

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Einsatz von Process-Mining zur Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen in Produktion und Logistik

Use of Process Mining to Verify and Validate Simulation Models in Production and Logistics

Felix Özkul, Robin Sutherland, Sigrid Wenzel, Universität Kassel, Kassel (Germany), felix.oezkul@uni-kassel.de, robin.sutherland@uni-kassel.de, s.wenzel@uni-kassel.de

Sven Spieckermann, SimPlan AG, Hanau (Germany), sven.spieckermann@simplan.de

Abstract: Verification and validation (V&V) are imperative to ensure the success of a simulation study but are often insufficiently considered in practice due to the effort associated with V&V-activities. This contribution discusses the application of process mining techniques to check the validity of discrete event simulation models in production and logistics. For this purpose, we present a morphological box which highlights the scope of process mining in the context of V&V for simulation models and distinguishes between different V&V items, aspects of validity, and V&V-criteria. Subsequently, the paper describes how a real system can be related to the behaviour of a simulation model and presents two scenarios for process mining-supported V&V using a reference example.

1 Motivation

Der Einsatz der ereignisdiskreten Simulation ermöglicht die experimentelle Untersuchung komplexer Produktions- und Logistiksysteme unter Berücksichtigung ihres stochastischen Zeitverhaltens (Gutenschwager et al. 2017) und hat sich seit vielen Jahren branchenübergreifend bewährt (Wenzel und Peter 2013). Die erfolgreiche Anwendung der Simulation erfordert den Einsatz eines Simulationsvorgehensmodells mit verschiedenen Phasen (wie beispielsweise in Rabe et al. (2008) dargestellt), die von Aktivitäten zur Verifikation und Validierung (V&V) begleitet werden. Verifikation beschäftigt sich mit der Überprüfung der Korrektheit der erzeugten Modelle, verwendeten oder generierten Daten und der implementierten Software

(Balci 2003). Sie beurteilt, ob ein Phasenergebnis korrekt aus einem vorangegangenen Phasenergebnis transformiert wurde (Rabe et al. 2008). Bei der Validierung wird hingegen überprüft, ob ein Simulationsmodell das modellierte Systemverhalten mit einer hinreichenden Genauigkeit widerspiegelt und sichergestellt werden kann, dass das Simulationsmodell in Bezug auf ein definiertes Untersuchungsziel geeignet und damit glaubwürdig ist (Rabe et al. 2008). Für die Durchführung der V&V stehen verschiedene Techniken zur Verfügung; der vorliegende Beitrag untersucht Process-Mining als eine neue mögliche V&V-Technik für die ereignisdiskrete Simulation. Durch die Anwendung von Process-Mining-Techniken werden die Analyse und Gestaltung von Prozessen auf Basis operativer Daten, die in Form sogenannter Eventlogs vorliegen, ermöglicht (van der Aalst 2016). Die bekanntesten Techniken des Process-Minings sind die Prozessextraktion (*Process Discovery*), die (Prozess-)Konformitätskontrolle (*Conformance Checking*), Performance Analysen sowie die Prozessmodellerweiterung (van der Aalst 2016) (für weiterführende Techniken siehe van der Aalst (2022)) – die Techniken werden von Process-Mining-Werkzeugen in unterschiedlichen Umfängen unterstützt (für eine Übersicht kommerzieller Werkzeuge siehe Stierle et al. (2021)).

Dieser Beitrag beschreibt Anwendungsfelder für den Einsatz von Process-Mining – dabei vor allem Konformitätskontrolltechniken – zur V&V von ausführbaren Simulationsmodellen anhand von Szenarien. Hierzu wird zunächst eine wissenschaftliche Abgrenzung zu verwandten Forschungsrichtungen im Kontext der V&V vorgenommen (Kapitel 2), bevor der Anwendungsrahmen für die V&V auf Basis von Process-Mining in Kapitel 3 vorgestellt wird. In Kapitel 4 wird die Konformitätskontrolle als Basis für die Beurteilung der Simulationsmodellgültigkeit erläutert, in Kapitel 5 werden anschließend anhand eines Referenzsystems Szenarien für die V&V formuliert und diskutiert. Abgerundet wird der Beitrag durch ein Fazit und einen Ausblick (Kapitel 6).

