

# Einsatz von Process-Mining zur Erweiterung der semantischen Produktbeschreibung

Christopher Sauer, Fabian Dworschak, Benjamin Schleich,  
Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

## Abstract

Due to the increased data volume in product development, the use of PDM systems has become established. Current trends show a shift away from the monolithic integrated product model towards a semantic product model. In order to extend this product model by a description of the manufacturing process, which is particularly important against the background of the digital twin, methods of process mining are suitable. The result of these methods is always a model of the given process, which is to be fed to the higher-level system via a semantic interface. Thus, ontologies that enable a semantic description are suitable for the interface definition. Within the scope of this article, based on an exemplary manufacturing process, process mining is applied and a prototypical interface is designed.

*Keywords: Process mining, semantic product modeling, ontologies*

## 1 Einleitung und Motivation

Die Digitale Transformation durchdringt mittlerweile die meisten Gebiete des täglichen Lebens. So wurde auch die Produktentwicklung im Laufe der Jahre erst digitalisiert und ausgehend davon immer weiter digital transformiert.

Bei dieser Transformation werden bestehende Prozesse und Methoden mit Hilfe von digitalen Mitteln verbessert oder disruptiv ersetzt. Im Kontext der digitalen Transformation fallen auch immer mehr Daten im gesamten Produktlebenszyklus an. Zur Bewältigung dieser Datenmengen werden im Produktentstehungsprozess aktuell PDM-Systeme eingesetzt. Produktdaten aus den klassischen Erzeugersystemen der Fachrichtungen wie Konstruktion und Berechnung werden in solchen PDM-Systemen verwaltet. Dabei fungiert das PDM-System nach [1] wie in Bild 1 dargestellt vor allem als Metadaten-Managementsystem.

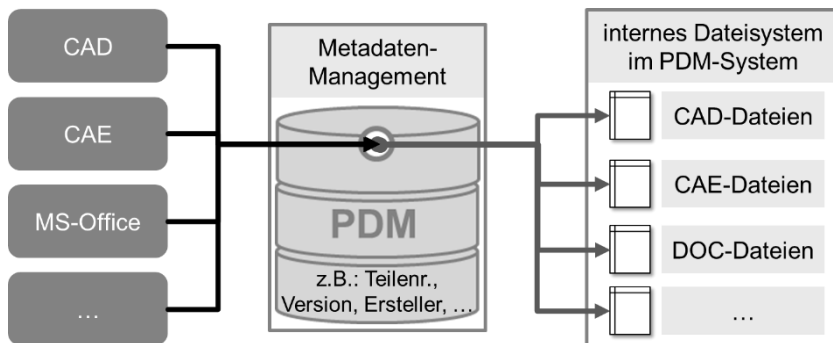


Bild 1: Das PDM-System zum Metadatenmanagement nach [1]

Trends in der derzeitigen Entwicklung zeichnen allerdings einen Weg in Richtung intelligenter Verknüpfung der einzelnen Datenquellen oder -silos. Dabei geht der Ansatz weg von einem integrierten Produktmodell, das monolithisch alle Produktdaten enthält, hin zu einer verknüpften semantischen Produktbeschreibung. So können darin auch Informationen aus dem Herstellungsprozess erfasst werden. Dafür müssen alle anfallenden Herstellungsprozessbestandteile dokumentiert und erfasst werden. Innerhalb dieses Beitrags wird die Möglichkeit untersucht, dies durch Methoden des Process-Mining zu ermöglichen. Die erzeugten Modelle lassen sich dann über eine semantische Schnittstelle den weiteren Systemen, wie zum Beispiel dem PDM-System zuführen. Produktionsprozesse lassen sich in einem ersten Schritt digitalisieren, durch die Analyse der Prozessmodelle eröffnen sich dann weitere Möglichkeiten. Vor allem unter dem Aspekt von Design-for-Manufacturing lässt sich eine Verbesserung der Produkte erzielen. So gehen besonders aufwendige und engpassanfällige Produktionsschritte direkt aus den Prozessmodellen hervor. Werden Prozessmodelle und Produkte miteinander verbunden und ein virtuelles Abbild der Produktion geschaffen, kann man hier auch von einem "Digitalen Zwilling" der Produktion sprechen. Für den Produktentwickler ergeben sich hieraus vor allem positive Effekte im Bereich der ganzheitlichen Eigenschaftsabsicherung über den Produktentstehungsprozess.

