

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

Fallbeispiele aus Produktion und Logistik für die Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining

Manufacturing and Logistics Use Cases on Combining Discrete Event Simulation and Process Mining

Sven Spieckermann, Niklas Stöhr, SimPlan AG, Hanau (Germany),
sven.spieckermann@simplan.de, niklas.stoehr@simplan.de

Gottfried Mayer, BMW AG, München (Germany), gottfried.mayer@bmw.de

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

Abstract: This paper provides an overview on two approaches to combine process-mining and discrete-event simulation in manufacturing and logistics for mutual benefit. One approach focuses on generating simulation models based on process models, while the other approach utilizes process models to validate existing simulation models. Both approaches are explained on a conceptual and technical level. In addition, two real-world use cases from the field of intralogistics and from battery cell assembly are presented. Initial experiences and lessons learned from applying the approaches to the use cases are discussed. The findings illustrate the potential and the limitations of the explored combinations.

1 Einleitung

Process-Mining hat sich in den vergangenen rund zwanzig Jahren als eine Methode der datengetriebenen Prozessanalyse etabliert; ihr Einsatz ist zu einem großen Software- und Beratungsmarkt geworden (Gartner 2021). Die Methode basiert auf der Auswertung von sogenannten Ereignisprotokollen (*Eventlogs*) und deren graphischer Aufbereitung beispielsweise als DFG (*Directly-Follows Graph*), BPMN (*Business Process Model and Notation*) oder Petri-Netz (van der Aalst 2022).

Hervorgegangen ist das Process-Mining aus Entwicklungen rund um das Geschäftsprozess- und Workflow-Management (Agrawal et al. 1998; van der Aalst und Weijters 2004). Garcia et al. (2019) bestätigen die Wichtigkeit dieser Anwendungsfelder durch die Auswertung veröffentlichter Fallstudien; erkennbar ist jedoch auch, dass der Einsatz von Process-Mining zur Analyse von Produktions- und Logistikprozessen bislang eher eine Nebenrolle spielt.

Einer der Vorreiter für die Nutzung von Process-Mining im Produktionsbereich ist die BMW AG. Dort wurde schon vor einigen Jahren damit begonnen, die Methode auch in der Produktion einzusetzen (Knoll et al. 2019). So konnten zum Beispiel Erfahrungen mit der Untersuchung von Abläufen in Lackierereien gesammelt werden (Lechner 2020). Eine der großen Stärken von Process-Mining hat sich dabei bestätigt: Wenn konsistente Ereignisprotokolle vorliegen, dann können die zugrunde liegenden Prozesse – in der Produktion also die Produktionsprozesse – schnell visualisiert und analysiert werden. Eine in der Natur der Methode liegende Einschränkung gilt auch für den Produktionsbereich: Konsequenzen von Prozessveränderungen lassen sich mit Process-Mining erst abschätzen, wenn die Veränderungen tatsächlich durchgeführt worden sind, da die Methode auf Basis von Ereignisprotokollen und den daraus extrahierbaren Prozessmodellen arbeitet. Wenn diese Protokolle nur Ist-Daten aus der Produktion umfassen, dann können auch nur Ist-Prozesse bewertet werden. Zukunftsszenarien und „Was-wäre-wenn“-Fragen lassen sich nicht ohne Weiteres untersuchen.

Genau darin – in der dynamischen Analyse und Bewertung von stochastischen Zukunftsszenarien – liegt eine der Stärken der ereignisdiskreten Simulation (im Folgenden *Simulation* genannt) (Gutenschwager et al. 2017), die bei der BMW AG seit mittlerweile mehr als 25 Jahren erfolgreich im Einsatz ist (Spieckermann et al. 1997). Trotz dieser erfolgreichen Anwendungshistorie von Simulation in der Automobilindustrie bringen Simulationsanwender regelmäßig den Wunsch zum Ausdruck, dass Simulationsstudien (und hier insbesondere die Erstellung von Simulationsmodellen) schneller durchgeführt werden sollten, als das heute überwiegend noch der Fall ist (Mayer und Pöge 2013; Mayer und Mieschner 2017).

