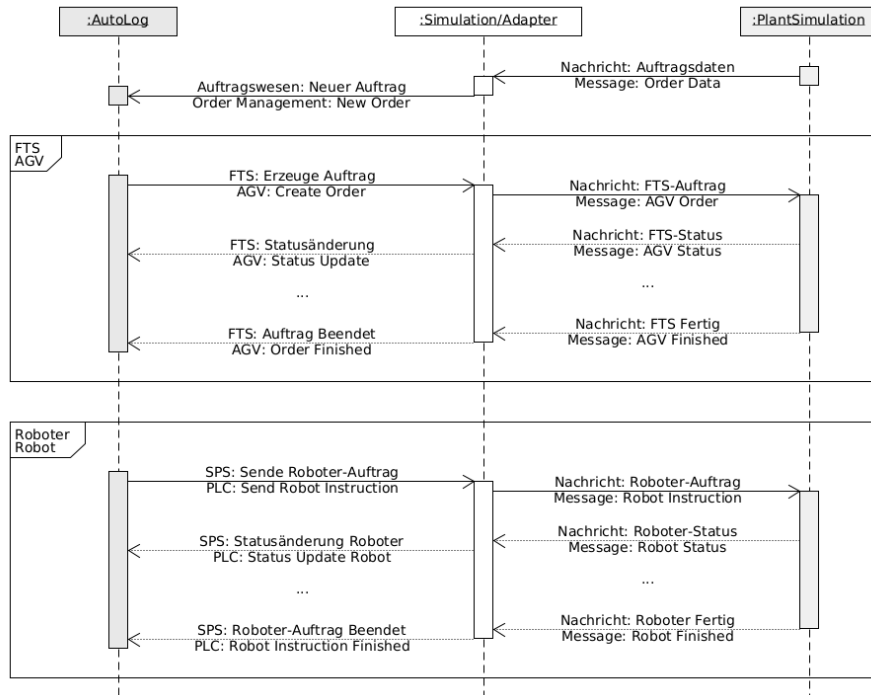


Abbildung 3: Sequenzdiagramm der VIBN (Ausschnitt)

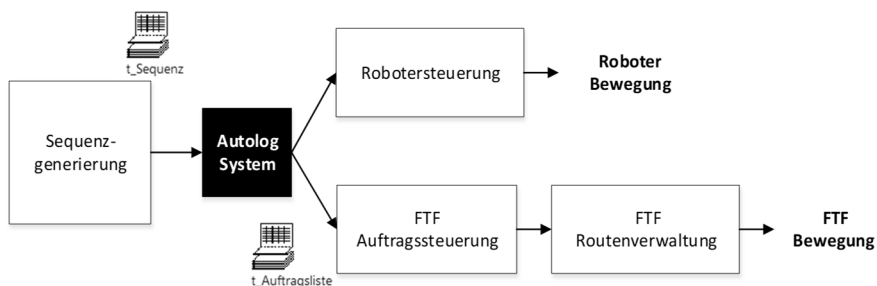
## 4.2 Befähigung des Logistikmodells als emuliertes Realsystem

Um die Kontrolle des FTS und des Roboters im Modell durch eine externe Steuerung zu ermöglichen, müssen die Steuerungsmethoden der entsprechenden Funktionen im initialen Simulationsmodell angepasst werden.

Aus der Abbildung im obigen Abschnitt ist ersichtlich, dass das externe Leitsystem AutoLog eine Sequenzliste aus dem Modell erhält, auf deren Basis es Aufträge für die Beladung der Sequenzwagen generiert. Das Leitsystem bestimmt die optimale Teilreihenfolge unter Berücksichtigung notwendiger Transporte von Exoten-Behältern, um die Effizienz des FTS und dessen Transportleistung zu erhöhen. Dies wird unter anderem durch eine gezielte und vorausschauende Verwendung der Sequenzliste gewährleistet. Ein Beispiel ist ein Verbleib eines bestimmten Behälters am Roboter, falls Teile daraus demnächst wieder angefordert werden. So greift AutoLog gezielt in die Beauftragung des FTS im Simulationsmodell ein und eine strikte FIFO-Reihenfolge kann zum Teil aufgebrochen werden. Gleichzeitig erfasst das Leitsystem zu jeder Zeit den Behälterfüllstand und erteilt bei Bedarf rechtzeitig



