

Ein Beitrag zum Lebenszyklusmanagement von Simulationsmodellen in der Digitalen Fabrik

A Contribution to Simulation Model Lifecycle Management in the Context of Digital Manufacturing

Sven Völker, Hochschule Ulm, Ulm (Germany), voelker@hs-ulm.de

Jörg W. Fischer, Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe (Germany),
joerg.fischer@hs-karlsruhe.de

Abstract: A variety of simulation models is created in the context of Digital Manufacturing. Each of these models is used for specific purposes and has an individual lifecycle. Identifying and managing interdependencies between the models along the product and factory lifecycle is an essential part of Digital Manufacturing. The paper proposes a classification of the different types of relations between simulation models. Furthermore, it explains how Lifecycle Mapping can be used for documenting model relations along the product and factory lifecycle. Lifecycle Mapping provides a semiformal, easy-to-understand notation that proved to be useful in PLM projects already. The paper shows that Lifecycle Mapping is applicable in the context of Digital Manufacturing as well.

1 Motivation

Der Einsatz von Simulation zur Planung, Absicherung, Inbetriebnahme und Optimierung produktionslogistischer Systeme ist im Kontext der Digitalen Fabrik heute Stand der Technik. Dabei wird Simulation nicht nur einmal im Fabrikplanungsprozess genutzt, sondern kommt in verschiedenen Planungsphasen zur Anwendung (Grundig 2014, S. 241 f.). Im Rahmen der Digitalen Fabrik entstehen dabei mehrere Modelle, die teilweise aufeinander aufbauen, sich gegenseitig ergänzen und die parallel weiterentwickelt werden. Auch kommen je nach untersuchter Fragestellung unterschiedliche Modelltypen zum Einsatz. In der Praxis der Digitalen Fabrik gibt es Defizite beim Management der Interdependenzen zwischen Modellen, und die mangelnde Interoperabilität der Modelle wird beklagt (Wiendahl et al. 2014, S. 518).

Bereits die Definition des Begriffs „Digitale Fabrik“ hebt darauf ab, dass es sich um ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen und Methoden handelt (VDI 2008, S. 3). Die vernetzten Modelle müssen in ihrer Gesamtheit jedoch nicht unbedingt ein redundanzfreies und global konsistentes Gesamtmodell der Fabrik ergeben. Redundanzen und Widersprüche zwischen den Teilmodellen der Digitalen Fabrik

sind nicht nur unvermeidlich, sondern gelegentlich auch gewollt. Trotz beachtlicher Fortschritte auf dem Gebiet der Digitalen Fabrik (siehe z. B. Zülch et al. 2002) wird das Management der wechselseitigen Modellabhängigkeiten in der Praxis nicht vollständig beherrscht. Zwar umfassen Implementierungsprojekte der Digitalen Fabrik meist Analysen darüber, welche Planungs- und Simulationsmodelle benötigt werden. Welche Beziehungen zwischen den Modellen bestehen sollen, wird aber in der Regel nicht geklärt. Das führt in der Praxis dazu, dass das Modellmanagement nicht organisatorisch verankert wird und die technischen Schnittstellen nicht bedarfsgerecht oder gar nicht implementiert werden.

Daher bedarf es einer Methode zum Erfassen, Dokumentieren und Visualisieren des Zusammenwirkens von Simulationsmodellen. Die erfassten Zusammenhänge bilden dann die Grundlage für die Soll-Konzeption des Lebenszyklusmanagements von Simulationsmodellen. Der vorliegende Beitrag stellt zunächst eine Klassifikation der möglichen Modellbeziehungen vor, geht dann kurz auf gängige Modellierungsmethoden ein und schlägt schließlich Lifecycle Mapping als Methode zur Dokumentation von Modelllebenszyklen in der Digitalen Fabrik vor.

2 Beziehungen zwischen Simulationsmodellen in der Digitalen Fabrik

Ebenso wie das Produkt hat auch die Fabrik einen Lebenszyklus (Bauernhansl 2014, S. 25). In unterschiedlichen Lebenszyklusphasen der Fabrik werden Simulationsmodelle unterschiedlicher Granularität für unterschiedliche Zwecke eingesetzt. Am Beginn jeder Simulationsuntersuchung steht die Festlegung des Untersuchungszwecks, idealerweise in Form einer quantitativen Fragestellung (Williams und Ülgen 2012, S. 3668). Die Fragestellung determiniert den zu modellierenden Gegenstand, die Systemgrenzen und den erforderlichen Detaillierungsgrad des Modells. Daraus wiederum ergeben sich der geeignete Modelltyp sowie die einzusetzenden Softwarewerkzeuge. Klar voneinander abgegrenzte Fragestellungen führen in der Regel auch zu separaten Modellen.