Aus diesen einleitenden Betrachtungen zu den Einsatzschwerpunkten und Potenzialen von Process-Mining und Simulation ist die Idee entstanden, die Stärken dieser beiden Methoden für Anwendungen im Bereich Produktion und Logistik zu kombinieren. Hierzu werden zunächst einige in der wissenschaftlichen Literatur beschriebene Wege zur Verknüpfung beider Methoden erläutert, bevor eigene Ansätze präsentiert werden. Danach folgt die Vorstellung von Fallbeispielen, die der Erprobung und Weiterentwicklung der Ansätze gedient haben. Neben erreichten Fortschritten sollen an diesen Beispielen auch offene Herausforderungen illustriert werden. Der Beitrag schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Verknüpfung von Simulation und Process-Mining

Erste Ansätze zur Verknüpfung von Simulation und Process-Mining wurden vor etwa 15 Jahren vorgeschlagen (Rozinat et al. 2009). Mittlerweile finden sich in der Literatur umfassende Anregungen und Konzepte, wie das Zusammenspiel der Methoden gestaltet werden kann (van der Aalst 2018; Pourbafrani und van der Aalst 2022). Ähnlich wie beim Process-Mining insgesamt liegt der Schwerpunkt in der überwiegenden Zahl der kombinierten Methodenanwendungen wiederum nicht in der Produktion, sondern im Geschäftsprozessmanagement (Camargo et al. 2020). Ferner kommt in einer Reihe von Fällen als Simulationsmethode nicht die ereignisdiskrete Simulation, sondern System Dynamics zum Einsatz (vgl. Pourbafrani et al. 2020). Langer et al. (2021) beschreiben eine Kombination von Process-Mining und Simulation im Produktionsbereich. Der Schwerpunkt der Verknüpfung liegt dabei auf der Nutzung der aus dem Process-Mining gewonnenen Daten zur Parametrisierung eines Simulationsmodells. Insoweit gehen die im Folgenden beschriebenen Ansätze darüber hinaus, da

insbesondere auch die Ableitung von Strukturinformationen für den Aufbau von Simulationsmodellen durch Process-Mining unterstützt werden soll.

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten sind im Rahmen einer Forschungsk Kooperation der Universität Kassel, der BMW AG und der SimPlan AG Konzepte für die gemeinsame Nutzung von Process-Mining und ereignisdiskreter Simulation in Produktion und Logistik entstanden. Eine erste Diskussion dazu findet sich in Özkul et al. (2022). Bei der Erarbeitung dieser Konzepte hat die Anwendungsorientierung eine wichtige Rolle gespielt. Dabei sind zwei Konzepte entstanden, die im Folgenden beschrieben werden. Bei dem ersten beschriebenen Konzept steht eher die Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten von Process-Mining mit Hilfe von Simulation im Vordergrund (Abschnitt 2.1) und beim zweiten Konzept die Verbesserung und Vereinfachung der Simulation unter Nutzung von Process-Mining (Abschnitt 2.2).

2.1 Process-Mining für Prozessvarianten

Das im Folgenden beschriebene Konzept richtet sich in erster Linie an Anwender von Process-Mining. Die Idee ist, diese in die Lage zu versetzen, „Was-wäre-wenn“-Fragen zu untersuchen. Denn – wie einleitend beschrieben – erlaubt die Verwendung von Ereignisprotokollen, in denen ausschließlich Ist-Daten enthalten sind, zwar umfassende Analysen protokollierter zurückliegender Abläufe. Wie sich Veränderungen am Ist-Prozess auf Prozessabläufe und Ereignisse auswirken würden, lässt sich auf Basis von Vergangenheitsdaten nicht analysieren.

Das in Abbildung 1 schematisch dargestellte Konzept sieht vor, aus den vergangenheitsbezogenen Ereignisprotokollen mit Ist-Daten (in der Abbildung mit (1) gekennzeichnet) automatisch (relativ abstrakte) Simulationsmodelle zu erzeugen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel auf Basis des Simulationswerkzeugs Plant Simulation (4). Die Erzeugung der Simulationsmodelle erfolgt mithilfe von Diensten, wie sie von Process-Mining-Bibliotheken wie beispielsweise pm4py zur Verfügung gestellt werden (Berti et al. 2019).

