

Process-Mining-unterstützte Ad-hoc-Produktionsplanung – Konzept und prototypische Implementierung

Oliver Gutermuth¹, Sharam Dadashnia¹, Constantin Houy¹, Peter Fettke¹

Abstract: Konzepte und Techniken, die unter dem Begriff Industrie 4.0 subsumiert werden, unterstützen neuartige Ansätze zur Steuerung der Fertigung in Industriebetrieben. Ermöglicht wird dies durch die Vernetzung und Integration von Informationssystemen sowie die Erfassung und zielgerichtete Verwendung anfallender Daten. Obwohl Industrie-4.0-Konzepte verschiedene Vorteile für die Produktionssteuerung bereithalten, werden entsprechende Potentiale bisher kaum für die Produktionsplanung genutzt. Herkömmliche Verfahren zur Produktionsplanung erfordern häufig aufwendige Berechnungen und ermöglichen es nicht immer, flexibel auf Änderungen zu reagieren oder kurzfristige Anpassungen ad-hoc umzusetzen. Zur Milderung dieses Problems zeigt der vorliegende Artikel mit dem Konzept für eine Process-Mining-unterstützte Ad-hoc-Produktionsplanung einen Lösungsansatz sowie erste Ergebnisse einer prototypischen Implementierung. Das Konzept sieht vor, dass unter bestimmten Voraussetzungen keine vollständige Produktionsplanung durchgeführt wird, sondern stattdessen geeignete bzw. ähnliche Produktionsfälle aus der Vergangenheit identifiziert werden. Entsprechende Prozessabschnitte können dann zur Gestaltung neuer Soll-Prozesse wiederverwendet werden. Das Verfahren ermöglicht somit eine Ad-hoc-Produktionsplanung und flexible Reaktionen auf veränderte Umstände in der Produktion.

Keywords: Process Mining, Produktionsplanung, Industrie 4.0, PPS, ERP

1 Einleitung

Industrieunternehmen sehen sich mit der Herausforderung konfrontiert, bei steigender Anzahl an Fertigungszyklen den Kundenanforderungen in Richtung eines zunehmenden Produktindividualisierungsgrades gerecht zu werden. Die nachgefragten Produkteigenschaften revolutionieren in verschiedenen Branchen angewandte Produktionsverfahren und gehen mit abnehmenden Losgrößen bis hin zu unikalenen Produkten einher. Insbesondere Unternehmen, die bislang einheitliche Produkte oder Serien in hoher Auflage produzierten, werden dadurch vor Herausforderungen gestellt. Im Wettbewerb muss diesen Veränderungen häufig mit einer Neuausrichtung der Produktionsverfahren und einer engeren Verzahnung der angebundenen IT-Systeme begegnet werden. Vor diesem Hintergrund gewinnen Konzepte zur IT-basierten Vernetzung der an der Produktion beteiligten Infrastrukturkomponenten (*Cyber-physische Systeme*) zunehmend an Bedeutung. Die im Rahmen dieser Entwicklung gesteigerte Durchdringung der Wertschöpfungsbereiche mit IT schafft zusätzliche Möglichkeiten, Abläufe zu planen, sie während der Ausführung zu steuern und im Anschluss detailliert zu protokollieren. Dadurch werden große Datenmengen (*Big Data*) geschaffen, die sich für vielseitige Analysezwecke

¹ Institut für Wirtschaftsinformatik (IWi) im Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI GmbH), Universitätscampus Geb. D 3.2, 66123 Saarbrücken, vorname.nachname@dfki.de

einsetzen lassen [La14, S. 262f.]. Parallel existieren eingebundene Datenquellen, wie *Enterprise-Resource-Planning-Systeme* (ERP), die das Spektrum der für die datengetriebene Produktion qualifizierten Informationen ergänzen. Somit nimmt die Vielfalt von Elementen, die eine zielgerichtete Produktion unterstützen können, stetig zu. Auf dieser Basis werden die Voraussetzungen für die präzise Abstimmung der an der Produktion beteiligten Prozesse – unabhängig davon, ob es sich um die Planung im Vorfeld oder die Steuerung der Ausführung handelt – durch die Möglichkeiten zur feingranularen Erfassung und Komposition der Produktionsfaktoren grundlegend verbessert. Ebenso erhöhen sich aber auch die zu berücksichtigenden Abhängigkeiten. Neben der Koordination der Prozesse zu Zwecken der Planung und Ausführung begünstigt die Zunahme vernetzter IT-Systeme ebenfalls die präzise Dokumentation der tatsächlichen Produktionsabläufe. Diese Daten erlauben es, Vorgänge in der Produktion nachzuvollziehen und zu analysieren. Wertvolle Informationen können in diesem Zusammenhang bspw. Vergleiche zwischen geplanten und tatsächlichen Produktionsabläufen, oder die Gegenüberstellung mehrerer ähnlicher Produktionsszenarien unterstützen. Unternehmen können somit digitale „Gedächtnisse“ zu Produktionsdetails entwickeln und diese für zukünftige Maßnahmen verwenden.

Während konventionelle Produktionsplanungsverfahren zwar zuverlässige Ergebnisse liefern können, werden aufgrund der wachsenden Anzahl relevanter Faktoren die benötigten Berechnungen stetig komplexer, wodurch Umplanungen oder Ad-hoc-Reaktionen auf kurzfristige Änderungen der Gegebenheiten nach wie vor schwerfallen [z. B. FLR80]. Demgegenüber steigen in Industrieunternehmen die Anforderungen an möglichst kurze Reaktionszeiten in der Produktion und somit der Bedarf an flexiblen Verfahren für die Produktionsplanung. Die oben beschriebene Menge an verfügbaren Daten aus dem Produktionskontext bietet allerdings eine Grundlage, das Spektrum von Produktionsplanungsverfahren um alternative bzw. ergänzende Ansätze zu erweitern.