Die verschiedenen Modelle der Digitalen Fabrik stehen untereinander in Beziehung, wobei nur einige dieser Beziehungen explizit, also mit dem Austausch von Daten oder Modellbestandteilen verbunden sind. Viele Beziehungen sind implizit, sollten aber dennoch gemanagt werden. Wie Abbildung 1 zeigt, können vier grundlegende Beziehungstypen unterschieden werden, die zum Teil weiter zu differenzieren sind:

Typ A: Zwei Modelle sind alternativ, wenn sie konkurrierende Konzepte für ein zu realisierendes Produktionssystem abbilden (Planungsalternativen). Als Ergebnis der Simulation erweist sich eine der Planungsalternativen überlegen und wird weiter verfolgt, die andere wird verworfen.

Typ B: Zwei Modelle sind komplementär, wenn sie verschiedene Subsysteme des zu realisierenden Produktionssystems abbilden, die sich gegenseitig ergänzen.

Typ C: Ein Modell baut auf einem anderen Modell auf, wenn es dieses verfeinert oder komplett ersetzt. Dieser Fall ist zu unterscheiden vom normalen Reifungsprozess eines Modells innerhalb einer Planungsphase. Aufeinander aufbauende Modelle unterscheiden sich darin, dass sie der Beantwortung verschiedener Fragestellungen oder derselben Fragestellung auf unterschiedlichem Detaillierungsgrad

dienen. Ein Spezialfall ist die Ableitung eines Grobmodells für die Konzeptplanung aus einem Feinmodell, das den aktuellen Ist-Zustand repräsentiert.

Typ D: Zwei Modelle können den gleichen Ausschnitt des Realsystems abbilden, aber unterschiedliche zeitliche Gültigkeit besitzen. Beispielsweise könnte ein Modell den aktuellen Zustand des Produktionssystems repräsentieren, während ein weiteres Modell dem künftigen Zustand der Fabrik nach Abschluss geplanter Umbaumaßnahmen entspricht.

Typ E: Für das Verständnis des Zusammenwirkens der Modelle einer Digitalen Fabrik ist es auch wichtig zu erkennen, welche Simulationsmodelle unabhängig voneinander sind, obwohl sie verschiedene Aspekte derselben Fabrik abbilden.