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Neben Techniken und Vorgehensmodellen zur V&V existieren Forschungsansätze zur Beurteilung der Güte von V&V-Aktivitäten wie bspw. in Wang und Lehmann (2019), die auch das ausführbare Modell betreffen. Beim Einsatz von Process-Mining steht die Überprüfung des Prozessverhaltens im Vordergrund, wodurch sich erste Forschungsarbeiten zur V&V auf Basis von Process-Mining begründen lassen. So skizziert van der Aalst (2018) ein generisches Szenario, bei dem simulationsgenerierte Eventlogs als Analysegegenstand für Process-Mining-Techniken genutzt werden, und Jadrić et al. (2020) sprechen an, dass Process-Mining für V&V-Zwecke genutzt werden kann. Sitova und Pecerska (2019) demonstrieren eine fallstudienbezogene Anwendung von Process-Mining zur V&V eines Simulationsmodells aus der Transportlogistik, bei der simulierte Routen in exportierten künstlichen Eventlogs auf Grundlage der Ereignisliste des ausführbaren Simulationsmodells als Traces extrahiert und im Anschluss mithilfe von Process-Mining näher analysiert werden. Langer et al. (2021) und Özkul et al. (2022) beschreiben allgemein den interoperablen Einsatz von Process-Mining und ereignisdiskreter Simulation in Produktion und Logistik.

3 Anwendungsrahmen für den Einsatz von Process-Mining zur V&V ausführbarer Simulationsmodelle

V&V dienen dem Aufzeigen von Fehlern in Modellen oder in der Transformation von Phasenergebnissen und beziehen sich auf den Nachweis der Glaubwürdigkeit eines Modells (bzw. allgemeiner eines Phasenergebnisses in einer Simulationsstudie). Diese Tatsache ist auch Grundlage für die Anwendung von Process-Mining in dem hier beschriebenen Kontext, der sich auf die V&V von ausführbaren Simulationsmodellen als ein konkretes Phasenergebnis beschränkt. Für den Einsatz von Process-Mining lassen sich V&V-Gegenstände, unterschiedliche V&V-Aspekte der Gültigkeit und V&V-Kriterien mit unterschiedlichen Ausprägungen differenzieren. Abbildung 1 stellt den für den Einsatz von Process-Mining relevanten Anwendungsrahmen der V&V in Form eines morphologischen Kastens dar.

V&V-Gegenstände	Wirkstruktur		Prozesse			Strategien	
V&V-Aspekte der Gültigkeit	Strukturgültigkeit		Verhaltensgültigkeit			Empirische Gültigkeit	
V&V-Kriterien	Vollständigkeit	Konsistenz	Genauigkeit	Aktualität	Eignung	Plausibilität	Verständlichkeit

Abbildung 1: Morphologischer Kasten als Anwendungsrahmen für den Einsatz von Process-Mining zur V&V

Als V&V-Gegenstände auf Basis von Process-Mining können Prozesse, Strategien und die Wirkstrukturen zwischen den Modellelementen unterschieden werden.

Die zu überprüfenden Aspekte der Gültigkeit umfassen nach Bossel (2004) die Strukturgültigkeit, die Verhaltensgültigkeit, die empirische Gültigkeit sowie die Anwendungsgültigkeit. Die Strukturgültigkeit beschreibt die hinreichende Übereinstimmung eines Modells im Hinblick auf die Strukturbeziehungen des abgebildeten Systems, während die Verhaltensgültigkeit die qualitative Übereinstimmung des dynamischen Verhaltens zwischen Modell und System – bemessen an den Ein- und Ausgangsgrößen – ausdrückt. Die empirische Gültigkeit umfasst die Gültigkeit der Experimentierergebnisse des Modells im Hinblick auf damit verbundene Mess- und Experimentierwerte aus dem Untersuchungssystem. Alle drei Gültigkeitsaspekte lassen eine Anwendung des Process-Minings in Bezug auf die V&V-Gegenstände zu. Die Anwendungsgültigkeit überprüft das Simulationsmodell hinsichtlich des Modellzwecks und der Eignung für die Aufgabenstellung; derartige Überprüfungen sind mit Process-Mining nicht möglich – daher wird die Anwendungsgültigkeit nicht in den morphologischen Kasten aufgenommen.

