

2013

SIMchronization: Eine Modellierungsmethode zur Synchronisation von Material- und Informationsflüssen in der Instandhaltung

Christoph Prackwieser

Universität Wien, Forschungsgruppe Knowledge Engineering, Währinger Straße 29, 1090 Wien, Österreich,
prackw@dke.univie.ac.at

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi2013>

Recommended Citation

Prackwieser, Christoph, "SIMchronization: Eine Modellierungsmethode zur Synchronisation von Material- und Informationsflüssen in der Instandhaltung" (2013). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2013*. 82.
<http://aisel.aisnet.org/wi2013/82>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISeL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 2013 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISeL). For more information, please contact elibrary@aisnet.org.

SIMchronization: Eine Modellierungsmethode zur Synchronisation von Material- und Informationsflüssen in der Instandhaltung

Christoph Prackwieser

Universität Wien, Forschungsgruppe Knowledge Engineering,
Währinger Straße 29, 1090 Wien, Österreich
prackw@dke.univie.ac.at

Abstract. Effiziente und reaktionsschnelle Supply Chain Networks bedingen eine enge Verknüpfung und verzögerungsfreie Kopplung von Informations- und Materialflüssen. Besonders wichtig ist das synchrone Zusammenspiel in der Domäne Instandhaltung, die sog. Maintenance Supply Chains (MSC) müssen regelmäßige Wartungsaufgaben kostengünstig durchführen und bei unplanbaren Ereignissen, wie Maschinenausfällen, kurzfristig, flexibel und zielgerichtet reagieren. In einer MSC werden Informationen über Ausfälle oder Ersatzteilbestände zur Steuerung herangezogen und erzeugen als Aufträge wiederum Informationsflüsse, welche auf die Materialbewegung einwirken. Diese komplexen und hochdynamischen Wechselwirkungen sollen mit der hier vorgestellten Methode SIMchronization transparent gemacht werden.

SIMchronization ist ein Instrument zur Dokumentation, Analyse und Verbesserung von Maintenance Supply Chains. Die statische Struktur der Supply Chain wird graphisch modelliert und das aktive und reaktive Verhalten ihrer Objekte mittels Regeln beschrieben. Eine Simulation dynamisiert das Modell und generiert sogenannte Zustandsfolgemodelle. Diese machen die chronologischen Wirkungszusammenhänge von Steuerungsinformationen und resultierenden Materialbewegungen im logistischen Netzwerk transparent.

Keywords: Modellierungsmethode, Metamodell, Maintenance Supply Chain, Instandhaltung, Simulation

1 Einleitung

Instandhaltungsmanager sehen sich zwei zentralen Herausforderungen gegenüber. Auf der einen Seite sollen im normalen Betriebszustand einer Anlage alle instandhaltungsspezifischen Tätigkeiten, wie Inspektion oder Wartung so ressourcenschonend und kostengünstig wie möglich durchgeführt werden. Konsequenz daraus ist, dass Lagerbestände für Ersatzteile reduziert und Instandhaltungsdienstleistungen und damit verbundenes Know-how externalisiert werden [1]. Auf der anderen Seite muss aber, im Falle einer ungeplanten Betriebsunterbrechung, beispielsweise in Folge eines Anlagendefekts, die Instandhaltungs-Organisation schnell und flexibel reagieren und

die benötigten Mittel kurzfristig zur Verfügung stellen. Dabei werden die verursachten Ausfallkosten maßgeblich von der Dauer der Betriebsunterbrechung bestimmt [1], die wiederum von der zeitgerechten Bereitstellung benötigter Informationen, Ersatzteile, Spezialisten und Werkzeuge am Einsatzort der fehlerhaften Anlage abhängt [2]. Dieses zur Durchführung aller Instandhaltungstätigkeiten notwendige Netzwerk an Informations-, Materialflüssen und Prozessschritten, das vom Lieferanten von Ersatzteilen und Dienstleistungen bis zum Abnehmer, der instand zu haltenden Anlage, reicht, wird als *Maintenance Supply Chain (MSC)* [3] bezeichnet. Maßgebliche Faktoren für die Effizienz einer MSC sind die wirksame Koordination übergreifender logistischer Abläufe wie Material- und Informationsflüsse und die reibungsfreie Schnittstellengestaltung [4]. Viele Schritte im Materialfluss werden erst durch Steuerungsinformationen ausgelöst, die wiederum Resultat vorhergehender Materialbewegungen sind. Je größer ein Netzwerk und je mehr Teile im logistischen Prozess involviert sind, desto komplexer wird dieses Zusammenspiel. Um hierbei mögliche Deadlocks auszuschließen, Verzögerungen in der Instandsetzung zu verringern und somit verursachte Lageraufwände und Kosten zu reduzieren, gilt es, die Wechselwirkungen zwischen Steuerungsinformation und physischen Teilen transparent zu machen und somit Optimierungspotentiale aufzudecken.