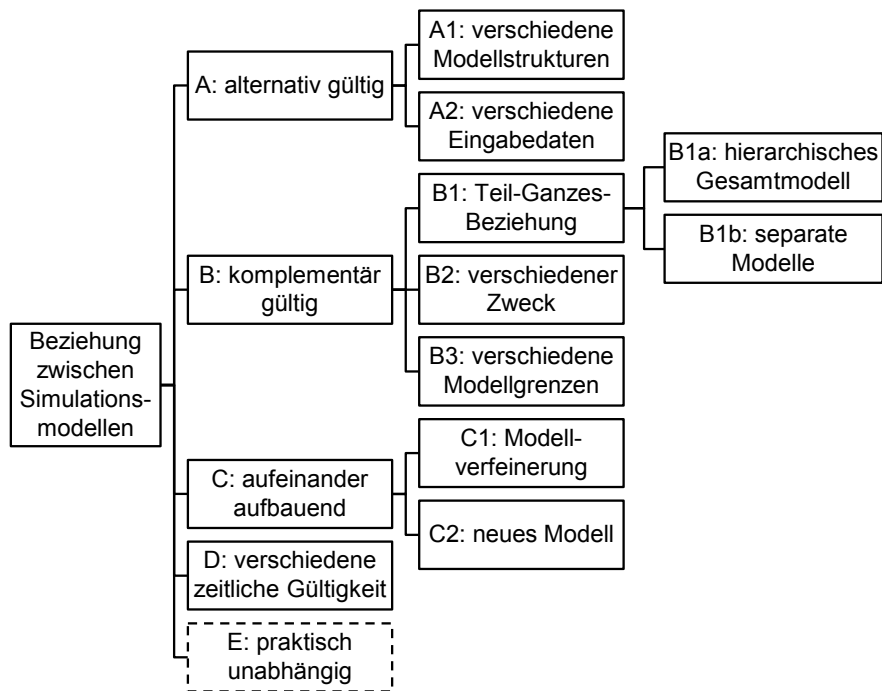


Abbildung 1: Mögliche Beziehungen zwischen Simulationsmodellen

Im Zuge der Implementierung der Digitalen Fabrik müssen die für ein Unternehmen relevanten Simulationsmodelle und deren Beziehungen über den Lebenszyklus hinweg geklärt werden. Die dafür infrage kommenden Methoden werden im Folgenden diskutiert.

3 Bekannte Methoden zur Erfassung und Beschreibung von Modellbeziehungen

In Implementierungsprojekten der Digitalen Fabrik werden heute meist bewährte Analyse- und Modellierungsmethoden aus dem Umfeld der Geschäftsprozessanalyse (Weske 2012) und der objektorientierten Analyse (O’Docherty 2005) eingesetzt. Die

Analyseergebnisse werden oft in den standardisierten Notationen der BPMN (OMG 2013) bzw. der UML (OMG 2015) dokumentiert. Wird bei der Analyse eine serviceorientierte Sichtweise betont, können auch Notationen aus dem Umfeld Serviceorientierter Architekturen eingesetzt werden, wie z. B. SRML (Fidaeiro et al. 2006).

Trotz der Mächtigkeit der genannten Notationen sind sie zur Darstellung von Modelllebenszyklen nur bedingt geeignet, weil sie nicht modell-, sondern aktivitäts- (BPMN), objekt- (UML) bzw. serviceorientiert (SRML) sind. Aus diesem Grund wurden von Fischer (2014) Lifecycle Maps als einfache, leicht verständliche und semiformale Notation vorgeschlagen. Lifecycle Maps können im Kontext von Digitale-Fabrik-Projekten genutzt werden, um gemeinsam mit den Fachexperten aus verschiedenen Planungsabteilungen den Lebenszyklus der benötigten Planungs- und Simulationsmodelle zu diskutieren und zu dokumentieren.

4 Lifecycle Mapping zur Modellierung der Lebenszyklen von Simulationsmodellen

Die als Lifecycle Maps bezeichnete Notation wurde ursprünglich im Kontext des Product Lifecycle Management (PLM) zur Erfassung und Visualisierung von Modellbeziehungen im Produkt- und Fabriklebenszyklus vorgeschlagen (Fischer und Stowasser 2013). Da Modelle der Digitalen Fabrik eine Teilmenge der für PLM relevanten Modelle sind (Eigner und Stelzer 2009, S. 2 ff.), eignen sich Lifecycle Maps auch zur Darstellung der Beziehungen zwischen Simulationsmodellen.

In der praktischen Anwendung werden Lifecycle Maps sowohl vom Ist-Prozess als auch vom zu entwickelnden Soll-Prozess angefertigt: Die Lifecycle Map des Ist-Prozesses hilft beim Identifizieren von Bereichen mit Optimierungspotenzial, für die dann ein Soll-Prozess entworfen wird. Im Folgenden wird die Notation der Lifecycle Maps an einem einfachen Beispiel erläutert (Abb. 2).

Basis der Lifecycle Map ist die Zeitachse. Auf ihr werden die für die Betrachtung wesentlichen Meilensteine des Produktentstehungsprozesses (PEP) notiert. Im nächsten Schritt werden die lebenden Teilmodelle als Rechtecke eingezeichnet. Dabei wird sich auf die Teilmodelle eines repräsentativen Produktes oder Produktionsablaufs konzentriert. Die Rechtecke beginnen zu dem Zeitpunkt, zu dem die Modelle im PEP erstmalig initiiert werden. Ihre Länge über dem Zeitstrahl symbolisiert ihre zeitliche Entwicklung. Streng genommen endet ein Teilmodell nicht, da die Daten über den PEP hinaus vorgehalten und auch "fertige" Teilmodelle oft zu einem späteren Zeitpunkt noch geändert werden. Das Rechteck endet in der Lifecycle Map daher zu dem Zeitpunkt, an dem die Arbeit am Teilmodell im Wesentlichen abgeschlossen ist. Falls es notwendig ist den Aspekt des "Weiterlebens" darzustellen, wird ein verkleinertes, gefülltes Rechteck und/oder eine über den Zeitstrahl weiterführende Linie verwendet. Die geringere Breite symbolisiert die geringere Arbeitsintensität am Teilmodell.