Zur Beurteilung der Gültigkeit eines Simulationsmodells existieren zudem verschiedene V&V-Kriterien, die zur Sicherstellung der Korrektheit von Inhalt und Struktur, der Angemessenheit von Ergebnissen sowie zur Beurteilung der Durchführbarkeit dienen (Rabe et al. 2008). Mithilfe von Process-Mining können insbesondere Inhalt und Struktur der Simulationsmodelle und damit nach Rabe et al. (2008) Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit und Aktualität untersucht werden. Die Angemessenheit von Ergebnissen für die Anwendung wird mit den Kriterien Eignung, Plausibilität und Verständlichkeit bewertet und lässt ebenfalls eine Beurteilung durch Process-Mining zu. So können Plausibilität und Verständlichkeit durch ein mittels Process-Mining

extrahiertes semi-formales Prozessmodell verbessert werden und Grundlage für die Dokumentation des Simulationsmodells sein; die Eignung im Sinne einer Passgenauigkeit (siehe Rabe et al. 2008) wird durch die Beurteilung der Prozessmodellgüte mithilfe der genannten Konformitätstechniken sichergestellt. Die Durchführbarkeit hingegen bezieht sich eher auf die Beurteilung der Machbarkeit einer Simulationsstudie als Projekt und der Verfügbarkeit von beispielsweise Daten und Personal. Daher wird dieser Aspekt im morphologischen Kasten nicht näher betrachtet.

4 Gegenüberstellung von Untersuchungssystem- und Simulationsmodellverhalten mittels Konformitätskontrolle

Zur Umsetzung von V&V-Szenarien für Simulationsmodelle auf Basis von Process-Mining bilden Eventlogs und Prozessmodelle die Grundlage für den Vergleich zwischen dem Untersuchungssystem und dem Simulationsmodell. Abbildung 2 visualisiert diesen grundlegenden Zusammenhang.

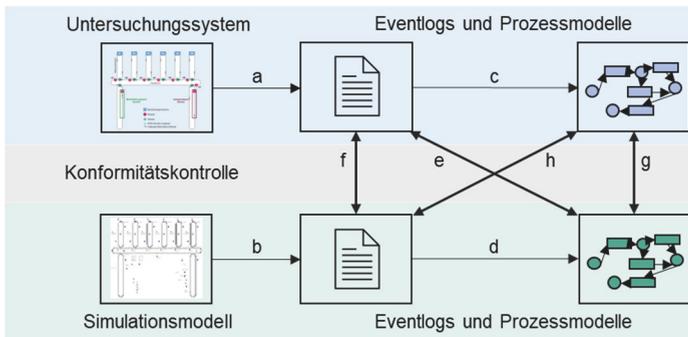


Abbildung 2: Relationen zwischen Untersuchungssystem und Simulationsmodell im Kontext der V&V auf Basis von Process-Mining

Die Abläufe im Untersuchungssystem und im Simulationsmodell werden mittels Eventlogs protokolliert (a und b), aus denen mithilfe von sogenannten Prozessextraktionsalgorithmen Prozessmodelle extrahiert werden können (c und d). Die Eventlogs und Prozessmodelle des Systems und des Simulationsmodells können im Rahmen von Konformitätskontrollen einander gegenübergestellt werden (e, f, g und h), um zu beurteilen, zu welchem Grad Eventlogs und Modelle übereinstimmen. Alle grau hinterlegten Relationen e bis h sind für die Konformitätskontrolle im Rahmen der V&V relevant, erfordern jedoch teils unterschiedliche Herangehensweisen, die sich hinsichtlich ihres Aufwands und ihrer Konformitätsbeurteilung unterscheiden. Hierbei bietet das Process-Mining Techniken und Qualitätsdimensionen zur Beurteilung der Konformität. Die wichtigste Kennzahl ist dabei die *Fitness*, die allgemein ein Maß für die Fähigkeit eines Prozessmodells ist, die in einem Eventlog protokollierten Aktivitätssequenzen (Traces) korrekt wiederzugeben (Carmona et al. 2018). Jedoch lässt sich diese Fitness ebenfalls zwischen zwei Prozessmodellen bewerten (g). Zur ganzheitlichen Beurteilung der Prozessmodellgüte existieren im Process-Mining darüber hinaus die Präzision, die Generalisierfähigkeit und die Einfachheit (Carmona et al.