---

## 2 Hintergrund und Stand der Forschung

### 2.1 Produkt- und Prozessdaten-Management

Gegenwärtige PDM-Systeme verwalten die Produktstruktur hierarchisch und statisch [2]. Dabei steht das Projekt an oberster Stelle der Struktur, gefolgt von Produkten, die sich dann jeweils in einzelne Baugruppen gliedern. Mit dieser Struktur lassen sich vor allem CAD-Daten sehr gut verwalten, da CAD-Modellbäume ähnlich hierarchisch und statisch aufgebaut sind. Hier ist schon erkennbar, dass für die Integration von weiteren Daten, neue Funktionen im PDM-System notwendig sind. Dabei ist es zum Beispiel möglich CAE-Daten mit der zugehörigen CAD-Geometrie zu verknüpfen, die CAE-Eingangsdaten werden semantisch an die CAD-Geometrie gekoppelt. Nach [3] stellen PDM-Systeme unter anderem folgende Funktionalitäten bereit: Datenstrukturmanagement, Versionsverwaltung, Projektmanagement, Arbeitsablauf- und Prozessverwaltung. Gerade die Integration von Arbeitsabläufen und Prozessen ermöglicht neben dem reinen Produktdatenmanagement auch das Management von unternehmensinternen Prozessen. Dabei stehen vor allem Geschäftsprozesse, wie ein Zeichnungsfreigabeprozess oder ein Angebotserstellungsprozess im Fokus. Um weitere Prozessen im Sinne eines ganzheitlichen Prozessdaten-Managements zu integrieren, könnte hier angesetzt werden. Im vorliegenden Fall ist dies der Fertigungsprozess, der vor allem im Rahmen der Digitalisierung der Fertigung immer weiter in den Fokus der "Digital Production" rückt. Auch unter Gesichtspunkten einer Eigenschaftsabsicherung über den Fertigungsprozess hinaus, ist die Betrachtung des jeweiligen Fertigungsprozesses relevant. Grundsätzlich werden durch PDM-Systeme alle Informationen, die im Produktentstehungsprozess anfallen, transparent und nachvollziehbar abgelegt und miteinander verknüpft [4]. Gegenwärtig erfolgt diese Verknüpfung über die Definition von Metadaten. Zu verknüpfende Informationen können dabei zum Beispiel CAD-Daten, Anforderungslisten oder Simulationsdaten sein. Die zur Verknüpfung verwendeten Metadaten sind vor allem Daten, wie etwa die Teilenummer, der Ersteller oder die aktuelle Versionsnummer des Bauteils (siehe Bild 1). Die nächst höhere Integrationsebene wären semantische Systeme, die mit Hilfe einer semantischen Beschreibung des Produktes aus den vorhandenen Quellen sämtliche Produktdaten akquirieren und bereitstellen. Diese sogenannte semantische Produktbeschreibung soll im Folgenden noch einmal genauer erläutert werden.

### 2.2 Semantische Produktbeschreibung

Die VDI 2221 beschreibt den Produktentwicklungsprozess (PEP) als Problemlösungsprozess [5]. Er ist aufgeteilt in die Planungs-, Konzept-, Entwurfs-

und Ausarbeitungsphase. Aus jeder dieser Phasen resultieren Produktbeschreibungen. Diese reichen von den Anforderungslisten bis hin zu den Fertigungsunterlagen. Sie bilden die Wissensbasis des PEP und sind in Bild 2 auf der linken Seite dargestellt. Damit Wissensbasis den Werkzeugen der digitalen Transformation zur Verfügung gestellt werden kann, muss sie in ein formales (computerverarbeitbares) Format überführt werden. Eine Möglichkeit für ein formales Wissensmodell und somit eine semantische Produktbeschreibung bieten Ontologien [6].