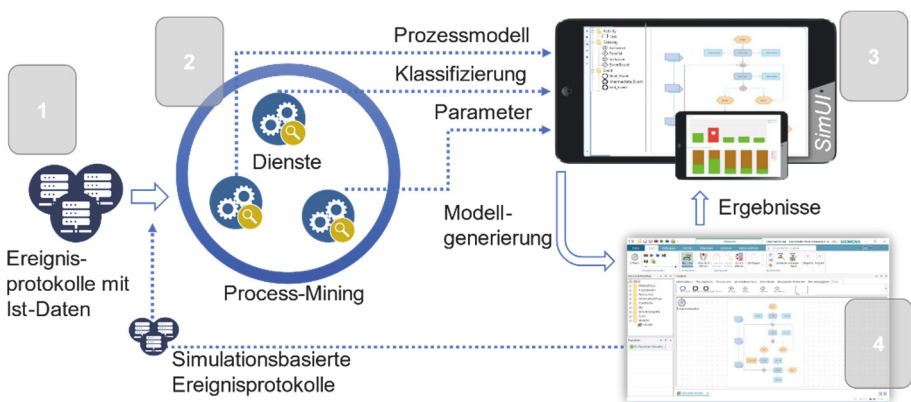


Abbildung 1: Schematische Darstellung des ersten Konzeptes zur Verknüpfung von Simulation und Process-Mining

Diese Dienste erlauben den Aufbau von Prozessgraphen aus den Ereignisprotokollen beispielsweise als DFGs, als BPMN-Modelle oder als Petri-Netze. Zudem stellen sie Funktionen zur Ermittlung von Parametern wie etwa der Dauer von Prozessen bereit und erlauben die Klassifizierung der Elemente der Prozessgraphen. Die Graphen und die ermittelten Daten können über eine geeignete Bedienoberfläche visualisiert werden (3), bevor sie an ein Simulationswerkzeug wie Plant Simulation weitergereicht werden. Die Simulation von DFGs, BPMN-Modellen und Petri-Netzen setzt im Grunde lediglich geeignete Objektbibliotheken im dazu eingesetzten ereignisdiskreten Simulationswerkzeug voraus (vgl. Rozinat et al. 2009). Die Bedienoberfläche dient im vorliegenden Konzept auch zur Visualisierung von Simulationsergebnissen wie etwa der Auslastung einzelner Knoten des simulierten Graphen oder der Durchlaufzeit von Entitäten durch den Graphen. Ein weiterer wesentlicher Zweck der Bedienoberfläche ist die Erstellung von Varianten des Ist-Prozesses, die dann wiederum an das Simulationswerkzeug weitergeleitet und simuliert werden können. Abbildung 2 zeigt im mittleren mit (a) gekennzeichneten Bereich einen Ausschnitt aus einem DFG, der auf Basis eines Ereignisprotokolls mit Ist-Daten erstellt worden ist. Im rechten Teil (b) ist zu erkennen, dass neben der aktuell dargestellten Variante „DFG_Ist“ bereits zwei weitere Varianten „DFG_Variante_1“ und „DFG_Variante_2“ zur Analyse alternativer Prozessabläufe angelegt worden sind. Mit den im linken Teil der Abbildung dargestellten Elementen (c) können strukturelle Änderungen am DFG interaktiv durchgeführt werden.