2018) als Qualitätsdimensionen für Prozessmodelle, die jedoch für die V&V von Simulationsmodellen eine eher untergeordnete Rolle einnehmen, da im Rahmen der V&V der Nachweis der nicht hinreichenden Gültigkeit eines Simulationsmodells im Vordergrund steht (i. e., dass die Fitness zwischen Modell und System gering ist). Im Hinblick auf die V&V-Kriterien bilden sie jedoch die Grundlage für die Beurteilung der Simulationsmodellgültigkeit.

5 Szenarien für die Process-Mining-gestützte V&V

Da eine Beschreibung aller denkbaren Szenarien an dieser Stelle nicht möglich ist, werden jeweils ein Szenario zur V&V der Wirkstruktur (5.2) und zur V&V von Strategien (5.3) erläutert. Hierbei werden ebenfalls die Bezüge zu den Gültigkeitsaspekten und den V&V-Kriterien hergestellt. Zur besseren Verständlichkeit beziehen sich die Szenarien auf ein Referenzsystem, das nachfolgend kurz erläutert wird.

5.1 Referenzsystem für die V&V

Abbildung 3 stellt das Referenzsystem dieses Beitrags (ein vereinfachtes universitäres Laborsystem) schematisch dar. Ausgehend vom Bereitstellungsband (Quelle) werden mit fiktiven Objekten beladene Warenträger über ein Hauptband zum Entnahmeband (Senke) gefördert. Es existieren drei verschiedene Objekttypen (A, B, C) mit unterschiedlichen Bearbeitungsumfängen, die an den Maschinen (M1 bis M6) bearbeitet werden, bevor sie zum Entnahmeband gefördert werden. Objekttyp A passiert alle Maschinen in linearer Ordnung, Objekttyp B wird nur an M1, M2 & M3, und Objekttyp C nur an M4, M5 & M6 bearbeitet.

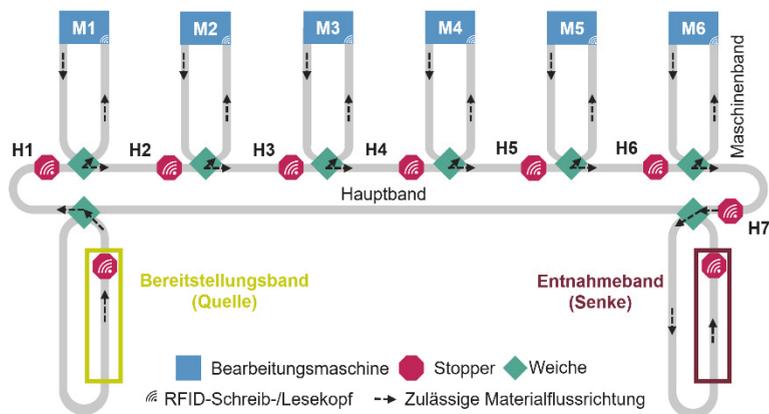


Abbildung 3: Schema des Referenzuntersuchungssystems

Ein Auftrag besteht immer aus einem Objekttyp. Die Warenträger sind mithilfe von RFID-Transpondern, die sich am Warenträger befinden, im System unterscheidbar und passieren an den gekennzeichneten Stellen (Quelle, Senke, Maschinen M1 – M6 und Positionen auf dem Hauptband H1 – H7) Schreib-/Lesegeräte, an denen die Warenträger gestoppt und ausgelesen werden. Zulässige Förderrichtungen zwischen

Quelle und Senke sind ebenfalls im Schema dargestellt. Beim Auslesen werden der aktuelle Lesevorgang (*Aktivität*) inklusive eines *Zeitstempels*, einer *Auftrags-ID* und der auf dem Wareenträger geförderte auftragsspezifische Objekttyp (*ObjTyp*) in einem Eventlog gespeichert. Die Struktur des Eventlogs ist in Tabelle 1 dargestellt. Blau eingefärbt sind die Eventlog-Datendimensionen, die für die Anwendung von Process-Mining zwingend erforderlich sind (i. e. der Zeitstempel, der Auftragsidentifikator und die Bezeichnung der durch das Ereignis angestoßenen Aktivität).