Der vorliegende Artikel präsentiert vor diesem Hintergrund ein Konzept für eine Process-Mining-unterstützte Ad-hoc-Produktionsplanung. Es sieht vor, dass unter bestimmten Voraussetzungen keine vollständige Planung durchgeführt werden muss. Stattdessen können mit geringerem Aufwand für entsprechende Szenarien geeignete bzw. ähnliche Produktionsfälle aus der Vergangenheit mithilfe der Ereignis-Logs identifiziert und für die anstehenden Aufgaben wiederverwendet werden. Process Mining wird bislang typischerweise im Kontext workflow-basierter Geschäftsprozesse und bisher kaum in Produktion und Fertigung eingesetzt. Folgendes Konzept stellt ein mehrstufiges Verfahren vor, um diese Technik zukünftig für Planungsaufgaben im Produktionsumfeld zu nutzen.

Der Beitrag gliedert sich in fünf Kapitel. Im Anschluss an diese Einleitung werden in Kapitel zwei konzeptionelle Grundlagen erläutert und verwandte Arbeiten präsentiert. Kapitel drei beschreibt das Konzept zur Process-Mining-unterstützten Produktionsplanung. Kapitel vier präsentiert seine prototypische Implementierung, bevor Kapitel fünf die Ergebnisse diskutiert und einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten liefert.

2 Konzeptionelle Grundlagen

2.1 Industrie 4.0 und Big Data

Die fortschreitende Digitalisierung führt in vielen Unternehmensbereichen und insbesondere in der Produktion zu einem Paradigmenwechsel [La14, S. 264]. Zwei zentrale Elemente spielen dabei eine Rolle. Erstens streben Unternehmen nach einer flexiblen und weitgehend autonomen Vernetzung der physischen Produktionssysteme und weiterer Komponenten der Wertschöpfung mit verteilten und intelligenten Software-Systemen. Zweitens wird dieses Konzept dazu genutzt, durch eine zielgerichtete Erfassung und Weiterverwendung der in der Produktion und im Vertrieb gesammelten Daten sowie deren Analyse, Mehrwerte für Unternehmen zu generieren [HM17, S. 170]. Die Anhäufung entsprechender Daten, die durch die zunehmende Vernetzung von Informationssystemkomponenten entstehen, wird oft unter der Bezeichnung *Big Data* diskutiert. Die Nutzung dieser Daten eröffnet neue Potentiale zur Planung, Steuerung und Organisation von Prozessen sowie unternehmensübergreifender Wertschöpfungsnetze bis hin zur Entwicklung neuartiger Produkte und Geschäftsmodelle [BHV14, S. 399ff.]. In Verbindung mit intelligenten Produktionssystemen und „smarten“ Produkten wird somit insbesondere durch zielgerichtete Datenintegration und die Datenaufbereitung für menschliche Akteure eine hohe Transparenz für eine umfassende Sicht auf die Produktion und verbundene Verfahren ermöglicht [Vo14, S. 37].

2.2 Process Mining

Process Mining repräsentiert einen Teilbereich des Data Mining. Die Grundlage für das Process Mining stellen Daten dar, welche u. a. von betriebswirtschaftlichen Anwendungssystemen, wie z. B. ERP- und Workflow-Systemen, in Form von Verlaufs- bzw. Log-Daten (Ereignis-Logs bzw. Event-Logs) produziert werden. Aus diesen Log-Daten lassen sich Informationen extrahieren, welche die Identifikation und Beschreibung von tatsächlich ausgeführten Geschäftsprozessen unterstützen [AW04, S. 231ff.]. Process Mining kann verschiedenen Zwecken dienen. Im Allgemeinen werden drei Ansätze hinsichtlich verschiedener Zielsetzungen unterschieden: (a.) *Discovery*, (b.) *Conformance Checking* und (c.) *Enhancement*. Im Detail lassen diese Ansätze sich wie folgt beschreiben [Aa12, S. 2]:

- (a.) *Discovery* bezeichnet das Vorgehen, bei dem aus einer Event-Log-Datei ein Prozessmodell abgeleitet wird. Process Discovery ist eine häufig verwendete Technik und stellt ein wirksames Vorgehen zur Verfügung, mit dem Unternehmen ihre tatsächlich ablaufenden Geschäftsabläufe und Prozesse erheben können.
- (b.) Im Rahmen des *Conformance Checking* (CC) wird ein vorhandenes Prozessmodell (Soll-Modell) mit einem auf Grundlage von Event-Logs erhobenen Modell (Ist-Modell) oder mit Log-Daten selbst verglichen. CC ermöglicht somit das Erkennen von Abweichungen zwischen definierten und tatsächlich abgelaufenen Prozessen.

- (c.) *Enhancement* funktioniert grundsätzlich so, dass bestehende modellierte Prozesse durch neue Erkenntnisse aus der Analyse von Event-Logs verbessert werden sollen.

2.3 Produktionsplanung

Die Planung der Produktion lässt sich auf verschiedenen hierarchischen Ebenen betrachten. Während sich die *strategische Planung* vorrangig mit der Schaffung und dem Erhalt einer wettbewerbsfähigen Produktion beschäftigt, geht die *taktische Produktionsplanung* auf Entscheidungen über Produkte, deren Gestaltung, Personal- und Betriebsmittelkapazitäten sowie organisatorische Aspekte ein. In Abgrenzung dazu adressiert die *operative Produktionsplanung* primär den bestmöglichen Einsatz verfügbarer Produktionsfaktoren und den wirtschaftlichen Vollzug der Aufgaben, die sich für die Absatzmöglichkeiten eines bestimmten Zeitraums ergeben [Da09, S. 9]. Produktionsplanung umfasst somit das Management der Planungsprozesse und betrachtet dabei Faktoren wie die Ressourcen- und Rohstoffbeschaffung, die Produktion des Endproduktes, die Kapazitätsplanung, Losgrößenbestimmung und Terminplanung. Fokus der Planungen können neben klassischen Erfolgskennzahlen wie Umsatzvolumen, Gewinn, Kosten auch die Produktionszeit, Lagerbestand oder Kundenzufriedenheit und somit teilweise konkurrierend sein.