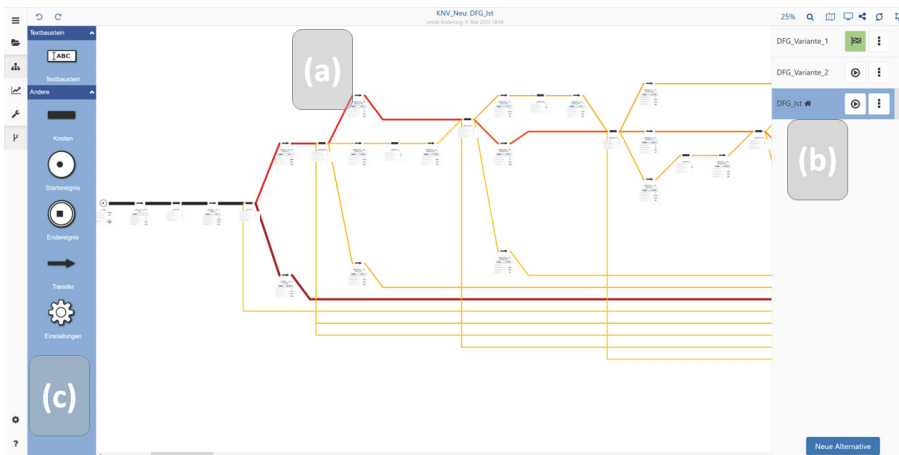


Abbildung 2: Bedienoberfläche mit simulativ vergleichbaren DFG-Prozessvarianten

Die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Varianten lassen sich dann zum einen in der Bedienoberfläche miteinander vergleichen. Zum anderen sind die Objekte zur Simulation von DFGs im Simulationswerkzeug so angelegt, dass bei jedem Simulationslauf Ereignisprotokolle erzeugt werden können. Die aus den verschiedenen Varianten erzeugten simulationsbasierten Ereignisprotokolle lassen sich dann mit Hilfe der Process-Mining-Dienste analysieren und einander gegenüberstellen. Damit schließt sich der in Abbildung 1 dargestellte Kreislauf und Process-Mining kann mithilfe der Simulation auch für alternative Prozessvarianten im Sinne einer Szenarienbeurteilung durchgeführt werden.

2.2 Überprüfung von detaillierten Simulationsmodellen

Im zweiten Konzept dient das Process-Mining der Validierung von vorhandenen Simulationsmodellen. Die Motivation ist, dass bei BMW wie in vielen anderen Unternehmen auch, zahlreiche Simulationsmodelle für unterschiedliche Teilbereiche der Produktion vorliegen. Im Fall eines Fahrzeugherstellers wie BMW können das z. B. Modelle für Karosseriebau, Lackiererei, Montage, Komponenten oder den Antriebsstrang sein. Die oft sehr detaillierten Simulationsmodelle entstehen während der Planung der jeweiligen Produktionsbereiche und werden anschließend über mehrere Jahre hinweg benutzt. Diese Nutzung erfolgt in vielen Fällen nicht kontinuierlich, sondern bedarfsweise jeweils dann, wenn Änderungen durch Stückzahlerhöhungen oder durch die Integration neuer Produktvarianten bevorstehen (Mayer und Spieckermann 2010). Dabei können zwischen zwei Verwendungen eines Modells mehrere Monate oder sogar Jahre liegen, in denen die Daten im Modell nicht regelmäßig oder überhaupt nicht aktualisiert werden. Vor einer neuen Verwendung ist es daher erforderlich, die Eingangsdaten einer Prüfung zu unterziehen. Nimmt diese Prüfung zu viel Zeit in Anspruch, steht das überprüfte Modell unter Umständen nicht rechtzeitig zur Unterstützung der Änderungsplanung zur Verfügung. Erfolgt die Prüfung nicht gründlich genug, kommt es möglicherweise zu fehlerhaften Simulationsergebnissen. Beide Fälle verringern die Akzeptanz des Simulationseinsatzes. Ein zügiger und zuverlässiger Abgleich des aktuellen Zustands des Produktionsbereichs mit dem vorliegenden Modell ist also unbedingt wünschenswert.

Die Idee des zweiten Konzeptes besteht nun genau darin, diesen Abgleich hinsichtlich der Datenaktualität zu vereinfachen, zu beschleunigen und gleichzeitig die Qualität des Abgleichs zu erhöhen. Dazu werden Ereignisprotokolle aus dem realen Produktionsbereich und Ereignisprotokolle aus dem detaillierten Simulationsmodell dieses Bereichs mit Hilfe von Process-Mining gegenübergestellt. Im Grunde stimmen die wesentlichen Komponenten mit dem in Abbildung 1 dargestellten ersten Konzept überein. Der wesentliche Unterschied ist, dass das Simulationsmodell nicht aus dem Ereignisprotokoll der Ist-Daten generiert wird, sondern unabhängig von Process-Mining-Diensten als detailliertes Planungssimulationsmodell vorliegt. Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Prozessgraphen ist, dass das Simulationsmodell die gleichen Bezeichnungen für Aktivitäten und Ressourcen wie die reale Anlage verwendet, oder eine entsprechende Zuordnung zwischen diesen Bezeichnungen vorgenommen wird. Über die Bedienoberfläche können die Strukturen und Daten der Prozessgraphen verglichen und erforderliche Änderungen am Simulationsmodell abgeleitet werden. Im Unterschied zum ersten Konzept werden allerdings keine Simulationsmodelle generiert. Vielmehr werden geänderte Eingangsdaten zur Konfiguration an das Simulationsmodell weitergegeben, um die Aktualität des Modells zu gewährleisten.

3 Überprüfung der Verknüpfung an Fallbeispielen

Im Rahmen des Forschungsprojektes liegen vier Fallbeispiele vor. Im ersten Schritt werden die Lösungskonzepte anhand von zwei Laborbeispielen getestet und demonstriert. Darauf aufbauend erfolgt eine Überprüfung anhand von zwei realen Anlagen. Auf die Erfahrungen mit den realen Anlagen wird im Folgenden näher eingegangen.