Ressource (i. e. das aktivitätsausführende Systemelement) und *ObjTyp* beschreiben Ereignisse im Eventlog näher. Das Attribut *Ressource* stellt einen räumlichen Bezug zwischen Aktivität und System her; zwar weisen die Aktivitätsbezeichnungen im vorgestellten Referenzsystem einen direkten Bezug zur ausführenden Ressource auf, jedoch lässt sich dieser Bezug in der industriellen Anwendung nicht gewährleisten, weshalb ein Mapping zwischen der prozessorientierten und der strukturorientierten Systemsicht notwendig ist (Özkul et al. 2022). *ObjTyp* ist für die Analyse von Entscheidungspunkten und somit zur V&V von Steuerungen (siehe 5.3) relevant.

Tabelle 1: Auszug eines Eventlogs für das Referenzsystem

#	Zeitstempel	Auftrag	Aktivität	Ressource	ObjTyp
0	22-12-15 11:52:31	1	“log_an_Quelle“	Bereitstellungsband	A
1	22-12-15 11:52:41	2	“log_an_Quelle“	Bereitstellungsband	C
2	22-12-15 11:52:43	1	“log_an_H1“	H1	A
...
n	22-12-15 12:56:23	m	“log_an_Senke“	Entnahmeband	B

Abbildung 4 beschreibt das zugehörige Referenzsystemverhalten anhand eines Petri-Netzes (zu Petri-Netzen vgl. van der Aalst (2016)). Die konkrete Sequenz an Leseaktivitäten (Transitionen) eines Auftrags hängt vom geförderten Objekttyp ab; so tritt die Aktivität „log_an_M1“ nur dann auf, wenn der Objekttyp eines Auftrags nicht dem Typ C entspricht; Objekte vom Typ C überspringen „log_an_M1“ (das Überspringen ist dargestellt durch schwarz eingefärbte *Silent Transitions*).

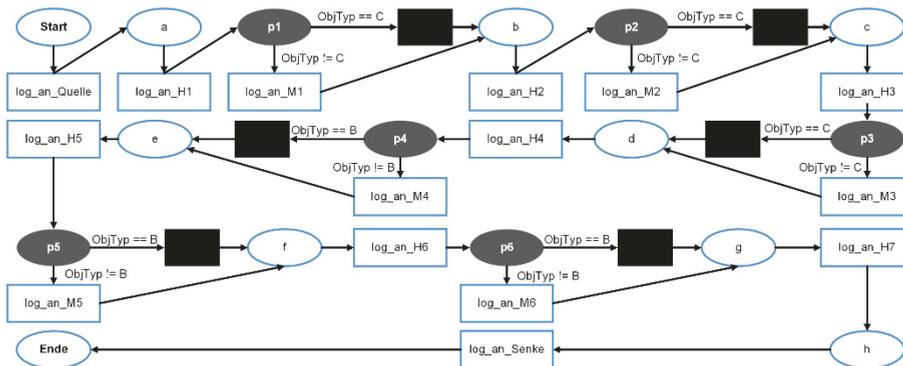


Abbildung 4: Petri-Netz zur Beschreibung des Referenzsystemverhaltens mit grau eingefärbten Entscheidungspunkten (gleich ==, ungleich !=)