Das Erreichen angestrebter Ziele wird durch verschiedene Einschränkungen und Interdependenzen determiniert. Entsprechend besteht die Herausforderung der Produktionsplanung unter dauerhafter Berücksichtigung der Zielpräferenzen, deren Priorisierung unter Steuerung möglichst aller einflussnehmenden Faktoren, um ein gutes Ergebnis zu erwirken. Problematisch ist dabei, dass das Planungsumfeld nicht nur komplex ist, sondern auch dass Einflussfaktoren zum Planungszeitpunkt teilweise unbestimmt oder gar unbekannt sind. Auch deshalb sind konventionelle Ansätze der Produktionsplanung – insbesondere der Produktionsprozessplanung – rechenintensiv und benötigen je nach Planungsszenario in großen Industriebetrieben auch auf leistungsstarker IT einer Vorlaufzeit, die den Anforderungen schneller Reaktionszeiten nicht immer gerecht werden kann [FLR80].

2.4 Verwandte Arbeiten

An der Schnittstelle zwischen der Produktionsplanung und dem Thema Process Mining gibt es verschiedene verwandte Arbeiten. [APS10] weisen auf die Möglichkeiten hin, mithilfe von *Conformance Checking* Prognosen zu möglichen Abläufen und Ergebnissen laufender Prozessinstanzen abzugeben. Weitere Hinweise zu den Potentialen von Process Mining in der Ressourcenplanung geben [LCN12], deren Ansatz sich auch auf die Ressource „Maschine“ für die Produktionsplanung übertragen lässt. [Zh15] stellen ein Konzept zur Process-Mining-unterstützten Ressourcenallokation vor, um die Ressourcenbelegung hinsichtlich der Prozessperformanz zu verbessern. Einen prozesskostenorientierten Ansatz, der ebenso für die Produktionsplanung mithilfe von Process Mining eine Rolle spielt und in das folgende Konzept einfließt, erarbeiten [WLN13]. Direkt an

der Schnittstelle zwischen Process Mining und der Produktionsplanung präsentieren [Pal5] ein verwandtes Konzept im Produktionskontext, das dem hier vorgestellten Ansatz ähnlich ist, aber insbesondere auf Analyse der Prozessperformanz sowie Auslastungs- und Verzögerungsanalyse fokussiert ist. Im vorliegenden Beitrag liegt der Schwerpunkt allerdings auf dem Ziel einer flexiblen Ad-hoc-Produktionsplanung bei Änderung äußerer Umstände. [RDF18] bilden mit der sog. *DFKI-Smart-Lego-Factory* ein Industrie-4.0-Produktionsszenario ab, in dessen Rahmen die Unterstützung von Fertigungsprozessen mit Process Mining demonstriert wird. [LM17] präsentieren einen verwandten Ansatz, der darauf abzielt, beim Conformance Checking aufgedeckte Probleme im Rahmen zukünftiger Prozessplanungen zu berücksichtigen und so die Leistungsfähigkeit automatisierter Planungen zu steigern. Aus dem Bereich der Produktionsplanung sind insbesondere die grundlegenden Arbeiten [AP09], [HBR12], [Kr17] sowie [Bo17] von Bedeutung. Es bleibt festzuhalten, dass Process Mining im Rahmen der zunehmenden Durchdringung industrieller Bereiche mit IT-Systemen zwar immer bessere Voraussetzungen zur Erschließung prozessorientierter Unterstützung genießt, dass in den Ereignis-Logs vorhandenes Wissen für die Produktionsplanung bislang jedoch weitgehend ungenutzt bleibt. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden das Konzept für die Process-Mining-unterstützte Ad-hoc-Produktionsplanung eingeführt.

3 Unterstützung der Produktionsplanung mit Process Mining

3.1 Technische Zielsetzung und Anforderungen

Das folgende Konzept beschreibt, wie die Produktionsplanung durch die Anwendung von Process-Mining-Methoden unterstützt werden kann. Ziel ist die Bereitstellung eines alternativen Planungsansatzes, welcher die verhältnismäßig aufwendigen konventionellen Produktionsplanungsverfahren ergänzen kann. Es sollen historische Produktionsdaten für die Planung akuter Szenarien verwendet und auf diesem Weg erforderliche komplexe Berechnungen reduziert werden. Hierzu werden abgeschlossene Produktionsabläufe mittels Process Mining in Datenbeständen analysiert, um jene Produktionsintervalle zu lokalisieren, die sich durch ihre Ähnlichkeit zum akuten Planungsszenario als Vorlage qualifizieren. Weil die Passgenauigkeit des für die Planung referenzierten historischen Szenarios grundsätzlich schwanken kann, handelt es sich um ein mehrstufiges Planungskonzept, das je nach Übereinstimmungsgrad berücksichtigter Gegebenheiten unterschiedliche Vorgehensweisen vorschlägt. Das Konzept sieht außerdem die Einbindung verschiedener Datenquellen vor. Zur erfolgreichen Planung werden insbesondere folgende zeitpunktbezogenen Daten benötigt: (a.) *Prozessdaten* (Abläufe der Vergangenheit bzw. Soll-Prozesse), (b.) *Zielfunktion* (bspw. Zeit, Kosten, Ressourcen, etc.), (c.) *Auftragsdaten*, (d.) *Ressourcenauslastung und -kapazität*. Die zur Planung verwendeten Daten müssen innerhalb definierter Zeitintervalle in einen Zusammenhang gebracht werden können. Produktionsintervalle, deren Abschluss in der Zukunft liegt, werden ggf. mit prognostizierten Plandaten angereichert. Hinsichtlich der Prozessdaten der Vergangenheit, die in Ereignis-Logs protokolliert werden, wird unterstellt, dass

Unternehmen stets bestrebt sind, ihre Produktion bestmöglich auszurichten. Dabei darf angenommen werden, dass die für die effektive Ausführung gewählte Planungsstrategie von einer bekannten Zielfunktion sowie von den zum Planungszeitpunkt vorherrschenden Gegebenheiten determiniert wird. Ebenso kann für ausgewählte Perioden grundsätzlich eine Erfolgsmessung anhand unterschiedlicher Kriterien vollzogen werden. Aus den aufgezeichneten Daten können also für bereits bewältigte und protokollierte Planungssituationen eine Ausgangslage, die jeweilige Ausführung und bestimmte Ergebnisse festgestellt werden. Das vorgestellte Konzept basiert auf der Idee, dass für ein zu planendes Produktionsszenario das gleiche bzw. ein ähnliches Daten-Set – allerdings bestehend aus Soll-Daten – definiert werden kann. Die gemeinsame Datenstruktur erlaubt nun die folgenden Verfahren, um Planungsszenarien historischen Produktionssituationen gegenüberzustellen und in vier Stufen mit zunehmender Toleranz ein Matching durchzuführen. Der Ansatz zielt darauf ab, protokollierte Daten zu nutzen, um durch zielgerichtetes Suchen und Auswählen geeigneter Referenzen eine Planungsgrundlage zu schaffen.