Bei der Analyse von Lifecycle Maps ist es wichtig, vorab einen Fokus zu definieren und diesen einzuhalten. Um zu verhindern, dass die Fachdiskussionen über diesen Fokus hinausgehen, werden "Out-of-Scope-Wolken" verwendet: Sie bezeichnen Aspekte, die außerhalb des Fokus der aktuellen Lifecycle Map liegen. Damit ist in der Diskussion jederzeit klar, dass es diesen Bereich gibt, er gegenwärtig aber nicht betrachtet wird.

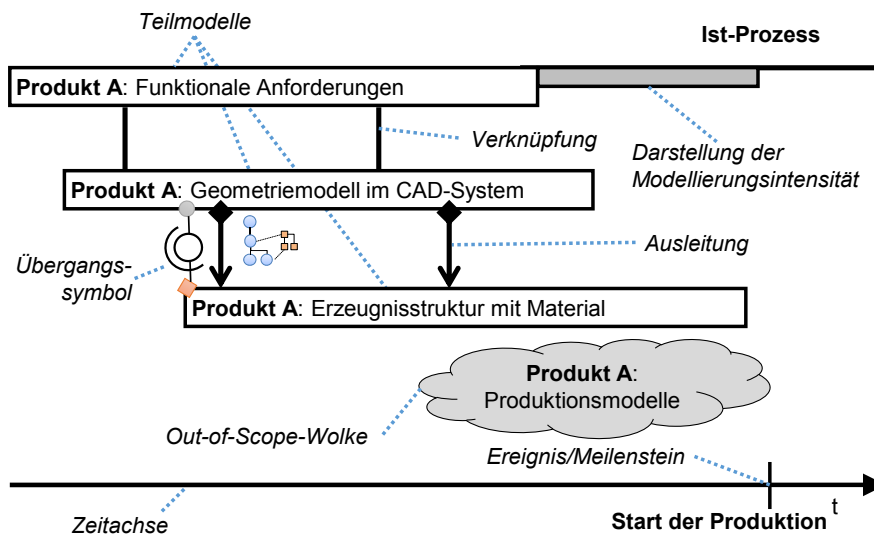


Abbildung 2: Lifecycle Map eines einfachen Ist-Prozesses

Die Analyse der Modelle im PEP umfasst zwei wesentliche Aspekte: die Entwicklung der Teilmodelle an sich (d. h. was innerhalb der gezeichneten Rechtecke geschieht) sowie die Interaktion zwischen den Teilmodellen im Lebenszyklus. Lifecycle Maps bilden den zweiten Aspekt, die Interaktion zwischen Teilmodellen, ab. Der erste Aspekt wird mit Hilfe anderer Diagrammtypen untersucht und ist nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags. Zur Darstellung der Interaktion von PLM-Modellen werden in Lifecycle Maps unterschiedliche Verbindungslinien (Linien, Pfeile, gestrichelte Pfeile etc.) sowie Übergangssymbole genutzt. Die Verbindungslinien beschreiben, wie die Modelle zueinander in Beziehung stehen bzw. gesetzt werden. Die Übergangssymbole zeigen, wie die jeweilige Verknüpfung organisiert wird. Die in Abbildung 2 dargestellten Übergangssymbole bedeuten beispielsweise, dass die Verbindung zwischen den Modellen von einer verantwortlichen Person aufrechterhalten wird und dass an der Stelle eine semantische Integration der Daten durchgeführt wird. Wie dies genau geschieht, kann mit Hilfe des Diagrammtyps "Semantic Map" des Lifecycle Mappings im Detail analysiert werden. Für weitere Symbole sei auf das in Abschnitt 5 beschriebene Beispiel verwiesen.