5.2 V&V der Wirkstruktur

Zur Überprüfung der Wirkstruktur des Simulationsmodells hinsichtlich seiner Gültigkeit in Bezug auf das Referenzsystem (siehe 5.1) werden zunächst aus dem ausführbaren Simulationsmodell Eventlogs generiert, deren Datengranularität sich am Eventlog aus dem Untersuchungssystem in Tabelle 1 orientiert. Auf Grundlage des simulationsbasierten Eventlogs wird ein Prozessmodell extrahiert, dessen Konformität im Hinblick auf den systemseitig vorhandenen Eventlog untersucht wird (Die referenzierten Relationen sind a, b, d und e aus Abbildung 2). Die Strukturbeziehungen der Referenzsystemelemente stehen in direkter Beziehung zur Aktivitätsstruktur des Förderprozesses, da der Eventlog eine Aktivität und die ausführende Ressource auf der Ereignisebene protokolliert (siehe Tabelle 1). Zunächst wird die Konformitätskontrolle auf Basis von Footprints (Näheres in Carmona et al. (2008)) durchgeführt und ein Fitnesswert wird für das simulationsbasierte Prozessmodell ermittelt. Werden Warenträger darin zunächst an M6 ausgelesen, bevor sie an M5 ausgelesen werden, so ist die tatsächliche Nachfolgebeziehung verletzt und die Footprint-basierte Fitness verringert sich (die Konsistenz und Plausibilität des Simulationsmodells sind somit nicht gegeben). Gleiches gilt für fehlende Aktivitäten im Prozessmodell (i. e. das Modell ist unvollständig und ungenau). Unterschreitet der Fitnesswert eine Untergrenze (abhängig von der Anwendung und Konformitätskontrolltechnik), so ist die Gültigkeit des Modells nicht gegeben. Liegt der Fitnesswert nach dem Footprint-Vergleich knapp über der Untergrenze, können ggf. aufwendigere Techniken zur Beurteilung der Fitness wie Token Replay oder Alignments eingesetzt werden.

Die Ursachen für eine nicht hinreichende Gültigkeit können durch dieses Vorgehen jedoch nicht benannt werden (Alignments können jedoch als Grundlage für weiterführende Diagnosen genutzt werden (van der Aalst 2016)). So ist es möglich, dass bspw. die Prozessnebenläufigkeit an den Entscheidungspunkten p1-p3 (in Abbildung 4) dadurch missachtet wird, dass entweder an den Verzweigungen im Simulationsmodell keine geeignete objekttypdifferenzierende Logik implementiert ist oder dass die Informationen in den Eventlogs in einem Zeitraum erhoben wurden, in dem keine Objekte vom Typ C durch das Referenzsystem gefördert wurden (i. e. die Aktualität der Daten ist nicht gegeben). Bezogen auf den in Abbildung 1 dargestellten morphologischen Kasten können primär Aussagen bezüglich der Strukturgültigkeit im Hinblick auf die V&V-Kriterien getroffen werden, die sich an der Wirkstruktur der Aktivitäten im Hinblick auf die Fitness des simulationsbasierten Prozessmodells bemessen.

5.3 V&V von Strategien

Im zweiten Szenario wird das Process-Mining genutzt, um Strategien in Simulationsmodellen anhand lokaler Entscheidungspunkte zu untersuchen und im Hinblick auf die Ursachen, die zu Entscheidungen führen, Anhaltspunkte zu bieten. So können V&V-Kriterien wie Plausibilität und Konsistenz von Strategien beurteilt werden. Die methodische Grundlage hierfür sind Entscheidungspunktanalysen sowie das weiterführende Decision-Mining. Die üblichen Prozessmodelle des Process-Minings (wie bspw. Petri-Netze) beschreiben den Kontrollfluss der Aktivitätsausführung eines Prozesses; Decision-Mining erweitert diese Sichtweise, indem Ursachen für Entscheidungen anhand von Daten in Eventlogs ermittelt werden (Näheres in de Leonie und van

der Aalst (2013)). Diese Entscheidungspunkte sind in Prozessmodellen als Bereiche erkennbar, in denen ausschließlich eine von mehreren möglichen Aktivitäten ausgeführt werden kann. In Abbildung 4 sind die relevanten Entscheidungspunkte im Referenzsystem grau eingefärbt (p1 bis p6).