Die vorgestellte Methode *SIMchronization* hat zum Ziel die Analyse und Optimierung von Maintenance Supply Chains und die operative Bewertung von Instandhaltungsmethoden zu unterstützen. Insbesondere beantwortet sie die zugrundeliegende Forschungsfrage nach einer Methode zur Ermittlung der minimalen Bevorratung von Ersatzteilen unter der Prämisse einer anforderungsgerechten Anlagenverfügbarkeit.

Zunächst wird im Kapitel 2 anhand eines Literaturüberblicks eine Forschungslücke identifiziert und der gewählte Ansatz motiviert. Anschließend werden Anforderungen an die Modellierungsmethode und darauf anzuwendende Mechanismen abgeleitet. In Kapitel 4 wird das Ergebnis der Konzeptualisierung der Anforderungen vorgestellt und in Kapitel 5 die Dynamisierung des Modells mittels Regeln und Simulation erläutert. Den Abschluss dieser Arbeit bilden die Vorstellung eines praxisnahen Beispiels das zur initialen Evaluierung des Ansatzes dient und eine Zusammenfassung mit Ausblick auf kommende Forschungsaufgaben.

2 Motivation und verwandte Arbeiten

Eine strukturierte Literaturrecherche zum Thema Instandhaltungsoptimierung und MSC ergab, dass in vielen Arbeiten Ansätze zur Entscheidungsunterstützung für spezifische Fragestellungen der Instandhaltung vorgestellt werden. Als Input für das Lagermanagement werden ein- oder mehrdimensionale Klassifikationssysteme zur Ermittlung der Kritikalität von Ersatzteilen präsentiert [5] und zur Auswahl der passenden Instandhaltungsmethode mittels mathematischer Modellierung analytische Optimierungsansätze zur Minimierung der Kosten oder Erhöhung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit entwickelt [6]. Allen diesen Modellen ist gemein, dass sie jeweils für die Lösung einer ganz spezifischen Problemsituation konzipiert sind und dem Anwender nur sehr wenige Freiheitsgrade bei der Anpassung an seine individuelle

Problemstellung lassen [6]. Wang [7] zeigt in seinem Aufsatz im Weiteren, dass die Optimierung der meisten Modelle nur nach genau einem Kriterium erfolgt; um reale Fragestellungen der Instandhaltung abzubilden, ist dies aber unzureichend. Dekker [8] schlussfolgert, bestätigt durch Van Horenbeek [6], dass die bestehenden mathematischen Modelle für den Instandhaltungspraktiker sehr schwer zu verstehen sind und die Anwendbarkeit durch ihre Starrheit leidet.

Andere Ansätze stellen mittels Petri-Netzen (bspw. [9]) oder Warteschlangenmodellen (bspw. [10]) den Abnutzungsprozess von Teilen dar oder verbessern die Integration der Instandhaltung in den Produktionsprozess mittels Simulation. Kontrollflussorientierte Modellierungssprachen wie Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) oder die Business Process Modeling Notation (BPMN) (bspw. [11]) werden verwendet, um den Geschäftsprozess der Instandhaltung zu optimieren. Diese Ansätze können aber keine Aussagen über die Bevorratungsmenge von Ersatzteilen treffen.

Zusammenfassend kann als Ergebnis des Literaturstudiums festgestellt werden, dass aktuell kein Ansatz existiert, mit dem die gesamte MSC End-to-End analysiert und optimiert werden kann. Die bestehenden Optimierungsmodelle, die jeweils nur Fragmente der MSC betrachten, sind wenig flexibel und schwer verständlich. Durch die Vielzahl von Einflussfaktoren, das dynamische Verhalten der MSC und die stochastische Charakteristik der Entwicklung des Anlagenzustands ist ein mathematisches Modell zur Optimierung nicht geeignet. Zur Umsetzung der Methode *SIMchronization* wird daher das Instrument der Simulation verwendet, um die mittels graphischer Modelle erstellten MSCs zu analysieren und zu bewerten.