5 Lifecycle Mapping für die Digitale Fabrik eines Serientfertigers

5.1 Betriebliches Szenario

Nach der Klassifikation von Modellbeziehungen und der Vorstellung der Notation sollen die Beziehungstypen und ihre Darstellung in Lifecycle Maps an einem Beispiel erläutert werden. Das betriebliche Szenario liefert ein Hersteller von Elektrogeräten. Zur Produktpalette gehören Rasenmäher-Roboter, die im Folgenden Gegenstand der Betrachtung sind. Das Produkt wird in mehreren Varianten hergestellt. Die Produktion der Rasenmäher-Roboter erfolgt auf einer eigenen Montage-

linie, die sich in derselben Werkhalle befindet wie Montagelinien für andere Produkte des Unternehmens.

Da der Arbeitsaufwand pro Station von der Variante des jeweils bearbeiteten Produkts abhängt, müssen die Montageaufträge sequenziert werden. Diesem Zweck dient ein simulationsbasierter Optimierungsalgorithmus (siehe z. B. Iltzsche et al. 2010), der in das Fertigungssteuerungssystem integriert ist. Die werksinterne Materialversorgung erfolgt über Zugmaschinen und Stapler, die von einem eigenen Leitsystem gesteuert werden, das ein simulationsbasiertes Verfahren zur Allokation der Transportaufträge zu den Fahrzeugen nutzt.

Im Rahmen des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP, siehe z. B. Kostka und Kostka 2013) werden alle Montagelinien des Werkes regelmäßig hinsichtlich Abtaktung, Arbeitsplatzgestaltung und Materialbereitstellung überprüft. Dabei kommen 3D-Planungs- und -Simulationswerkzeuge zum Einsatz.

Die Unternehmensplanung sieht vor, eine neue Generation von Rasenmäher-Robotern auf den Markt zu bringen. Dabei soll auch die Produktionskapazität verdoppelt werden. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene alternative Linienkonzepte diskutiert, die simulativ zu bewerten sind, u. a. eine Duplikation der vorhandenen Linie und eine Verlängerung der Linie bei Halbierung der Taktzeit.

Außerdem erteilt der Produktionsleiter den Auftrag, eine Teilautomatisierung zu evaluieren: Konkret soll untersucht werden, ob das Palettieren der fertigen Rasenmäher künftig manuell oder durch einen Industrieroboter erfolgen soll.

5.2 Lifecycle Map der Simulationsmodelle

In dem beschriebenen Szenario kommen mehrere Simulationsmodelle zum Einsatz, die in bestimmten Phasen des Produkt- und Fabriklebenszyklus entwickelt, genutzt und miteinander synchronisiert werden. Die in Abbildung 3 gezeigte Lifecycle Map illustriert die Beziehungen zwischen den Modellen im Lebenszyklus.

Um simulationsbasierte Verfahren zur Auftragssequenzierung und Transportplanung einsetzen zu können, müssen zunächst geeignete Simulationsmodelle entwickelt und validiert werden. Nach Freigabe der Modelle werden sie im laufenden Fabrikbetrieb nicht mehr verändert, sondern nur noch genutzt, wobei sie über automatisierte Schnittstellen mit Auftragsdaten aus den jeweiligen Leitsystemen versorgt werden. Die beiden Modelle bilden verschiedene Bereiche des Produktionssystems ab, sind also komplementär (Beziehungstyp B3).

Die Simulationsmodelle sind ereignisdiskret, der modellierte Ausschnitt der Realität ist aus Performancegründen auf ein Minimum beschränkt: Feingranular sind die Modelle lediglich in Bezug auf die Montagezeiten (Sequenzierungsmodell) sowie die Lade- und Transportzeiten (Transportplanungsmodell). Das Sequenzierungsmodell ist nicht animiert, das Transportplanungsmodell stellt nur eine schematische 2D-Animation bereit. Obwohl beide Modelle parallel genutzt werden, besteht keine Notwendigkeit einer Modellkopplung, das heißt die Modelle sind praktisch voneinander unabhängig (Beziehungstyp E).

Parallel zur laufenden Produktion finden regelmäßig KVP-Workshops statt. Im Rahmen dieser Workshops wird ein 3D-Planungs- und Simulationsmodell genutzt, das insbesondere die Gestalt der Arbeitsplätze, die Abtaktung und das Bereitstellungs-Layout feingranular abbildet (Abb. 3: KVP-Modell). Das KVP-Modell überlappt

sich inhaltlich mit dem Sequenzierungs- und Transportplanungsmodell, dient jedoch einem anderen Zweck (Beziehungstyp B2) und hat einen anderen Typ.