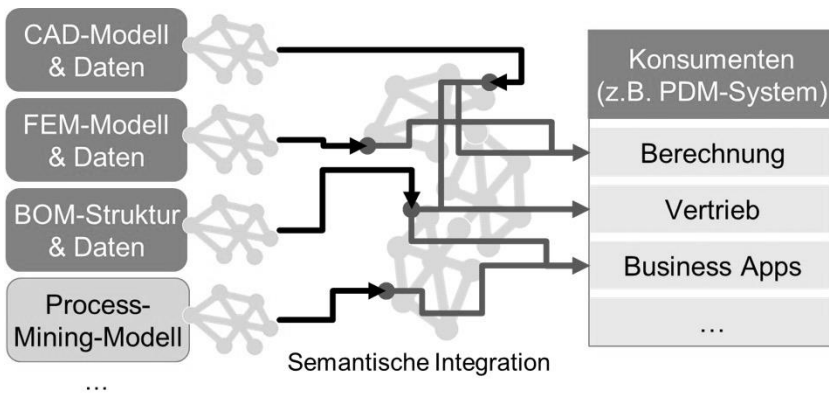


Bild 2: Semantische Produktbeschreibung

Eine Ontologie beschreibt eine Konzeptualisierung eines definierten Bereichs, welche von einer Anwenderdomäne geteilt wird, und kann als explizite, formale Beschreibung dienen [7]. Das Konzept ergibt sich aus der Definition von Klassen durch deren Attribute und deren Relationen, welche sie untereinander verknüpfen. Ontologien werden mit Hilfe von speziellen Repräsentationssprachen modelliert. In dieser Arbeit wird hierfür OWL (Web Ontology Language) verwendet [8]. Die Darstellung der Produktbeschreibung mit Hilfe einer Ontologie führt zu dem Begriff semantische Produktbeschreibung.

Durch die Beschreibung mit Ontologien ergeben sich folgende Eigenschaften für das formale Wissensmodell. Zum einen ist die Semantik durch die Repräsentationssprache definiert. Des Weiteren bietet sich durch Repräsentation in OWL die Möglichkeit Schlussfolgerungen automatisch aus der Produktbeschreibung abzuleiten. Hierfür werden Reasoner, wie zum Beispiel Pellet, eingesetzt [9]. Außerdem ist es möglich durch ontologiebasierte Integration die Konzepte miteinander zu verknüpfen. Diese Eigenschaft ermöglicht es einzelne semantische Produktbeschreibungen bei Bedarf in ein einziges Wissensmodell zu transferieren. Dieses Vorgehen wird als semantische Integration bezeichnet

und ist im mittleren Teil von Bild 2 dargestellt. Hierfür werden Merging und Mapping Techniken für Ontologien eingesetzt. Erstes wird genutzt, wenn eine Ontologie eigenständig in das globale Konzept integriert werden kann, ohne dass eine Schnittmenge gebildet wird. Beim Mapping muss für die Integration ein Übertragungsschema, welches die Schnittmenge beschreibt, erstellt werden.