Auf Grundlage des Eventlogs in Tabelle 1 kann mithilfe von Prozessextraktionsalgorithmen zunächst ein Petri-Netz entdeckt (vgl. Abbildung 4) und Entscheidungspunkte können anhand der genannten syntaktischen Eigenschaften im Modell identifiziert werden. Die Entscheidungspunkte können (sofern das Prozessmodell eine hinreichende Fitness aufweist) im Anschluss mithilfe von klassifizierenden Verfahren auf Basis der Informationen im Eventlog untersucht werden. So ist es möglich, die diskreten Nachfolgerrelationen an einem Entscheidungspunkt zu enumerieren, zu codieren (bspw. durch *One-Hot-Encoding*) und mithilfe von maschinellen Lernverfahren (ML) zu prognostizieren (i. e. den Sequenzfluss an einem Entscheidungspunkt vorauszusagen). Hierfür relevant ist die Eventlogdimension *ObjTyp*, die als Eingangsdatum für das Training eines klassifizierenden Algorithmus dient. Am Entscheidungspunkt p1 wird die nachfolgende Transition „log_an_M1“ nur dann geschaltet, wenn der aktuelle Auftrag nicht vom Typ C ist (i. e. nur Objekte vom Typ A oder B werden zu M1 gefördert). Die ermittelten logischen Ausdrücke am Entscheidungspunkt p1 ($ObjTyp \neq C$ bzw. sein Komplement $ObjTyp = C$) sind das Ergebnis der Entscheidungspunktanalyse, das als Ausgangspunkt für die Beurteilung der Gültigkeit einer implementierten Strategie in einem Simulationsmodell in Bezug auf einen Entscheidungspunkt dienen kann. So ist es möglich, die implementierte Entscheidungslogik einer Verzweigung entweder direkt anhand des Simulationsmodells oder indirekt anhand simulationsgenerierter Eventlogs dem Untersuchungssystemverhalten gegenüberzustellen.

Voraussetzungen für das beschriebene Szenario sind ein hinreichend semantisiertes Eventlog, das die relevanten Datendimensionen für das ML bereitstellt, sowie hinreichendes Domänenwissen zur Identifikation, Auswahl und ggf. Transformation relevanter Eingangsdaten.

In den etablierten Techniken der V&V knüpft der hier vorgestellte Ansatz an den Einsatz von Ursache-Wirkungs-Graphen an, in denen Ursachen als binäre Größen dargestellt (Rabe et al. 2008) und in Relation zu Aktionen gesetzt werden. Auf Grundlage der durch Decision-Mining ermittelten booleschen Ausdrücke an den Entscheidungspunkten (siehe Abbildung 4) kann eine Entscheidungstabelle, wie in Tabelle 2 durch Pseudocode dargestellt, generiert und zur Überprüfung der implementierten Simulationsmodelllogik genutzt werden. Hierbei kann die Überprüfung beispielsweise durch den Vergleich zweier Entscheidungstabellen (einer simulationsgenerierten und einer realsystembasierten) oder durch eine Reflexion im Rahmen eines Turing-Tests mit Experten (Näheres in Rabe et al. 2008) im Hinblick auf die V&V-Kriterien (siehe Kapitel 3) stattfinden. Aufgrund des Umfangs der Entscheidungstabelle ist dieses Szenario jedoch eher als Test für Teilmodelle aufzufassen.

Tabelle 2: Durch Decision-Mining ermittelte Entscheidungstabelle für Entscheidungspunkte im Referenzsystem ($j = ja$, $n = nein$)

Bedingungen												
p1.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	j	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
p2.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	-	-	j	n	-	-	-	-	-	-	-	-
p3.aktuellerAuftrag.ObjTyp == C	-	-	-	-	j	n	-	-	-	-	-	-
p4.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	j	n	-	-	-	-
p5.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	-	-	j	n	-	-
p6.aktuellerAuftrag.ObjTyp == B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	j	n
Aktionen												
aktuellerAuftrag.moveto(M1)		x										
aktuellerAuftrag.moveto(M2)			x									
aktuellerAuftrag.moveto(M3)					x							
aktuellerAuftrag.moveto(M4)							x					
aktuellerAuftrag.moveto(M5)									x			
aktuellerAuftrag.moveto(M6)												x
SKIP	x		x		x		x		x		x	