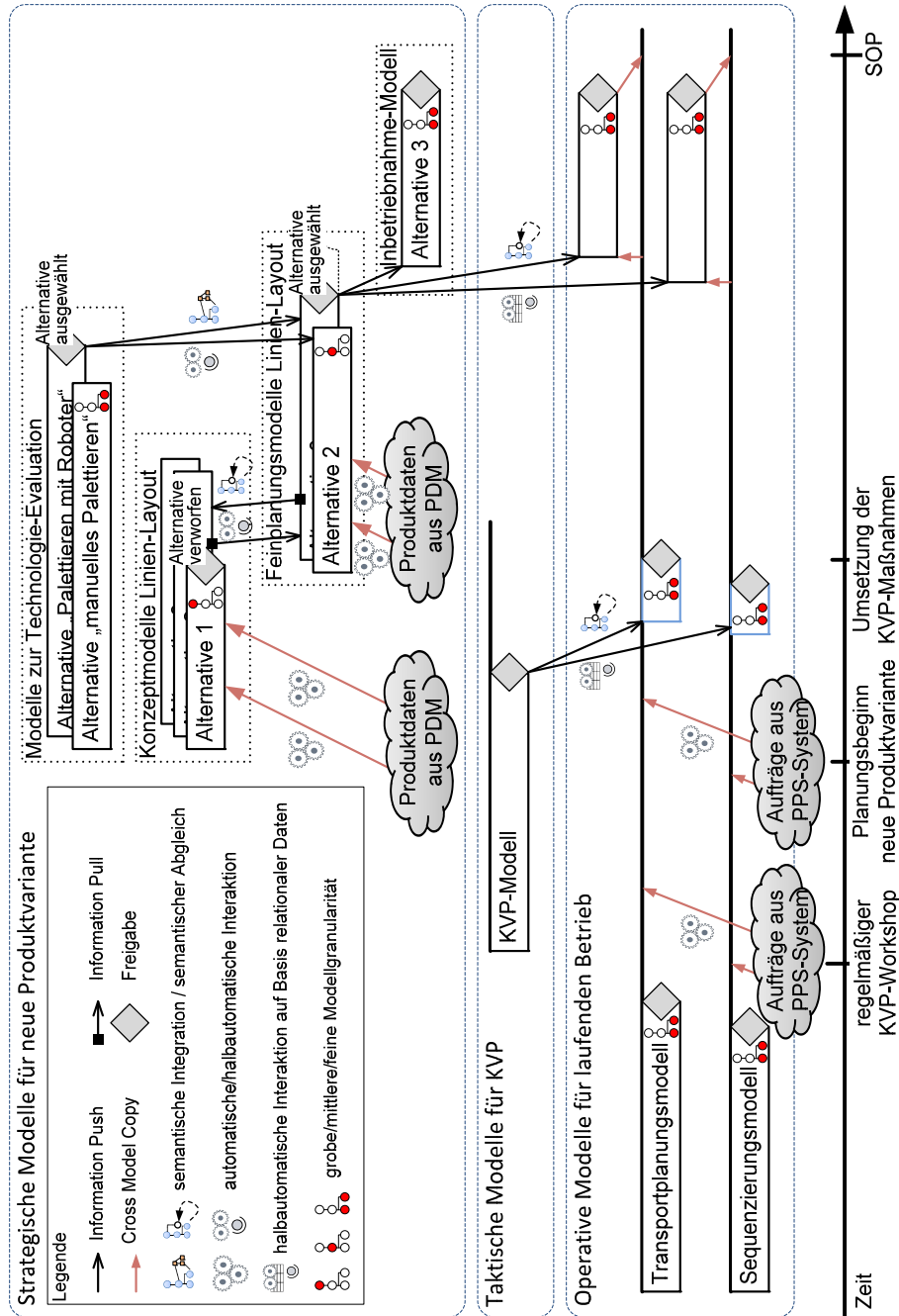


Abbildung 3: Lifecycle Map der Simulationsmodelle eines Serienfertigers

Nach Festlegung sinnvoller KVP-Maßnahmen müssen das Sequenzierungs- und das Transportplanungsmodell angepasst werden. Da die originalen Modelle während dieser Modellierungsphase weiterhin benötigt werden, müssen sie kopiert werden, so dass neue Modelle entstehen, die zwar denselben Ausschnitt der Realität abbilden, aber eine andere zeitliche Gültigkeit besitzen (Beziehungstyp D). Die Übertragung der KVP-Maßnahmen aus dem KVP-Modell in das Sequenzierungs- und das Transportplanungsmodell kann nur manuell oder halbautomatisch erfolgen. Erst wenn die modifizierten Modelle validiert und freigegeben wurden, können die KVP-Maßnahmen in der realen Fabrik umgesetzt werden.