3.2 Ablaufkonzept

Das Planungsverfahren soll das aktuelle Planungsszenario erfassen und geeignete Muster in der Produktionshistorie suchen, um die zu planende Situation daran auszurichten. Die Grundlage der Produktionsplanung sind Aufträge mit bestimmten Rahmenparametern (bspw. Priorität). Von weiteren, in der klassischen Produktionsplanung benötigten Parameterkonfigurationen wie beispielsweise Ressourcen (Material, Personal etc.) oder verfügbare Maschinenkapazitäten wird im Rahmen dieses Konzeptes abstrahiert. Es wird davon ausgegangen, dass unter gleichen oder ähnlichen Produktionsbedingungen (Aufträge, Ressourcen etc.) die Parameterkonstellation implizit in den bereits abgelaufenen Prozessinstanzen und dadurch in den produzierten Logs vorhanden ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die generierten Vorschläge für die Produktionsplanung durch einen Produktionsplanungsverantwortlichen zu prüfen sind. In finalen Entscheidungen, z. B. bezüglich einer Priorisierung von Aufträgen, fließt dessen Expertenwissen wiederum ein. Das bedeutet, dass in der Planung nicht nur punktuell Expertenwissen berücksichtigt wird, sondern dass dieses sich auch stets in den Prozess-Logs niederschlägt und im Rahmen zukünftiger Planungsabläufe zur Verfügung steht.

Aus den oben erwähnten Aufträgen ergeben sich auf der Grundlage von Arbeitsplänen und Stücklisten auftragspezifische Soll-Prozesse. Mittels Conformance-Checking-Methoden [RA08] werden in den Ereignis-Logs zu den auftragspezifischen Soll-Prozessen passende Prozessinstanzen gesucht. Diese Prozessinstanzen sind wohlgeplante und erfolgreich abgeschlossene Produktionsabläufe, welche die Ausgangsbasis für die Ad-hoc-Produktionsplanung darstellen. Weiterhin können diese Prozessinstanzen mittels Process-Discovery-Methoden wie dem Alpha-Miner visualisiert werden [AWM04]. Darüber hinaus können bei mehreren als Vorlage geeigneten Produktionsszenarien mittels Process Enhancement Metriken ermittelt und hinzugefügt werden, um bspw. anhand der Durchlaufzeiten eine gezielte Auswahl treffen zu können.

Die Vorgehensweise des Konzepts sieht eine stufenweise Anpassung der Vorgaben bezüglich der zu identifizierenden Ähnlichkeiten vor. Zur Erläuterung wird in den Abbildungen 1, 2 und 3 eine schematische Darstellung von Prozessschritten mit zeitlichem Bezug und gegenseitigen Abhängigkeiten verwendet. Gezeigt wird eine bestimmte Situation („Ausgangslage der Produktion“), welche mehrere parallel zur Fertigung angeordnete Produktionsprozesse (P1, P2, P3) umfasst, die sich jeweils aus einer Sequenz von Prozessschritten (bspw. [A]→[B]→[C] für P1) zusammensetzen. Die vertikalen Spalten, welche die möglichen Positionen der Prozessschritte vorgeben, stellen hierbei von links nach rechts aufeinander folgende Zeitintervalle dar, wobei der blaue Balken das für die dargestellte Situation gegenwärtig bereits angebrochene Zeitintervall markiert. In allen drei Szenarien müssen die im Bereich „neue Aufträge“ aufgeführten Prozesse in die aktuelle Produktion eingeplant werden.

Das Planungsverfahren auf Log-Daten-Basis sucht hierfür eine geeignete Referenz in den protokollierten Fertigungsdaten der Vergangenheit und berücksichtigt auch potentielle Ressourcenkonflikte. Abbildung 1 verdeutlicht die erste Stufe des Konzepts, welches genau dann qualifiziert ist, wenn in den Logs ein historisches Produktionsintervall lokalisiert werden konnte, das alle für das aktuelle Planungsszenario relevanten Prozessschritte – also eine realisierbare Kombination der Prozessschrittsequenzen laufender und neu einzureihender Aufträge – in identischer Form aufweist. In diesem Fall kann die in den Logs verzeichnete Vorgehensweise vollständig nachgeahmt werden.

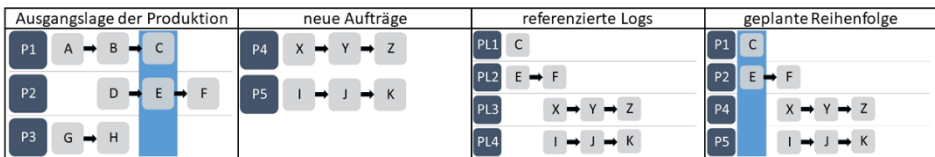


Abb. 1: Planungsverfahren der Stufe 1

Für den Fall, dass keine vollständig kongruente Referenz in den Logs gefunden wird, wird das zu planende Szenario zerlegt und nach der Zerlegung nach passenden Referenzen gesucht (Stufe 2). Das Zerlegungsprinzip folgt dabei der Prämisse, dass die optimierten Teilprobleme zusammengefasst in Summe immer noch ein besseres Ergebnis darstellen als die nicht optimierte Variante [BPR96]. Nachteilig ist dabei jedoch, dass diese Vorgehensweise tendenziell mehr Zeit in Anspruch nimmt als Stufe 1 und deshalb nur dann angewandt wird, wenn Stufe 1 kein Ergebnis liefert.