3.1 Fallbeispiel Kommissionieranlage

Bei der Kommissionieranlage handelt es sich um einen Teilbereich eines Distributionszentrums für Bücher. Abbildung 3 vermittelt einen groben Eindruck des betrachteten Systemausschnitts. Hierbei handelt es sich um eine Bahnhofskommissionierung (ten Hompel et al. 2019), bei der Kommissionierbehälter zu Kommissionierbahnhöfen fahren, von denen es 45 Stück gibt, die auf drei Kommissionierschleifen verteilt sind.

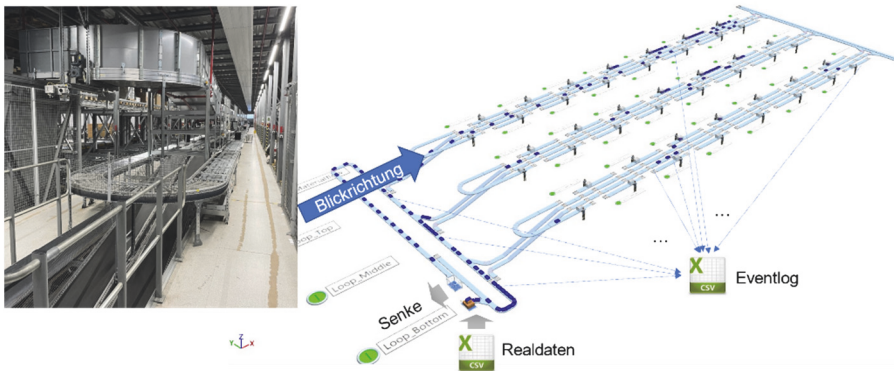


Abbildung 3: Foto und 3D-Layout des Kommissionierbereichs

Die Wahl dieses Beispiels ist dadurch begründet, dass von ca. 110 – über die Förder-technik verteilten – Meldepunkten Ist-Daten vorliegen, aus denen Ist-Ereignisprotokolle erstellt werden können. Abbildung 4 vermittelt anhand eines Ausschnitts aus einem Teilbereich einer Kommissionierschleife einen Eindruck von der Anordnung der Bahnhöfe und der Vielzahl der Meldepunkte (für Einfahrt, Bearbeitung und Ausfahrt an jedem Bahnhof). Das Meldepunktprotokoll einer typischen 8-Stunden-Schicht umfasst ca. 220.000 Einträge für ca. 3.500 Kommissionierbehälter.

Zunächst war geplant, an diesem Fallbeispiel das in Abschnitt 2.1 beschriebene Konzept zu testen. Hierzu sollten aus den Ist-Daten grobe, auf DFGs basierende Simulationsmodelle erzeugt und variiert werden. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass die Erzeugung von groben Simulationsmodellen, die die Abläufe in der realen Anlage hinreichend genau wiedergeben, selbst bei einer so detaillierten Meldepunktstruktur wie im vorliegenden Beispiel eine große Herausforderung ist. Das hängt mit der unter anderem in Özkul et al. (2022) diskutierten Diskrepanz zwischen der prozessbezogenen, auf Aktivitäten und Beziehungen zwischen diesen Aktivitäten beschränkten Betrachtungsweise im Process-Mining und dem auch im vorliegenden Beispiel am layoutorientierten strukturbezogenen Aufbau vieler Simulationsmodelle zusammen. Im konkreten Fall werden aus den Meldepunkten des Layouts die Knoten

des DFG. Das führt je nach Anordnung der Meldepunkte dazu, dass unterschiedliche Layoutvarianten auf die gleichen Teilstrukturen des Graphen abgebildet werden.

Abbildung 5 zeigt dafür ein Beispiel mit drei Meldepunkten. Die auf der linken Seite der Abbildung dargestellten drei Layoutvarianten führen alle zum gleichen Prozessgraphen. Die daraus resultierenden Abweichungen beim Pufferverhalten und bei Durchlaufzeiten führen dazu, dass es im Fall der Kommissionieranlage mit dem ersten Konzept bislang nicht gelungen ist, ein Ist-Ereignisprotokoll zu rekonstruieren.