Parallel zu Betrieb und fortlaufender Optimierung des Produktionssystems erfolgt die Fabrikplanung für die Einführung der neuen Produktgeneration. Dabei werden zunächst parallel und unabhängig voneinander zwei Planungsaufgaben bearbeitet: die Evaluation der Technologie-Alternativen für das Palettieren und der Entwurf eines Konzeptlayouts für die Montagelinie.

Zur Evaluation der Technologie-Alternativen werden zwei alternative, feingranulare Modelle des Palettier-Arbeitsplatzes benötigt (Beziehungstyp A1). Diese Modelle müssen trotz gleicher Aufgabenstellung nicht zwangsläufig vom gleichen Typ sein: Während die Analyse des automatischen Palettierens eine 3D-Roboter-Simulation erfordert, kann das manuelle Palettieren auch mittels Cardboard Engineering (Gorecki und Pautsch 2014, S. 170 ff) untersucht werden.

In der Konzeptplanung zur Neugestaltung der Montagelinie werden verschiedene Linienskonzepte in ereignisdiskreten Simulationsmodellen mit 2D-Visualisierung abgebildet. Die Modelle können mit Hilfe von Simulationsbausteinen zur Repräsentation einzelner Arbeitsplätze hierarchisch strukturiert werden (Beziehungstyp B1a). Einige Alternativen können bereits in dieser Planungsphase verworfen werden, andere müssen in der Feinplanung ausdetailliert werden. Dazu werden neue Simulationsmodelle gebildet (Beziehungstyp C2): Die Feinplanungsmodelle bilden die 3D-Geometrie der Arbeitsplätze sowie den Verbauzustand des Produktes an den einzelnen Stationen ab. So ermöglichen sie Einbausimulationen und Werkzeugabsicherungen. Im Gegensatz zu den ereignisdiskreten Simulationsmodellen der Konzeptplanungsphase sind diese Modelle jedoch nicht geeignet, um Fragen aus dem Gebiet der Ablaufsimulation zu beantworten.

Aufgrund des Simultaneous Engineering überlappen sich die Modellierungsphasen von Konzept- und Feinplanungsmodellen. Bei der Arbeit mit diesen Modellen werden unter Umständen Erkenntnisse gewonnen, die eine Aktualisierung der jeweils anderen Modellgruppe erforderlich machen. Auch diese Aktualisierung kann nicht voll automatisiert werden, da sie ein ingenieurtechnisches Verständnis der zu übertragenden Sachverhalte erfordert. Gegenstand einer automatischen Modellaktualisierung sind jedoch Updates der Produktdaten, die über Standardschnittstellen aus dem PDM-System bezogen werden. Nach der Entscheidung für eine Technologie zum Palettieren muss das entsprechende Arbeitsplatzmodell in das Feinplanungsmodell integriert werden (Beziehungstyp B1b). Der Aufwand für diesen Schritt hängt von den verwendeten Simulationswerkzeugen ab. Die Integration erfordert aber auch im günstigsten Fall den manuellen Eingriff eines Simulationsanwenders.

Nach Abschluss der Feinplanung beginnt die Vorbereitung der Inbetriebnahme. Zur Absicherung automatisierter Komponenten der neuen Linie mittels virtueller Inbetriebnahme (Bracht et al. 2011, S. 215 ff.) wird ein Modell benötigt, dessen Gra-

nularität gegenüber den Feinplanungsmodellen noch einmal erhöht ist (Beziehungstyp C1): Das Inbetriebnahme-Modell muss das Verhalten der Anlage auf der Ebene der Aktor- und Sensor-Signale abbilden. Erst wenn die Programme zur Anlagensteuerung in der virtuellen Umgebung abgesichert wurden, werden sie auf der realen Anlage (nach deren Aufbau) implementiert. Parallel dazu werden auch neue Versionen des Sequenzierungs- und Transportplanungsmodells entwickelt, die ebenfalls bei Produktionsstart zur Verfügung stehen müssen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es gibt in der Digitalen Fabrik eine Vielzahl schwer zu überblickender Modellbeziehungen, die oft nur in bestimmten Lebenszyklusphasen relevant sind oder ihren Charakter im Zeitverlauf ändern. Die Vielzahl möglicher Modellbeziehungen kann jedoch auf relativ wenige Grundtypen zurückgeführt werden.