Um dies an einem Beispiel zu verdeutlichen zeigt Abbildung 2 eine Situation, in der erneut akut eintreffende Aufträge (P4, P5) in die laufende Produktion (P1, P2) eingeordnet werden sollen. Es werden gegenwärtig die Prozessschritte [C] und [E] ausgeführt. In diesem Beispiel konnte nun in den Logs ein geeigneter Produktionsablauf identifiziert werden, der jedoch nicht äquivalent nachgeahmt werden kann, da [X] und [I] nicht mehr im laufenden (bereits angebrochenen) Zeitintervall – also nicht wie im referenzierten Log zeitgleich mit [C] und [E] – gestartet werden können. Aus dem Log kann jedoch abgeleitet werden, dass keine konkurrierenden Abhängigkeiten bezüglich der Inanspruchnahme von Ressourcen vorliegen, weil laut Historie die gleichzeitige Ausführung

von [X], [I] und [C] offensichtlich keine Konflikte verursacht. Somit kann das Verfahren der Stufe 2 erfolgreich eine Einordnung der neuen Aufträge für das anschließende Zeitintervall planen, obwohl die aus den Logs referenzierte Abfolge mit der Planungssituation nicht identisch war.

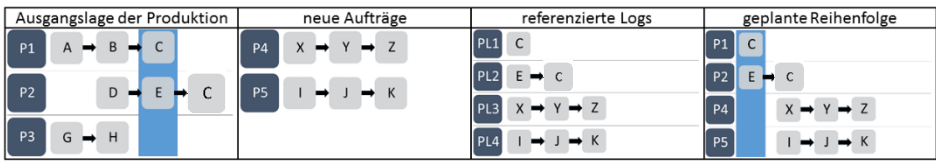


Abb. 2: Planungsverfahren der Stufe 2

Falls im Rahmen von Stufe 1 bzw. Stufe 2 keine passenden Log-Einträge für die Planung gefunden werden können, kommt Stufe 3 zum Zuge. Dieses Verfahren besitzt eine erhöhte Toleranz hinsichtlich der gesuchten Ähnlichkeit zwischen Planungsszenarien und historischen Daten. Aus diesem Grund steigt erneut die Wahrscheinlichkeit, eine geeignete Referenz zu finden. Allerdings erfolgt dies auf Kosten der Rechenzeit und unter Einbußen der Präzision der Planungsergebnisse [Aw16]. Hierzu werden mithilfe von Process-Instance-Clustering-Ansätzen geeignete [Th15, SGA09] Log-Cluster gebildet, welche die Produktionsabläufe von Produktgruppen enthalten und mit passenden Aufträgen, deren Produktion zu planen ist, verglichen werden können. Anhand von Distanzmaßen können so neue Planungsintervalle an den in Logs vorhandenen Mustern ausgerichtet und somit zur Planung verwendet werden.

Abbildung 3 zeigt das Verfahren auf Stufe 3 ebenfalls anhand eines Beispiels. Erneut laufen gegenwärtig bereits die Prozessschritte [C] und [E] der aktuell in der Produktion befindlichen Prozesse P1 und P2. Der referenzierte Log weist keine für Stufe 1 oder Stufe 2 geeignete Konstellation auf, weil keine protokollierten Daten für P4 im Log verzeichnet sind (ungewöhnlicher Prozessschritts [X]). Allerdings weist der referenzierte Log eine hohe Ähnlichkeit zum Planungsszenario auf und zeigt außerdem keine Anzeichen für Konflikte hinsichtlich der Ressourcenbindung. Aus der Historie lässt sich ableiten, dass die Prozessschritte [F] und [X] konfliktfrei parallelisierbar sind. Entsprechend kann der im Log verzeichnete Ablauf von PL3 und PL4 unter Anpassung eines einzelnen Prozessschrittes als Vorlage dienen. Das Muster wurde durch Akzeptanz einer Teilsequenz der Prozessinstanz aus PL3 identifiziert und der Prozessschritt [X] konnte den im Log aufgeführten Prozessschritt [W] konfliktfrei ersetzen.

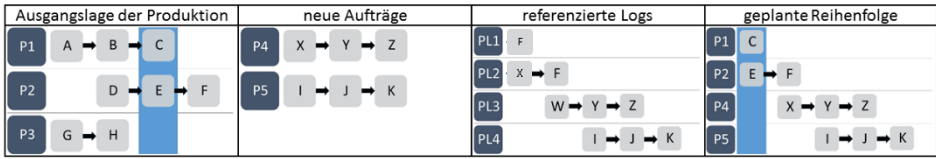


Abb. 3: Planungsverfahren der Stufe 3

Falls selbst Stufe 3 nicht zu sinnvollen Planungsergebnisse führt und auch mehrere Iterationen mit einer verringerten zu planenden Teilmenge vorhandener Aufträge oder einzelner Instanzen fehlschlägt, sieht das Konzept in Stufe 4 eine klassische Produktionsplanung vor. In diesem Fall besitzt die zu planende Situation keine anhand der Logs feststellbare ausreichende Ähnlichkeit mit den Produktionssequenzen der Vergangenheit und muss konventionell behandelt werden.

Tritt bei Anwendung von Stufe 1 bis Stufe 3 der Fall ein, dass mehrere passende Logs gefunden werden, existieren verschiedene Möglichkeiten, eine Auswahl der bevorzugten Referenz zu treffen. Eine Möglichkeit ist die gezielte Verwendung der jüngsten Referenz unter der Annahme, dass mit geringerem zeitlichem Verzug auch die Ausgangsbedingungen noch ähnlicher sind als bei älteren vorhandenen Referenzen. Alternativ können passende Logs auch mithilfe geeigneter und für die Zielfunktion der Planung relevanter Metriken verglichen und ausgewählt werden. Es könnte z. B. die vollständige Durchlaufzeit der verschiedenen Instanzen für das zu planende Intervall verglichen werden. Voraussetzung ist hier, dass entsprechende Daten vorhanden sind. Unter diesen Umständen ließen sich auch mehrere Dimensionen, z. B. Kosten und Zeit, parallel vergleichen, wobei jedoch eine Priorisierung der Zielparameter erforderlich ist, um eindeutige Empfehlungen zu forcieren.