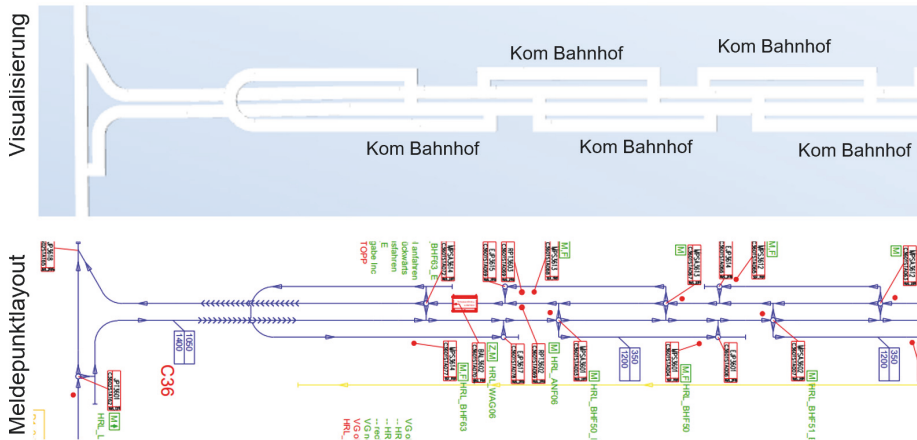


Abbildung 4: Fördertechnikvisualisierung (2D) und Meldepunktlayout (Ausschnitte)

Für die Rekonstruktion werden – dem in Abbildung 1 dargestellten Weg folgend – die Ist-Daten der Anlage eingelesen und anschließend mit Hilfe der Process-Mining-Dienste in ein DFG umgesetzt, aus dem dann ein Simulationsmodell generiert wird. Ein aus diesem Simulationsmodell erzeugtes Ereignisprotokoll unterscheidet sich allerdings deutlich vom ursprünglichen Ist-Ereignisprotokoll.

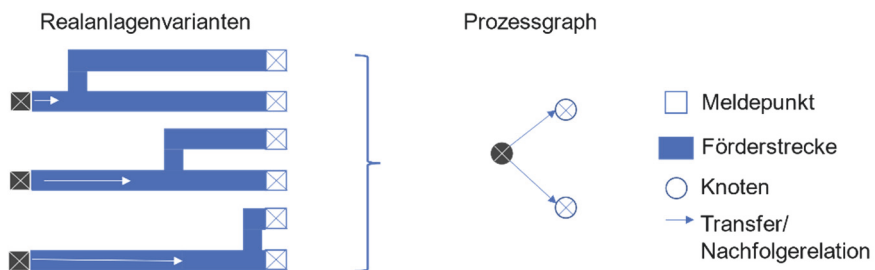


Abbildung 5: Meldepunktanordnungen und resultierender Prozessgraph

Die Verwendung zusätzlicher Eigenschaften in den Ereignisprotokollen oder darauf aufbauend die Ableitung zusätzlicher Informationen aus den Protokollen bieten perspektivisch die Möglichkeit, die Prozessgraphen und die daraus generierten Simulationsmodelle zu verfeinern. Ohne derartige Verfeinerungen führt der erste Ansatz für

Systeme mit der Komplexität der hier gezeigten Kommissionieranlage allerdings nicht zu den angestrebten Ergebnissen.

3.2 Fallbeispiel Hochvoltspeichermontage

Das zweite Fallbeispiel ist eine Hochvoltspeichermontage. Bei Hochvoltspeichern handelt es sich vereinfacht ausgedrückt um die „Batterien“ eines Elektrofahrzeugs. Der Speicher wird aus einer Reihe von einzelnen Batteriezellen zusammengesetzt, verkabelt und mit Steuerungselektronik versehen. Die Hochvoltpeicher durchlaufen im vorliegenden Beispiel ca. 80 Stationen. Abbildung 6 vermittelt einen groben Überblick über das Gesamtlayout und über die Komplexität der Startanlage.