### 2.3 Process-Mining vs. Data-Mining

Im Folgenden sollen die beiden Analysemethoden Data-Mining und Process-Mining voneinander abgegrenzt werden. Data-Mining-Methoden zielen vor allem darauf ab, anfallende Daten aus dem Unternehmen zu analysieren, um unerwartete Beziehungen zu finden und die Daten auf neuartige Weise zusammenzufassen, die für den Dateneigentümer sowohl verständlich als auch nützlich sind [10]. Diese Beziehungen und Schlussfolgerungen aus den Daten im entsprechenden Kontext können auch als das gewonnene Wissen aufgefasst werden. Wie das Data-Mining ist das Process-Mining ebenfalls datengetrieben. Im Gegensatz zu Process-Mining sind Data-Mining-Methoden jedoch nicht prozessorientiert. Prozessmodelle, wie zum Beispiel Petri-Netze, können von den wichtigsten Data-Mining-Tools weder entdeckt noch analysiert werden [11]. Einige wenige Data-Mining-Methoden kommen dem Process-Mining jedoch nahe, zum Beispiel Sequenz- oder Episodenmining [10]. Diese Techniken berücksichtigen jedoch keine Ende-zu-Ende-Prozesse. Bild 3 zeigt ein, durch eine Process-Mining erzeugtes Petri-Netz für die vier Jahreszeiten eines Jahres. Die einzelnen Jahreszeiten sind dabei als Vorgänge, in denen das Jahr in einem gewissen Status verharret, durch einen Kasten mit runden Ecken dargestellt. Die Zwischenstationen, durch einen Kreis ausgedrückt, ermöglichen die Beschreibung eines Informationsübertrags von einem Status in einen anderen. Dieser Informationsübertrag könnte zum Beispiel eine Zeitdauer oder eine Änderung eines Parameters der mittleren Monatstemperatur sein.

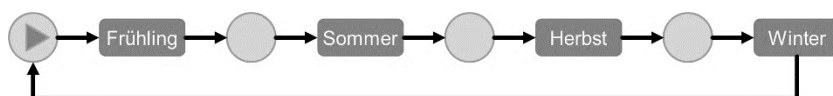


Bild 3: Beispielhaftes Petri-Netz der vier Jahreszeiten

Mit Hilfe von Petri-Netzen lassen sich zum Beispiel Produktionsabläufe oder Prozesse visualisieren [10]. Erzeugte Petri-Netze müssen nicht unbedingt in sich geschlossene Ketten bilden, sondern können auch Verzweigungen enthalten. Als Analyseaspekte für die Modellierung dienen vor allem die Dauer der einzelnen Prozessschritte oder die Häufigkeit des Auftretens einzelner Fehlercodes, die meist unternehmensintern definiert sind.

---

### 3 Forschungsproblem

Ausgehend von diesem Stand der Forschung eröffnen sich einige Forschungsfragen, die in diesem Abschnitt herausgearbeitet werden. Die vorher beschriebenen Methoden sollen nun auf die Produktentwicklung und die Herstellungsprozesse übertragen werden. Eine Forschungsfrage lautet in diesem Zusammenhang: *Wie lässt sich Wissen über den Herstellungsprozess in der Produktentwicklung nutzen?* Grundsätzlich bietet sich die Möglichkeit, Produkte auf den jeweiligen Herstellungsprozess oder die Herstellungsprozesskette zu optimieren. Prozessmodelle des Fertigungsprozesses ermöglichen dabei in erster Linie eine Analyse von Engpässen oder die Detektion von Teilen mit erhöhter Nacharbeit. Durch Erkenntnisse aus diesen Modellen lassen sich zum Beispiel Nacharbeit oder Iterationsschritte während des Entwicklungsprozesses einsparen. Darüber hinaus lassen sich auch Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die entstehenden Produkteigenschaften, im Sinne einer Eigenschaftsabsicherung über den Produktionsprozess, erfassen. Im Folgenden wird vor allem auf die Beschreibung des Prozesses durch Process-Mining Modelle eingegangen.

Eine weitere Frage lautet: *Wie lassen sich Herstellungsprozesse durch adäquate Modelle computerverarbeitbar beschreiben?* Dafür nutzt die in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehensweise Methoden des Process-Mining. Dadurch können Prozessmodelle wie zum Beispiel Petri-Netze erzeugt werden. Diese werden dann mit Informationen aus dem Prozess (Dauer, Menge, Fehlercodes) aufgewertet und für eine Analyse bereitgestellt. Im folgenden Konzept soll darauf eingegangen werden, wie die Eingangsdaten für solche computerverarbeitbaren Modelle aussehen müssen.

Im Kontext einer wie in Abschnitt 2.2 angesprochenen semantischen Produktbeschreibung stellt sich noch eine weitere Frage: *Wie lassen sich die erzeugten Modelle der Herstellungsprozesse mit einer semantischen Produktbeschreibung verknüpfen?* Dies wird durch genannte semantische Schnittstellen ermöglicht, die der semantischen Integration zugeführt werden können, um dadurch die Informationsdichte der Produktbeschreibung zu erhöhen. Auf einen möglichen Ansatz für eine semantische Schnittstelle wird im Anwendungsbeispiel näher eingegangen.