4 Prototyp

Um das beschriebene Konzept in einem ersten Schritt zu validieren, wurde es prototypisch implementiert [Fr07]. Der Prototyp stellt ein Software-Artefakt dar, das primär der Illustration des Konzeptes sowie als Basis für die weitere Evaluation mit Praxispartnern dient. Konkret wurde im Rahmen des Prototyps ein Dashboard zur Entscheidungsunterstützung für Produktionsplaner entwickelt und dabei ein Anwendungsfall bezüglich einer Ad-hoc-Produktionsplanung umgesetzt. Sobald eine neue Kundenbestellung eingeht, wird diese in den aktuellen Produktionsablauf gemäß den Ermittlungen des Stufenkonzeptes eingeordnet (siehe Abbildung 4, links oben *Planned Schedule*). Auf der linken Seite der Abbildung ist weiterhin zu sehen, in welchem Fertigungsstand sich die aktuellen, in der Produktion gefertigten Aufträge befinden. Auch kann, wie auf der rechten Seite erkennbar (*Processmap*, aktueller Ist-Prozess auf Basis der aktuellen Event-Logs), eingesehen werden, welcher konkrete Prozessablauf eines bestimmten, noch zu fertigenden Auftrags durchlaufen werden muss. Außerdem stehen Informationen zum aktuellen Bearbeitungsstand dieses Prozesses zur Verfügung. Dies ermöglicht es dem Entscheider, Echtzeitinformationen zum Ist-Prozess einzusehen, somit ein Real-Time-Monitoring zu betreiben und die gewonnenen Erkenntnisse direkt in zu treffende Entscheidungen einfließen zu lassen. Zusätzlich hält das Dashboard Informationen zur Risikoeinschätzung (*Riskmonitor*, hinsichtlich Verzögerung, Kostenüberschreitung) und allgemein Prozesskennzahlen (*Order overview*) zu aktuellen Instanzen bereit.

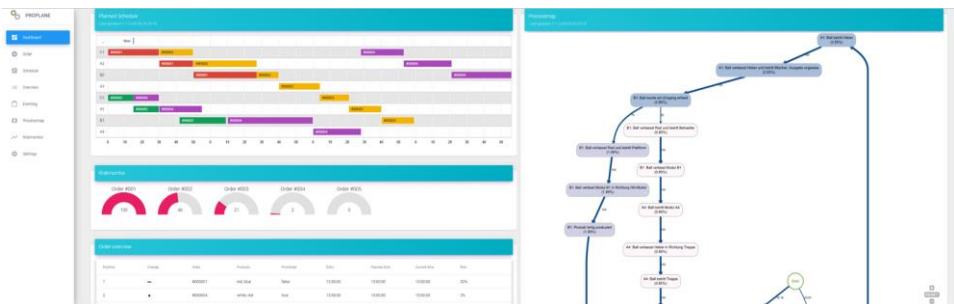


Abb. 4: Dashboard des Prototyps

Aus einer technischen Perspektive wurden State-of-the-Art-Komponenten der web-basierten Software-Entwicklung verwendet. Konkret wurde im Frontend das Framework *Angular* eingesetzt sowie auf *JAVA-Spring-Basis* die entsprechenden Backend-Services mittels des *REST-Prinzips* entwickelt.² Abbildung 5 zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Prototyps. Das Backend verwendet ein Framework zur Process-Mining-Analyse. Konkret wurde hier mit der R-basierten Technologie *bupar* gearbeitet.³ Zur Planung und Verbesserung der Produktionsabläufe wurden Libraries der *Google Optimization Tools* verwendet.⁴ Risikoberechnungen werden mittels der Open-Source-Bibliothek *WEKA* realisiert.⁵

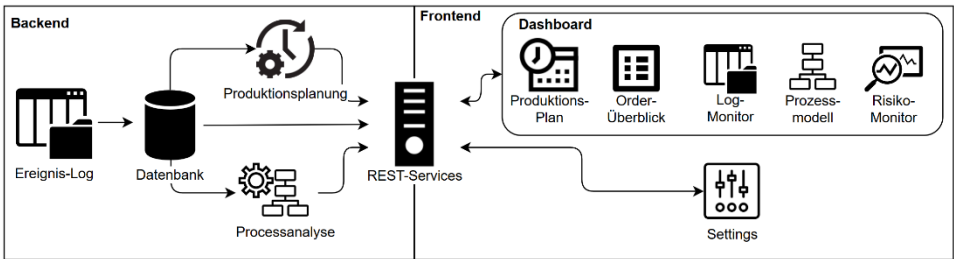


Abb. 5: Prototyp-Komponenten

Der Prototyp wird aktuell im Rahmen des vom BMBF geförderten Konsortialprojektes *ProPlanE* weiterentwickelt. Die aktuellen Ergebnisse stellen einen Zwischenstand der fortdauernden Entwicklungen dar. Insbesondere soll der Prototyp bis Ende 2018 zusammen mit dem Anwendungspartner weiterführend evaluiert werden.

² Vgl. <https://angular.io/>, <https://jersey.github.io/>, <https://spring.io/>

³ Vgl. <https://www.bupar.net/>

⁴ Vgl. <https://developers.google.com/optimization/>

⁵ Vgl. <https://weka.wikispaces.com/>

5 Diskussion und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz zu Produktionsplanung vor, der sich maßgeblich auf die Informationen aus Log-Daten vergangener Fertigungsprozesse stützt. Es wurde aufgezeigt, dass Produktionsverfahren zunehmend vernetzte Technologien einsetzen und IT-Systeme großflächig integrieren. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die für diesen Planungsansatz erforderliche Datenbasis nicht nur wächst und sich über zusätzliche Bereiche ausbreitet, sondern auch zunehmend detaillierte Informationen bereitstellen kann.