Entsorgungsaufträge. Dies erfordert, dass die ursprüngliche FTF-Auftragserzeugungsmethode des Modells vollständig inaktiv ist und diese Funktion dem Leitsystem überlassen wird. Darüber hinaus bestimmt es die Reihenfolge beziehungsweise Entnahmeposition der Teile im Behälter, was eine Steuerung der Entnahme des Roboters nach sich zieht. Um eine flexiblere Steuerung des Roboters zu ermöglichen, muss das ursprüngliche Modell in den Steuerungsmodus "Kommissionieren anhand der vom Leitsystem vorgegebenen Position des Bauteils" geändert werden. Gegen das vorzeitige Tauschen von Behältern am Entnahmeplatz und als Synchronisierung mit den Roboterbewegungen, wurde im Modell die erwähnte Behälterschranke umgesetzt. Nach Quittierung der Teileentnahme und Freigabe durch das Leitsystem wird der „pausierte“ Transportauftrag im Simulationsmodell fortgesetzt. So kann das FTF Transportaufträge eher starten, anstatt auf das Prozessende des Roboters zu warten. Der neue Programmablaufplan des Simulationsmodells sieht wie folgt aus:



**Abbildung 4:** Sequenzdiagramm Simulationsmodell nach verkoppelt mit AutoLog

Der Datenaustausch zu AutoLog erfolgt durch einfache Textnachrichten über eine Socket-Schnittstelle. Über eine Schlüssel-tabelle werden die unterschiedlichen Objekt-namen von Simulationsmodell und Leitsystem gepaart sowie das Format und die Interpretation der von beiden Seiten zu übertragenden Nachrichten festgelegt. Entsprechend der in der Schnittstelle definierten Steuerungsmethode wird der übergebene Informationssatz in einzelne Anweisungen für FTF, Roboter oder SPS der Kommissionierungszelle zerlegt. Prozessereignisse, wie Start, Fortschritt und Ende, werden zurück an das Leitsystem gemeldet. Wie in Abbildung 5 links dargestellt, zeigt die Konsole des Modells die vom Adapter eingegangenen Befehlsnachrichten an. Die Rückruf-Methode des Sockets teilt die Nachricht auf und weist sie auf verschiedene Objekte (FTF, Roboter, Schranke) zu. Analog werden über die Socket-Schnittstelle auch Antworten versendet. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die Rückmeldung, die der Adapter vom Modell erhält.



*Abbildung 5: Beispiele für Kommunikationsnachrichten zwischen Modell und Adapter*

## 5 Ergebnisse

Die beschriebene Anlagensimulation hat umfangreiche Tests des Systems AutoLog mit mehreren zehntausend Teilen ermöglicht. Dabei wurde sowohl auf das vereinfachte (zeitbasierte) Systemverhalten in der Komponente Simulation/Adapter als auch auf die umfangreichere Variante in Plant-Simulation-Modell zurückgegriffen. Durch das dynamische Zusammenspiel der Komponenten konnte eine Vielzahl von Unzulänglichkeiten und Fehlern im Planungs- und Optimierungsalgorithmus, in den Ausführungseinheiten für Roboter- und FTS-Operationen sowie deren Synchronisation (Behältersperre) identifiziert und behoben werden. Hauptfehlerklassen waren dabei Stillstände durch fehlerhafte Abhängigkeiten zwischen Operationen (Planung) und Wettlaufsituationen bei deren Ausführung und Synchronisation. Insgesamt sind aus der Analyse von fehlgeschlagenen Simulationsläufen 15 neue Regressionstests entstanden, die die jeweilige Fehlersituation nachbilden und ihre korrekte Handhabung sicherstellen.

Als Rückkopplung zum Simulationsmodell und als Anpassung dessen wurde die, bereits erwähnte, Behältersperre am Bereitstellplatz integriert. Damit konnten Bewegungen des Roboters und des FTF im Modell teilweise parallelisiert und zeitlich optimiert werden. Die Wartezeit des FTF am Behälteranstellplatz verringerte sich um circa zwei Drittel. Die Leerfahrten zur erwähnten Warteposition fallen abhängig vom Zielort und der Auftragsreihenfolge zeitlich unterschiedlich aus. Hier wurden keine genauen quantitativen Zahlen erfasst. Dennoch wurde eine merkliche Verringerung der Leerfahrten beobachtet. Eine Quittierung von Entnahme- und Transportvorgängen zwischen den Komponenten Roboter, Behälter und FTF ist damit anforderungsgerecht umgesetzt worden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch Modularisierung und Flexibilisierung von Kommissionierungssystemen skaliert deren technische Entwicklung, da sie Standort unabhängig und in jeweils benötigter Modulanzahl eingesetzt werden kann. Damit skaliert auch das entwickelte Leitsystem. Durch eine entwicklungsbegleitende VIBN, welche unterschiedliche Kombinationen solcher Kommissionierungsmodule berücksichtigen kann und deren Einbindung in die informationstechnische Systemwelt testet, kann die Anlaufphase bis zum Serienbetrieb kontrolliert klein gehalten werden. Zudem sind Testszenarien virtuell schneller zu evaluieren als am realen System.