### 4 Konzept

Für die Erfassung von Prozessen eignen sich wie oben erwähnt besonders Methoden des Process-Mining. Diese setzen dabei direkt auf den Protokollen des Prozesses auf. Protokolle lassen sich z.B. durch eine Prozessüberwachung während der Herstellung automatisiert erfassen. Im Zeitalter von Industrie 4.0

---

lassen sich solche Prozessüberwachungsmethoden zum Beispiel über Internet of Things (IoT) Ansätze verwirklichen. Dabei wird eine Fertigungsprozesslinie mit Sensoren bestückt. Diese erheben in definierten Abständen Daten über den gesamten Fertigungsprozess. In einer gemeinsamen Datenbank laufen dann all diese Daten zusammen und werden zentral abgespeichert. Innerhalb dieser Protokolle werden die einzelnen Prozessschritte in ihrer Reihenfolge, Dauer und inklusive aller auftretenden Störungen in Form von Fehlercodes erfasst. Dabei können Synergieeffekte genutzt werden, wenn die zu überwachende Fertigungsline innerhalb der digitalen Fabrik integriert wird. Grundlage dieses Prozessprotokolls ist das standardisierte XES-Format. Der von der IEEE entwickelte "Standard for eXtensible Event Stream for Achieving Interoperability in Event Logs and Event Streams", kurz XES definiert verschiedene Typen von "Event streams" also Ereignis-Datenströmen die einen Prozess beschreiben [12]. Meist handelt es sich dabei um Datensätze, die bezogen auf eine zu fertigende Einheit vorliegen. Um eine Auswertung im Sinne des Process-Minings durchzuführen müssen vor allem die folgenden Daten enthalten sein:

- **Case ID** – eindeutige Nummer um ein Bauteil während des Prozesses zu verfolgen. Aufgrund der Verfolgbarkeit des Bauteils durch den Prozess ist diese eindeutige Nummer sehr wichtig. (Traceability)
- **Activity** – der vom Bauteil gerade durchlaufene Prozessschritt
- **Ressource** – der Ort oder die Ressource die den Prozessschritt bereitstellt
- **Start Timestamp** – der Zeitstempel als die **Activity** begonnen wurde
- **Complete Timestamp** – der Zeitstempel bei dem die **Activity** abgeschlossen wurde
- **Work Order Quantity** – die Menge der Teile in einem zu fertigenden Paket das den Prozess durchläuft, setzt sich aus der abgeschlossenen und fehlerhaften Menge zusammen
- **Part Description** – menschenlesbare Teilbeschreibung
- **Report Type** – die Beschreibung des eventuellen aufgetretenen Schadenfalls oder firmeninternen Fehlercodes

---

Ist ein solches Prozessprotokoll erstellt und liegt noch als tabellarischer Datensatz in einem Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel vor, lässt sich dieser Datensatz mit Hilfe der ProM-Software in das XES-Format konvertieren. Dieser Schritt ist notwendig, da die Process-Mining Methoden nur mit dem Austauschformat XES für Prozessdaten arbeiten. Auf Basis dieses Formats können dann Modelle des Herstellungsprozesses generiert werden. Dabei ist vor allem die Reihenfolge und die jeweilige Dauer der Prozessschritte von Interesse, um zum Beispiel im Rahmen eines Engpassmanagements oder einer Produktionsplanung frühzeitig eine Analyse der Prozesskette durchzuführen.