Im direkten Vergleich ergibt sich aus komplexer werdenden Produktionsverfahren und der steigenden Anzahl einflussnehmender Faktoren ein dynamischer Anstieg des Schwierigkeitsgrades für die Berechnung von Produktionsplanungsergebnissen. Diese Entwicklung wird zwar teilweise abgefedert, da die Rechenkapazität verfügbarer Systeme ebenfalls voranschreitet. Die Vergangenheit hat jedoch gezeigt, dass die Leistungssteigerungen von IT bislang nicht immer ausreichen, um die Effekte der explodierenden Vielfalt der zu verarbeitenden Variablen zu kompensieren. Die Vorteile des Planungsverfahrens auf Prozessdatenbasis ergeben sich aus dem verhältnismäßig geringen Aufwand erforderlicher Kalkulationen. Der präsentierte Ansatz orientiert sich an den in Datenbanken gespeicherten „praktischen Produktionserfahrungen“. Technisch sind damit deutlich weniger Rechenoperationen erforderlich, weil die Planungsmethode vorrangig auf einem Verfahren zur Suche und Nutzung geeigneter Prozessmuster beruht.

Der vorgestellte Planungsansatz hat allerdings auch Grenzen und verschiedene Limitationen. Hier ist vor allem die Abhängigkeit von der verwendeten Datenbasis zu nennen. Neben der Qualität der Daten, die unterschiedlich gut für die Durchführung geeignet sein kann, wird insbesondere deutlich, dass die Planung zukünftiger Perioden grundsätzlich maximal die Güte erzielt, die von der Fertigung effektiv bis zu diesem Zeitpunkt erreicht wurde. Dennoch sind langfristig Verbesserungen der Planungs- und Produktionsergebnisse über den in den Daten protokollierten Stand hinaus möglich. Dies erfolgt genau dann, wenn durch menschliches Eingreifen ein zusätzliches Potential erkannt werden konnte, von der vorgeschlagenen Vorgehensweise des Planungswerkzeugs abgewichen und ein besseres Endergebnis erzielt wird. Eine solche Improvisation („Faktor Mensch“) ist sowohl im Rahmen der Transformation des Planungsergebnisses (z. B. durch Production Planning Officers) als auch auf operativer Ebene bei der Umsetzung (z. B. durch Mitarbeiter im Werk) möglich. Als Konsequenz schlägt sich dann die von den Planprozessen abweichende Ausführung unmittelbar in den protokollierten Daten nieder und kann fortan vom Planungsverfahren als neue, verbesserte Referenz genutzt werden. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass sich Planungsergebnisse durch Wiederholungen hinsichtlich der aktuell herrschenden Zielstellung iterativ verbessern.

Ein weiterer zentraler Aspekt sind die Anforderungen, die an die Qualität der Log-Daten gestellt werden. Sie können zwar in der Regel sehr gut herangezogen werden, um Vorgänge zu rekonstruieren. Informationen zur Bewertung einzelner Produktionsintervalle hinsichtlich verschiedener Zielpräferenzen sind jedoch oft nicht expliziert. Daneben werden Details bezüglich der Inanspruchnahme bestimmter Ressourcen oft vernach-

lässigt. Aus diesem Grund kann teilweise nicht zweifelsfrei erkannt werden, ob bestimmte Ressourcen bewusst oder außerplanmäßig unberührt bleiben. Es kann jedoch mittelfristig davon ausgegangen werden, dass Unternehmen dazu tendieren werden, protokollierte Daten weiter anzureichern. Dies begründet sich u. a. dadurch, dass zunehmend Potentiale aus dem Detailreichtum dieser Informationen aufgedeckt werden, welche bei geeigneter Verwendung entscheidende Vorteile bereithalten. So setzen z. B. Verfahren wie *Predictive Maintenance* darauf, erforderliche Wartungsmaßnahmen aus jenen Daten abzuleiten, die während der Produktion anfallen und verfügbar sind. Der Detailreichtum der Protokolle birgt somit quantifizierbaren Nutzen, sodass im Rahmen wachsender technischer Möglichkeiten von einer Expansion erfasster Parameter ausgegangen werden kann. Diese Entwicklung wird sich auch für das Produktionsplanungsverfahren auf Log-Daten-Basis positiv auswirken.

Im Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, welches mit bekannten Problemen der Produktionsplanung unter bestimmten Voraussetzungen erfolgreich umgehen kann. Der Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass er mit geringem Aufwand in vielen Fällen schnell adäquate Ergebnisse erzeugen kann und entsprechend wertvoll für die Produktionsplanung insbesondere in Situationen mit geringer Vorlaufzeit ist. Die Fähigkeit, zügig Planungsergebnisse und Handlungsempfehlungen zu produzieren, reiht sich sinnvoll in das Spektrum bekannter Produktionsplanungsverfahren ein. Insbesondere in Kombination mit konventionellen Verfahren können unternehmensindividuelle Anwendungsstrategien anhand spezifischer Stärken und Schwächen unterschiedlicher Planungsmethoden entwickelt werden. Obgleich die Grundüberlegung, das Wissen, welches in protokollierten Fertigungsdaten vorhanden ist, für die Produktionsplanung zu nutzen, nachvollziehbar dargelegt wird, muss das Konzept in einem nächsten Schritt weiter evaluiert werden. In diesem Zusammenhang wird angestrebt den beschriebenen Ansatz auch quantitativ mit bereits etablierten Verfahren der Produktionsplanung hinsichtlich der Verfahrenskomplexität und insbesondere hinsichtlich des Rechenaufwands zu vergleichen.

Danksagung: Die vorgestellten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des Projektes „ProPlanE – Echtzeit-Process-Mining in der Produktionsplanung mit Kundenbezug“ erarbeitet, das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen *S01IS16040A* gefördert wird. Die Autoren bedanken sich außerdem bei *Alexander Berrang*, *Peter Pfeiffer* und *Brian Willems* für die Unterstützung bei der Implementierung des Prototyps. Weiterhin gilt der Dank des Autorenteam den anonymen Gutachtern für Ihre konstruktiven Anmerkungen, die zur Verbesserung dieses Artikels beigetragen haben.

6 Literaturverzeichnis

- [Aa12] van der Aalst, W. M.: *Process Mining. Data Science in Action*. Springer, Berlin 2012.
- [AW04] van der Aalst, W. M., Weijters, A. J.: *Process mining: a research agenda*. *Computers in Industry* 53, S. 231-244, 2004.