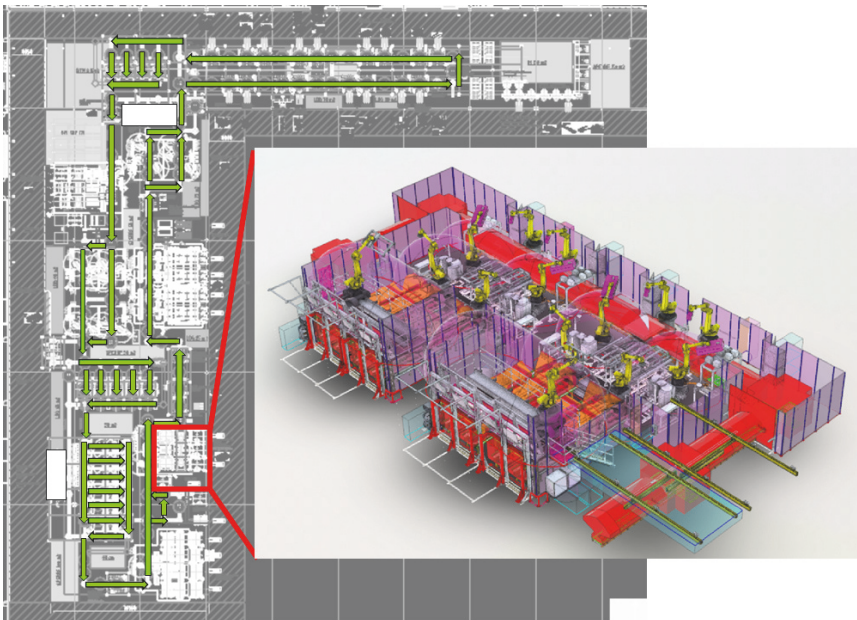


Abbildung 6: Überblickslayout der Batteriezellenmontage mit Startanlage in 3D

Für dieses Montagesystem liegt zum einen ein vom Anlagenlieferanten erstelltes detailliertes Simulationsmodell aus der Planungsphase vor. Zum anderen werden für die mittlerweile im operativen Betrieb befindliche Anlage fortlaufend Statusmeldungen aus den 80 Stationen aufgezeichnet. Grundsätzlich sind damit die Voraussetzungen gegeben, an diesem Fallbeispiel das in Abschnitt 2.2 beschriebene zweite Konzept zur Verknüpfung von Process-Mining und Simulation zu testen. Der erste „naive“ Ansatz, die Anlagenstatusmeldungen in Ereignisprotokollen zu erfassen und hieraus DFGs zu generieren, führte allerdings zu Graphen, deren Knotenanzahl die Anzahl der Entscheidungspunkte und Stationen in der Anlage um ein Vielfaches überstieg. Eine Analyse hat gezeigt, dass pro Montagevorgang in einer Station teilweise eine ganze Abfolge von Meldungen erzeugt und protokolliert wird, sodass eine Reihe von Verdichtungen und Filterungen erforderlich ist. Umgekehrt hat sich gezeigt, dass die im Simulationsmodell für Meldepunkte verwendete Nomenklatur nur zum Teil mit den Be-

zeichnungen in der realen Montageanlage übereinstimmt, sodass vor allem Herausforderungen im Zusammenhang mit der Schaffung einer hinreichenden Datenqualität für die industrielle Anwendung erkennbar sind. Obwohl die Vergleiche zwischen aufbereitetem Ereignisprotokoll mit Ist-Daten und Ereignisprotokollen aus dem Planungssimulationsmodell noch nicht abgeschlossen sind, zeichnet sich bereits ab, dass eine Reihe von Anpassungen am Simulationsmodell erforderlich werden, damit die simulierten Abläufe dem realisierten Anlagenstand entsprechen.

4 Fazit und Ausblick

Mit der sehr guten Datengrundlage aus Fallbeispielen aus Produktion und Logistik wird erkennbar, dass der mit den beschriebenen Forschungsarbeiten zur Verknüpfung von Process-Mining und Simulation verbundene Weg zur Schaffung von Synergien aus der Interaktion der beiden Methoden weiter ist, als zu Beginn der gemeinsamen Arbeiten erwartet. Eine Herausforderung liegt in Abweichungen, die sich aus der layoutorientierten Strukturbezogenheit der betrachteten realen Systeme einerseits und der prozessbezogenen Betrachtungsweise des Process-Mining andererseits ergeben. Zu weiteren Herausforderungen können die Verdichtung der Vielzahl protokollierter Meldungen auf materialflussrelevante Ereignisse sowie generell die hohe Anzahl an Aktivitäten in Ereignisprotokollen werden. Potenziale zur Verbesserung des Zusammenspiels zwischen Process-Mining und Simulation liegen in der Nutzung ergänzender Informationen beim Aufbau der Graphen (Göttlich et al. 2020) oder in der Ergänzung des Process-Mining um Ansätze aus dem Decision-Mining (vgl. de Leoni und van der Aalst 2013).