Ein Aspekt des Process-Mining ist dabei die Formulierung sogenannter Petri-Netze, die neben einer Erfassung der Dauer auch die Abfolge der einzelnen Herstellungsprozessschritte ermöglichen. Um die Erzeugung solcher Modelle zu vereinfachen ist die Verwendung einer entsprechenden Softwarelösung ratsam. In diesem Beitrag wurde hierfür die Software Disco verwendet [13]. Ähnlich der Herangehensweise bei einem Data-Mining-Prozess für Simulationsdaten [14] oder dem CRISP-DM [15], kann innerhalb von Disco vorgegangen werden. In einem ersten Schritt wird die Data Preparation, also die Datenvorbereitung durchgeführt. In diesem Schritt werden die Prozessdaten gefiltert und aufbereitet. So werden zum Beispiel unvollständige Zeilen entfernt. Die CRISP-DM Schritte Business und Data Understanding werden vorerst ignoriert, da die Modellerzeugung im Vordergrund steht. An die Datenvorbereitung schließt das Modeling, also die Modellerstellung, an. Hierbei werden Petri-Netze erzeugt, die wie in Kapitel 2.3 beschrieben ein genaues Modell des Prozesses erzeugen. Während der Evaluation werden innerhalb der Software die Modelle überprüft und auf die Konformität der Abbildung anhand des vorliegenden Prozessprotokolls geprüft. Der Schritt Deployment, die Bereitstellung, ist für eine grundsätzliche Analyse zwar nicht relevant, schließt aber in diesem Fall die Bereitstellung des Prozessmodells über eine semantische Schnittstelle ein, Bild 4 im nächsten Abschnitt fasst diese einzelnen Teilschritte noch einmal übersichtlich zusammen.

Ist nun ein solches Process-Mining Modell erstellt worden, kann dieses durch eine XML-basierte Beschreibungssprache computerverarbeitbar abgelegt werden. So kann ein Petri-Netz mit Hilfe der Disco Software direkt als XML-Modell exportiert werden [13]. Auf Basis dieser Formulierung setzen nun semantische Schnittstellen an. Über diese Schnittstellen lassen sich dann Abfragen durchführen, die es ermöglichen einzelne Aussagen aus dem Prozess zu ziehen. Hierfür wird die Ontologie-Abfragesprache SPARQL verwendet [8]. Die erzeugten Petri-Netze werden genutzt, um zum Beispiel Engpässe in der Produktion aufzudecken oder Entscheidungen entlang des PEP, die zu einer erhöhten Nacharbeit führen aufzudecken.



## 5 Anwendungsbeispiel: Fertigungsprozess

Anhand eines beispielhaften 7-teiligen Herstellungsprozesses für verschiedene Bauteile wird in diesem Abschnitt die Umsetzung des Konzepts beschrieben. Dabei wurden die Daten für den Prozess in tabellarischer Form aus dem Datensatz der TU Eindhoven gewonnen [16]. Dieser Datensatz ist frei verfügbar und kann ohne weitere Einschränkungen verwendet werden. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben setzt sich die Vorgehensweise aus den Schritten Datenvorbereitung, Modellerzeugung, Evaluation und Bereitstellung zusammen. Zur besseren Übersichtlichkeit zeigt Bild 4 den entstehenden Arbeitsablauf.