- [Aw16] Awasthi, A.: Optimization of NP-hard Scheduling Problems by Developing Timing Algorithms and Parallelization. Universität Oldenburg, Oldenburg 2016.
- [APS10] van der Aalst, W., Pesic, M., Song, M.: Beyond Process Mining: From the Past to Present and Future. In (Pernici B., Hrsg.): Advanced Information Systems Engineering. CAiSE 2010, LNCS 6051. Springer, Berlin, S. 38-52, 2010.
- [AWM04] van der Aalst, W., Weijters, T., Maruster, L.: Workflow mining: discovering process models from event logs. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 16/9, S. 1128-1142, 2004.
- [AP09] Akbalic, A., Penz, B.: Exact methods for single-item capacitated lot sizing problem with alternative machines and piece-wise linear production costs. International Journal of Production Economics Volume 119, S. 367-379, 2009.
- [Ar15] Arias, M., Rojas, E., Munoz-Gama, J., Sepulveda, M.: A Framework for Recommending Resource Allocation Based on Process Mining. In (Reichert M., Reijers H., Hrsg.) Business Process Management Workshops. BPM 2016, LNBIP 256. Springer, Cham, S. 458-470, 2015.
- [BPR96] Basset, M., Pekny, J., Reklaitis, G.: Decomposition Techniques for the Solution of Large-Scale Scheduling Problems. AIChE Journal 42/12, S. 3373-3387, 1996.
- [BHV14] Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer, Wiesbaden, 2014.
- [Bo17] Boza, A., Alarcón, F., Alemany, M. M., Cuenca, L.: Event Monitoring System to Classify Unexpected Events for Production Planning. In (Hammoudi, S., Maciaszek, L., Missikoff, M., Camp, O., Cordeiro, J., Hrsg.): Enterprise Information Systems. ICEIS 2016, LNBIP 291. Springer, Cham, S. 140-154, 2017.
- [Da09] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Springer, Berlin, 2009.
- [Fr07] Frank, U.: Evaluation of reference models. In (Fettke, P.; Loos, P., Hrsg.): Reference modeling for business systems analysis. Idea Group, Hershey, PA, S. 118-140, 2006
- [FLR80] Florian, M., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G.: Deterministic Production Planning: Algorithms and Complexity. Management Science 26/7, S. 669-679, 1980.
- [HBR12] Hajej, Z., Bistorin, O., Rezg, N.: Maintenance/Production plan optimization taking into account the availability and degradation of manufacturing system. IFAC Proceedings 45, S. 963-967, 2012.
- [HAP12] Hatzikonstantinou, O., Athanasiou, E., Pandelis, D. G.: Real-time production scheduling in a multi-grade PET resin plant under demand uncertainty. Computers & Chemical Engineering 40, S. 191-201, 2012.
- [HM17] Hirsch-Kreinsen, H., Minssen, H. (Hrsg.): Lexikon der Arbeits- und Industriesoziologie. Nomos, Baden-Baden, 2017.
- [Kr17] Kretschmer, R., Pfouga, A., Rulhoff, S., Stjepandić, J.: Knowledge-based design for assembly in agile manufacturing by using Data Mining methods. Advanced Engineering Informatics 33, S. 285-299, 2017.

- [La14] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., Hoffmann, M.: Industrie 4.0. *Wirtschaftsinformatik* 56, S. 261-264, 2014.
- [LM17] Leoni, M., Marrella, A.: Aligning Real Process Executions and Prescriptive Process Models through Automated Planning. *Expert Systems with Applications* 82, S. 162-183, 2017.
- [LCN12] Liu, T., Cheng, Y., Ni, Z.: Mining event logs to support workflow resource allocation. *Knowledge-Based Systems* 35, S. 320-331, 2012.
- [Pa15] Park, M., Song, M., Hyun Baek, T., Son, S., Jin Ha, S., Woo Cho, S.: Workload and Delay Analysis in Manufacturing Process Using Process Mining. In (Bae J., Suriadi S., Wen L., Hrsg.): *Asia Pacific Business Process Management. AP-BPM 2015, LNBIP* 219. Springer, Cham, S. 138-151, 2015.
- [RA08] Rozinat, A., van der Aalst, W. M. P.: Conformance checking of processes based on monitoring real behavior. *Information Systems* 33, S. 64-95, 2008.
- [RDF18] Rehse, J.-R., Dadashnia, S., Fettke, P.: Business process management for Industry 4.0 – Three application cases in the DFKI-Smart-Lego-Factory. *it – Information Technology* 60/3, S. 133-141, 2018.
- [SD14] Schöning, H., Dorchain, M.: Data Mining und Analyse. In (Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B., Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, Wiesbaden, S. 543-554, 2014.
- [SGA09] Song, M., Günther, C., van der Aalst, W. M. P.: Trace Clustering in Process Mining. In (Ardagna, D., Mecella, M., Yang, J., Hrsg.): *Business Process Management Workshops. BPM 2008. LNBIP* 17. Springer, Berlin, S. 109-120, 2009.
- [TBM11] Taghizadeh, K., Bagherpour, M., Mahdavi, I.: An interactive fuzzy goal programming approach for multi-period multi-product production planning problem. *Fuzzy Information and Engineering* 3, S. 393-410, 2011.
- [Th15] Thaler, T., Ternis, S., Fettke, P., Loos, P.: A Comparative Analysis of Process Instance Cluster Techniques. *Proceedings of the 12th International Conference on Wirtschaftsinformatik*, S. 423-437, 2015.
- [Vo14] Vogel-Heuser, B.: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In (Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B., Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Springer, Wiesbaden, S. 37-48, 2014.
- [WLN13] Wynn, M. T., Low, W. Z., Nauta, W.: A framework for cost-aware process management: generation of accurate and timely management accounting cost reports. *Asia-Pacific Conference on Conceptual Modelling*, S. 79-88, 2013.
- [Zh15] Zhao, W., Yang, L., Liu, H., Wu, R.: The Optimization of Resource Allocation Based on Process Mining. In (Huang D.S., Han, K., Hrsg.): *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. ICIC 2015. LNCS* 9227. Springer, Cham, S. 341-353, 2015.