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

- Agrawal, R.; Gunopulos, D.; Leymann, F.: Mining process models from workflow logs. In: Schek, H.-J.; Alonso, G.; Saltor, F.; Ramos, I. (Hrsg.): *Advances in Database Technology - EDBT'98*. Berlin, Heidelberg: Springer 1998, S. 467-483.
- Berti, A.; van Zelst, S.J.; van der Aalst, W.M.P.: *Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science*. In: Burattin, A.; Polyvyanyy, A.; van Zelst, S.: *Proceedings of the ICPM Demo Track 2019 co-located with 1st International Conference on Process Mining, Aachen (Deutschland), 24.-26. Juni 2019*, S. 13-16.
- Camargo, M.; Dumas, M.; González-Rojas, O.: Automated discovery of business process simulation models from event logs. *Decision Support Systems* 134 (2020), S. 1-13.

- 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.
- Garcia, C.d.; Meinheim, A.; Faria Junior, E.R.; Dallagassa, M.R.; Sato, D.M.; Carvalho, D.R.; Santos, E.A.; Scalabrin, E.E.: Process mining techniques and applications – A systematic mapping study. *Expert Systems with Applications* 133 (2019), S. 260-295.
- Gartner Research: Forecast Analysis: Process Mining, Worldwide, 2021.
- Göttlich, S.; Spieckermann, S.; Stauber, S.; Storck, A.: Data-driven graph drawing techniques with applications for conveyor systems. *Journal of Mathematics in Industry*, 10 (2020) 1, S. 1-23.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer Vieweg 2017.
- Knoll, D.; Waldmann, J.; Reinhart, G.: Developing an internal logistics ontology for process mining. *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 427–432.
- 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), Vancouver (Kanada), 25.-28. Mai 2021, S. 264-273.
- Lechner, P.: BMW: Process Mining @ Production. In: Reinkemeyer, L. (Hrsg.): Process Mining in Action. Cham: Springer, 2020, S. 65-73.
- Mayer, G.; Mieschner, M.: Industrie 4.0 – Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2017, Kassel (Deutschland), 20.-22. September 2017, S. 1-8.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Quo vadis Ablaufsimulation – Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik 2013, Paderborn (Deutschland), 9.-11. Oktober 2013, S. 11-19.
- Mayer, G.; Spieckermann, S.: Life-cycle of simulation models: requirements and case studies in the automotive industry. *Journal of Simulation* 4 (2010), S. 255–259.
- Özkul, F.; Sutherland, R.; Wenzel, S.; Jessen, U.; Spieckermann, S.: Verknüpfung von ereignisdiskreter Simulation und Process-Mining in Produktion und Logistik. In: Breitenacker, F.; Deatcu, C.; Durak, U.; Körner, A.; Pawletta, T. (Hrsg.): ASIM SST 2022 Proceedings, Wien (Österreich), 25.-27. Juli 2022, S. 39-48.
- Pourbafrani, M.; van der Aalst, W.M.P.: Hybrid Business Process Simulation: Updating Detailed Process Simulation Models Using High-Level Simulations. In: Guizzardi, R.; Ralyté, J.; Franch, X. (Hrsg.): Research Challenges in Information Science, Barcelona (Spanien), 17.-20. Mai 2022, S. 177-194.
- Pourbafrani, M.; van Zelst, S.J.; van der Aalst, W.M.P.: Supporting Automatic System Dynamics Model Generation for Simulation in the Context of Process Mining. In: Abramowicz, W.; Klein, G. (Hrsg.): Business Information Systems, Colorado Springs (USA), 8.-10. Juni 2020, S. 249-263.
- Rozinat, A.; Mans, R.S.; Song, M.; van der Aalst, W.M.P.: Discovering simulation models. *Information Systems* 34 (2009) 3, S. 305-327.
- Spieckermann, S.; Griffel, N.; Hoffmann, H.: Neues Simulationsmodell bildet Materialfluss im Rohbau eines Automobilherstellers ab. *Logistik im Unternehmen* 11 (1997) 10, S. 80-83.

- ten Hompel, M.; Sadowsky, V.; Mühlenbrock, S.: Kommissioniersysteme. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik, Berlin: Springer 2019, S. 113-152.
- 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 (SummerSim 2018), Bordeaux (Frankreich), 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.
- van der Aalst, W.M.P.; Weijters, A.: Process mining: a research agenda. Computers in Industry 53 (2004) 3, S. 231-244.