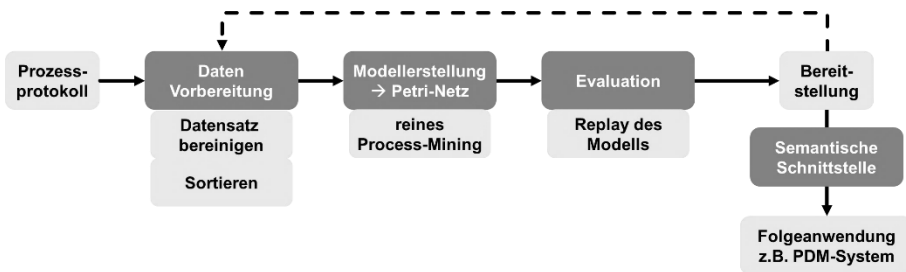


Bild 4: Workflow zur Erzeugung und Bereitstellung von Prozessmodellen

Ausgehend von einem Prozessprotokoll werden die Daten bereinigt und für den eigentlichen Schritt des Process-Mining vorbereitet. Process-Mining erzeugt dann aus dem bereinigten Datensatz ein Petri-Netz, welches durch das sogenannte Replay, also die Simulation des Prozesses aus dem Modell heraus und dem Abgleich mit den realen Daten die Konformität des Modells mit dem Prozess sicherstellt. Diese Konformität fungiert dabei ähnlich wie ein Gütekriterium bei einem Data-Mining-Prozess. Ist das Petri-Netz erzeugt und auf seine Konformität geprüft ergibt sich ein Prozessmodell wie in Bild 5 gezeigt. Die einzelnen Prozessschritte werden in ihrer Abfolge mit den in diesem Fall erhobenen Daten Menge und Dauer verknüpft dargestellt.

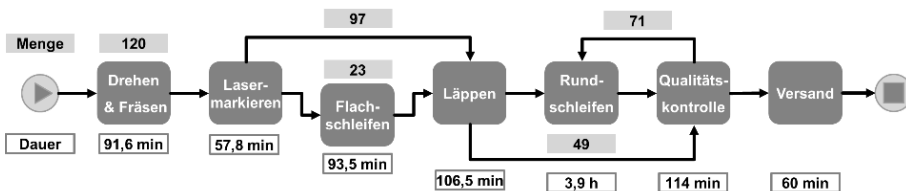


Bild 5: Beispielprozessmodell erzeugt aus dem Datensatz [16]

---

Wie in Bild 5 gezeigt können dabei auch Verzweigungen auftreten. Dies ist in diesem Fall dadurch zu erklären, dass die gefertigten Bauteile nach dem Prozessschritt schon die erforderliche Güte aufwiesen und deswegen die Nacharbeitsschritte für diese Teile entfallen. Das Prozessmodell kann nun in einem XML-Format abgespeichert werden. Die Aussagen, die aus dem Prozessmodell gezogen werden können, müssen in einem weiteren Schritt durch eine semantische Schnittstelle beschrieben werden. Dadurch wird es möglich, das bereitgestellte Prozessmodell für Folgeprozesse nutzbar zu machen. So können zum Beispiel PDM-Systeme auf Fertigungsprozesse und deren Daten zugreifen. Diese semantische Schnittstelle wird in diesem Beitrag über Ontologien realisiert. In der Beschreibung dieser Schnittstelle wurden die Klassen Prozess, Fertigungsschritt und Produkt eingeführt. Für die Eigenschaften des Prozesses gilt, dass dieser immer einen oder mehrere Fertigungsschritte enthält. Das Produkt benötigt immer mindestens einen Prozess. Der Prozess selbst hat dann im vorliegenden Fall die Eigenschaften: Zeitdauer, Menge, Fehlercode. Das daraus resultierende semantische Modell, stellt eine grundlegende Beschreibungsmöglichkeit der Prozessmodelle dar. Weitere Forschungsbedarfe richten sich an eine Erweiterung der Beschreibungsmöglichkeiten innerhalb der semantischen Schnittstelle.

Die so geschaffenen Methoden können dann auf weitere Fertigungsverfahren übertragen werden. Ein Beispiel wäre hier der Übertrag auf die Blechmasivumformung. Hierfür wären die jeweiligen Prozessmodelle für unterschiedliche umformtechnische Fertigungsverfahren für die gleiche Bauteilgestalt relevant. Dadurch können Aussagen für den zur Bauteilgestalt idealen Umformprozess getroffen werden, um zum Beispiel die Gestaltoptimierung [17] zu verbessern. So lassen sich dann die entsprechenden Prozessmodelle, mit den entstehenden Produkteigenschaften verbinden und dadurch eine Aussage über das passende Fertigungsverfahren gewinnen. Existieren diese Modelle in frühen Phasen der Produktentwicklung, kann dadurch für kommende Produktgenerationen eine Verbesserung herbeigeführt werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde gezeigt, dass Process-Mining als Werkzeug für die Modellierung des Herstellungsprozesses geeignet ist. Die Verknüpfung zur semantischen Produktbeschreibung erfolgt durch eine semantische Schnittstelle. Dadurch lassen sich Produktionsprozesse analysieren und z.B. Auffälligkeiten oder Engpässe während der Herstellung im übergeordneten PDM-System erfassen. Darüber hinaus lassen sich entstehende Produkteigenschaften im Rahmen einer Eigenschaftsabsicherung über den Produktentstehungsprozess erfassen und absichern.