6 Fazit und Ausblick

Der Beitrag ist ein Einstieg in die Anwendung von Process-Mining als V&V-Technik für die Simulation. Er erläutert – ausgehend von einem allgemeinen Anwendungsrahmen, dessen Potenziale durch zukünftige Forschungsvorhaben vertiefend ermittelt werden müssen, – zwei Anwendungsszenarien am Beispiel eines Referenzsystems und verdeutlicht, wie das Untersuchungssystem- mit dem Simulationsmodellverhalten auf Grundlage von Konformitätskontrolltechniken gegenübergestellt werden kann, um so Aussagen hinsichtlich der Modellgültigkeit treffen zu können. Allerdings stellen die diskutierten Process-Mining-Techniken lediglich einen Ausgangspunkt für die Anwendung weiterführender Diagnose- und Ursachenermittlungstechniken dar, die zukünftig dazu dienen können, nicht nur die Gültigkeit eines Simulationsmodells zu beurteilen, sondern im Falle der nicht hinreichenden Gültigkeit auch die Ursachen auf Grundlage der operativen Daten in Eventlogs zu benennen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „SimProve – Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining zur effizienteren Analyse und Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen“, das durch Mittel des Landes Hessen im Rahmen des Distr@l-Programms gefördert und von September 2021 bis September 2023 unter Konsortialführerschaft der SimPlan AG durchgeführt wird.

Literatur

- Balci, O.: Validation, Verification, and Certification of Modeling and Simulation Applications. In: Chick, S.; Sanchez, P.J.; Ferrin, E.; Morrice, D.J. (Hrsg.): Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans (USA), 7.-10. Dezember 2003, S. 150-158.
- Bossel, H.: Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand 2004.

- Carmona, J.; van Dongen, B.; Solti, A.; Weidlich, M.: *Conformance Checking: Relating Processes and Models*. Cham: Springer International Publishing 2018.
- de Leoni, M.; van der Aalst, W.M.P.: *Data-aware Process Mining: Discovering Decisions in Processes Using Alignments*. In: Shin, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, Coimbra (Portugal)*, 18.-22. März 2013, S. 1454-1461.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017.
- Jadrić, M.; Pašalić, I.N.; Čukušić, M.: *Process Mining Contributions to Discrete-event Simulation Modelling*. *Business Systems Research Journal* 11 (2020) 2, S. 51-72.
- Langer, A.; Ortmeier, C.; Martin, N.L.; Abraham, T.; Herrmann, C.: *Combining Process Mining And Simulation In Production Planning*. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021)*, Hannover, 2021, S. 264-273.
- Özkul, F.; Sutherland, R.; Wenzel, S.; Jessen, U.; Spieckermann, S.: *Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining in Produktion und Logistik*. In: Breitenecker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): *ASIM SST 2022 Proceedings Langbeiträge*, Wien (Austria), 25.-27. Juli 2022, S. 39-48.
- Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer 2008.
- Sitova, I.; Pecerska, J.: *Process Mining Techniques in Simulation Model Adequacy Assessment*. In: Grabis, J.; Romanovs, A.; Kuleshova, G. (Hrsg.): *60th International Scientific Conference on Information Science of Riga Technical University (ITMS)*, Riga (Latvia), 10.-11. Oktober 2019, S. 1-4.
- Stierle, M.; Viner, D.; Matzner, M.: *FAU 2021 Process Mining Survey*. Erlangen-Nürnberg: FAU University Press; 2021. Online verfügbar unter https://www.processmining-software.com/wp-content/uploads/2021/FAU2021-Process_Mining_Survey.pdf, letzter Zugriff 29.06.2023.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process mining: Data science in action*. Berlin, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2016.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process mining and simulation: a match made in heaven!* In: Padilla, J.J.; Lynch, C.J. (Hrsg.): *Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2018)*, Bordeaux (France), 9.-12. Juli 2018, S. 1-12.
- van der Aalst, W.M.P.: *Process Mining: A 360 Degree Overview*. In: van der Aalst, W.M.P.; Carmona, J. (Hrsg.): *Process mining handbook*. Cham: Springer 2022, S. 3-34.
- Wang, Z.; Lehmann, A.: *A Generic Maturity Model for Verification and Validation of Modeling and Simulation Applications*. In: Tan, G.; Lehmann, A.; Teo, Y.; Cai, W. (Hrsg.): *Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems – 19th Asia Simulation Conference (AsiaSim)*, Singapore, 30. Oktober - 1. November 2019, S. 65-76.
- Wenzel, S.; Peter, T.: *Simulation zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit – Ergebnisse einer Umfrage zur Simulation in Produktion und Logistik*. In: Friedewald, A. (Hrsg.): *Produzieren in Deutschland – Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert*. Berlin: Gito 2013, S. 243-264.