Das Simulationsmodell mit seiner aktuellen Anbindung an das Leitsystem ist geeignet für zukünftige Erweiterungen. So sollen demnächst, ausgehend vom einzelnen Kommissionierungssystem, größere Produktionsbereiche oder auch ganze Produktionssysteme emuliert werden und mit den entwickelten Schnittstellen einfach an AutoLog anzubinden sein.

## Literatur

- Bernard, A.: Vollgas in der Fertigungsstraße. Ein aktuelles Forschungsprojekt von Volkswagen und Siemens. Siemens AG 2019. Online verfügbar unter <https://new.siemens.com/de/de/unternehmen/stories/forschung-technologien/digitaler-zwilling/digital-twin-cars-production-line.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2021.
- Festo SE & Co. KG: Forschungsprojekt ENTOC. Verhaltensmodelle von Komponenten für virtuelle Inbetriebnahme. Online verfügbar unter <https://www.festo.com/group/de/cms/12827.htm>, zuletzt geprüft am 18.05.2021.
- Grzone, P.; Knüpfer, P.; Wilsky P.: Anwendungsorientierte Simulationsbausteine für die schlanke virtuelle Inbetriebnahme verketteter Produktionssysteme. In: Matthias Putz und Andreas Schlegel (Hg.): *Simulation in Produktion und Logistik* 2019. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- Kaffka, J.: Virtuelle Inbetriebnahme von Logistiksystemen. Der Einsatz des Emulation Controllers und von Demo3D als Erfolgsfaktor. SimPlan Integrations GmbH. 2019. Online verfügbar unter [https://www.simplan.de/wp-content/uploads/Pr%C3%A4sentation\\_ASIM\\_2019\\_Jan\\_Kaffka\\_Virtuelle-Inbetriebnahme-von-Logistiksystemen-Der-Einsatz-des-Emulation-Controllers-und-von-Demo3D-als-Erfolgsfaktor\\_16zu9.pdf](https://www.simplan.de/wp-content/uploads/Pr%C3%A4sentation_ASIM_2019_Jan_Kaffka_Virtuelle-Inbetriebnahme-von-Logistiksystemen-Der-Einsatz-des-Emulation-Controllers-und-von-Demo3D-als-Erfolgsfaktor_16zu9.pdf), zuletzt geprüft am 18.05.2021.
- Makris, S.; Michalos, G.; Chryssolouris, G.: Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots. In: *Advances in Decision Sciences* 2012, S. 1–11.
- Riedel, O.; Verl, A.; Kübler, K.; Jaensch, F.; Deuse, J.; Nöhring, F.; Borggräfe, T.; Richter, R.: Best Practices zur Virtuellen Inbetriebnahme. Hg. v. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. VDMA. Frankfurt am Main, 2020. Online verfügbar unter [https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/57246917/VDMA\\_Leitfaden\\_VIBN\\_1607503338494.pdf/c6b632a6-ebc2-113e-5753-073e4b28eb34](https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/57246917/VDMA_Leitfaden_VIBN_1607503338494.pdf/c6b632a6-ebc2-113e-5753-073e4b28eb34), zuletzt geprüft am 19.05.2021.
- Scheer, A.-W. : Industrie 4.0: Von der Vision zur Implementierung. Whitepaper. 2015. Online verfügbar unter [https://www.scheer-group.com/Scheer/uploads/2016/03/Scheer-Whitepaper\\_Industrie-4-0\\_DE.pdf](https://www.scheer-group.com/Scheer/uploads/2016/03/Scheer-Whitepaper_Industrie-4-0_DE.pdf), zuletzt geprüft am 14.04.2021.
- Süß, S.; Strahilov, A.; Diedrich, C.: Behaviour Simulation for Virtual Commissioning using Co-Simulation. In: 20th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). September 8 - 11, 2015, Luxembourg. Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation; ETFA. Piscataway, NJ: IEEE.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, 2019-11: Entwicklung technischer Systeme und Produkte. 2019.
- Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE-Richtlinie 3693 Blatt 1, 2016-08: Virtuelle Inbetriebnahme. 2016.

Wallner, P.: Virtuelle Inbetriebnahme im Maschinenbau. In: *Computer und Automation* (1/2021), S. 18–20. 2021.

Westkämper, E.: Digitales Engineering von Fabriken und Prozessen. In: Fertigungstechnisches Kolloquium (FTK) // Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium am 10. und 11. September in Stuttgart ; [Tagungsband]. Stuttgart: Ges. für Fertigungstechnik, 2008, S. 427–452.