---

Weitere Forschungsbedarfe richten sich vor allem auf die semantische Beschreibung der Schnittstelle, zum Beispiel über eine Standardisierung XML-basierten Datenstruktur. Darüber hinaus sind auch noch weitere Process-Mining Methoden auf ihre Eignung als Modellierungswerkzeug zu untersuchen.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekts B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 73.

Daneben ist diese Forschungsarbeit Teil des an der FAU geförderten Projekts "Optimierung und automatisierte Entwicklung mechatronischer Produkte" (EFRE/OptMePro) und wird durch das bayerische Programm "Investition für Wachstum und Beschäftigung" des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 finanziert. Dieser wird vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie verwaltet. Für den Inhalt dieser Publikation sind die Autoren verantwortlich.

## Literatur

- [1] Abramovici, M.; Gerhard, D.: "Use of PDM in Improving Design Processes - State of the Art, Potentials and User Perspectives", Proceedings of the 11th International Conference on Engineering Design ICED 97, Rii-tahuhta, A., Design Society Tampere, 1997, S. 317–322.
- [2] Conrad, J. et al.: "Comparison of knowledge representation in PDM and by semantic networks", ICED 2007 - Paris, 16th International Conference on Engineering Design, J.-C. Bocquet, Design Society Paris, 2007, S.550.
- [3] Eigner, M; Stelzer R.: "Product Lifecycle Management", Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [4] Vajna, S. et al.: "CAx für Ingenieure", Springer Vieweg Berlin, 2018.
- [5] VDI 2221: "Methodik zum Konstruieren und Entwickeln technischer Systeme und Produkte", Beuth, Berlin, 1993.
- [6] Kestel, P. et al.: "Konzept zur zielgerichteten, ontologiebasierten Wiederverwendung von Produktmodellen", Beiträge zum 28. DfX-Symposium 2017, Krause, D.; Pätzold, K.; Wartzack, S., TuTech Verlag, Hamburg, 2017.

- 
- [7] Staab, S.; Studer, R.: "Handbook on Ontologies (second edition). International Handbooks on Information Systems", Springer Heidelberg, Berlin, 2009.
- [8] "OWL 2 web ontology language document overview (second edition)", Technical report, W3C, 2012, <http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-overview-20121211>.
- [9] Sirin, E. et al.: "Pellet: A practical OWL-DL reasoner", Web Semantics Volume 5 Issue 2, 2007, 51-53.
- [10] van der Aalst, W.: "Process Mining", Springer Heidelberg, 2016.
- [11] Hand, D.; Mannila, H.; Smyth, P.: "Principles of Data Mining", MIT Press Cambridge, 2001.
- [12] IEEE: "Standard for eXtensible Event Stream (XES) for Achieving Interoperability in Event Logs and Event Streams", IEEE New York, 2016.
- [13] Günther, C.; Rozinat, A.: "Disco: Discover Your Processes." BPM (Demos) 940, 40-44, 2012.
- [14] Röhner, S.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: "Acquisition of design-relevant knowledge within the development of sheet-bulk metal forming", 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Copenhagen, Denmark, 2011.
- [15] Chapman, P. et al.: "CRISP-DM 1.0 Step-by-step data mining guide", CRISP-DM Consortium, 2000.
- [16] Levy, D.: "Production Analysis with Process Mining Technology", NooL – Integration People & Solutions, Dataset, 2014, <https://doi.org/10.4121/uuid:68726926-5ac5-4fab-b873-ee76ea412399>.
- [17] Ashhab, S.; Breitsprecher, T.; Wartzack, S.: "Neural network based modeling and optimization of deep drawing – extrusion combined process", Journal of Intelligent Manufacturing 25: 77, 2014.