Erfahrene Simulationsexperten und Fabrikplaner besitzen umfangreiches – wenn auch meist nur implizites – Wissen über das Zusammenwirken von Simulationsmodellen im Fabriklebenszyklus. Dieses Wissen kann mit Hilfe von Lifecycle Maps explizit formuliert werden. Auf diese Weise schaffen Lifecycle Maps Transparenz über Modellbeziehungen und bilden so die Grundlage für die Soll-Konzeption der Digitalen Fabrik.

Bei der Soll-Konzeption werden erfahrungsgemäß immer wieder ähnliche Probleme diskutiert und üblicherweise ähnliche Lösungen gefunden. Das legt die Entwicklung und Anwendung von Entwurfsmustern nahe, wie z. B. der Lifecycle Sandbox (Fischer 2015). Entwurfsmuster spezifizieren die für einen bestimmten Anwendungsfall benötigten Modelltypen und –granularitäten sowie die Beziehungen und Informationsflüsse zwischen den Modellen im Lebenszyklus. Die Anwendung von Entwurfsmustern verkürzt die Konzeptionsphase bei der Implementierung der Digitalen Fabrik und reduziert das Risiko von Fehlern bei Modellpartitionierung und Schnittstellendefinition.

Literatur

- Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer 2014.
- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik. Heidelberg: Springer 2011.
- Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Heidelberg: Springer 2009.
- Fiadeiro, J. L.; Lopes, A.; Bocchi, L.: A formal approach to service-oriented architecture. In: Bravetti, M.; Nunez, M.; Zavattaro, G. (Hrsg.): Web Services and Formal Methods. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 193–213.
- Fischer, J. W.: Lifecycle Mapping – PLM verstehen und gestalten. Gezeigt an einem Praxisbeispiel des Anforderungsmanagements. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 3, S.138-141.
- Fischer, J. W.: Licht ins Dunkle – PLM verstehen heißt Lebenszykluseffekte (er)kennen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 1-2, S. 36-39.

- Fischer, J. W.; Stowasser, S.: Industrial Engineering und Lean Product Development. *Industrial Engineering* 66 (2013) 2, S. 20–27.
- Gorecki, P.; Pautsch, P.: *Praxishandbuch Lean Management*, 2. Aufl. München: Hanser 2014.
- Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen*, 5. Aufl. München: Hanser 2014.
- Iltzsche, L.; Schmidt, P.-M.; Völker, S.: Simulationsbasierte Optimierung der Einsteuerungsreihenfolge für die Automobil-Endmontage. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Heidelberg: Springer 2010, S. 117-132.
- Kostka, C.; Kostka, S.: *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess*, 6. Aufl. München: Hanser 2013.
- Object Management Group: *OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Superstructure, Version 2.5*. 6/2015. Verfügbar unter: www.omg.org/spec/UML.
- Object Management Group: *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0.2*. 12/2013. Verfügbar unter: www.omg.org/spec/BPMN.
- O'Docherty, M.: *Object-oriented analysis and design*. Chichester: Wiley 2005.
- VDI: *Richtlinie VDI 4499, Blatt 1. Digitale Fabrik – Grundlagen*. Berlin: Beuth 2008.
- Weske, M.: *Business Process Management*, 2. Aufl. Heidelberg: Springer 2012.
- Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: *Handbuch Fabrikplanung*, 2. Aufl. München: Hanser 2014.
- Williams, E. J.; Ülgen, O. M.: Pitfalls in managing a simulation project. In: Laroque, C.; Himmelspach, J.; Pasupathy, R.; Rose, O.; Uhrmacher, A. M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*. Berlin 2012, S. 3667-3674.
- Zülch, G.; Jonsson, U.; Fischer, J.: Hierarchical simulation of complex production systems by coupling of models. *International Journal of Production Economics* 77 (2002) 1, S. 39–51.