3 Anforderungen an eine Modellierungsmethode für die Domäne Instandhaltung

In diesem Kapitel werden Anforderungen an die Modellierungsmethode definiert und daraus abgeleitet, ob eine bestehende Methode, gegeben falls mit Modifikationen, verwendet werden kann oder eine neue Methode entwickelt werden muss. Heym [12] bezeichnet die daraus folgenden Schritte als „Method Engineering“. Zu den wesentlichen Komponenten einer Methode zählen für ihn und Gutzwiller [13] Aktivitäten, Rollen, Techniken, Ergebnisse und das Metamodell. Für Holten [14] beispielsweise, besteht eine Modellierungstechnik aus einer Sprache und Handlungsanweisungen. Beide dargestellten Ansätze sehen Algorithmen, die auf die erstellten Modelle angewendet werden, nicht als zentralen Bestandteil einer Methode an. Für die Konzeption der Methode *SIMchronization* ist jedoch neben der Modellierungssprache und dem Vorgehensmodell, der zur Analyse verwendete Simulations- und Animationsalgorithmus von gleichrangiger Bedeutung. Ein Ansatz der alle drei Komponenten, also *Modellierungstechnik, Auswertungsmechanismen und Algorithmen* und das *Vorgehensmodell* umfasst und deren Operationalisierung auf Basis einer metamodellierungsfähigen Plattform berücksichtigt, wurde von Karagiannis und Kühn [15] vorgestellt und als Bezugsrahmen für die Ableitung der Anforderungen in dieser Arbeit gewählt.

3.1 Anforderungen zur Modellierungstechnik

Zur Beschreibung der Modellierungstechnik gehören die Festlegung der Modellierungssprache und deren Handhabung. Formale Vorgaben ermöglichen dem Benutzer die Erstellung semantisch und syntaktisch korrekter Modelle auf denen die Auswertungsalgorithmen angewendet werden können. Frank [16] stellt darüber hinaus anwender- und anwendungsbezogene Anforderungen an eine Modellierungssprache.

Anwenderbezogene Anforderungen. In der Domäne Instandhaltung und besonders bei der Betrachtung der unternehmensübergreifenden MSC sind verschiedene Anwendergruppen, wie interne Instandhaltungs-Manager, externe Dienstleister oder Produzenten von Anlagen involviert. Sie alle sollten die Methode anwenden und deren Ergebnisse nutzen können. Somit ist eine Anforderung die Verwendung einer klar verständlichen, im Idealfall schon bekannten Notation und Begrifflichkeit. Die Methode muss unterschiedliche Detaillierungsgrade unterstützen, sich zur Abstimmung unternehmensübergreifender logistischer Prozesse eignen und den Spezialisten die notwendige Transparenz und Instrumente zur Optimierung und Synchronisation der Material- und Informationsflüsse geben.

Anwendungsbezogene Anforderungen. Ihrer Struktur nach handelt es sich bei einer MSC um eine ‚normale‘ Supply Chain deren Bedarf aber nicht von einer Kundennachfrage determiniert wird [1], sondern von der geforderten Reaktion auf die Zustandsentwicklung einer bestimmten Entität, dem Instandhaltungsobjekt. Inhalt einer MSC kann somit die Feststellung des aktuellen Zustands des Instandhaltungsobjekts, dessen Wartung zur Beibehaltung des betriebsfähigen Zustands oder die Instandsetzung mittels Austausch durch ein neuwertiges Ersatzteil sein. Aus diesen Anwendungsfällen ergeben sich die zentralen Anforderungen an die Abbildung von Instandhaltungsobjekten und der zugrundeliegenden Supply Chain.

Instandhaltungsobjekte und Ersatzteile. Müssen als eigenständige Objekte im Modell abbildbar und auswertbar sein. Sie werden als temporäre Objekte bezeichnet, da während der Betrachtungsdauer einer Analyse neue Ersatzteile im Modell generiert werden können, Instandhaltungsobjekte durch Ersatzteile getauscht werden, beziehungsweise verbrauchte Teile aus dem Modell entfernt werden.

Zur Ableitung von Anforderungen an die Modellierungsmethode der Supply Chain wurden verschiedene Quellen analysiert. Um die anwenderbezogenen Anforderungen bezüglich Bekanntheit zu erfüllen, wurde als Ausgangsbasis das Metamodell des SCOR-Modells [17] herangezogen. Im Rahmen einer Delta-Analyse wurden die Konzepte des SCOR-Modells mit den Basisklassen bekannter Supply Chain Ontologien verglichen und unter Berücksichtigung instandhaltungsbezogener Erfolgsfaktoren [1] weitere MSC-relevante Anforderungen identifiziert. Folgende Ontologien wurden für diese Analyse berücksichtigt: Onto-SCM [18], SCOntology [19], TOVE Ontology [20], IDEON Ontology [21], Ontologie mobiler Betriebsmittel [22]. Es ergaben sich folgende relevante Anforderungen:

Supply Chain. Die Ressourcen und Ersatzteile müssen am Einsatzort der Anlage bereitgestellt werden. Die dafür notwendigen Prozessschritte der MSC sind u.a. Beschaffung, Lagerung, Transport, Inspektion, Instandsetzung.

Ressourcen. Zur Inspektion oder Instandhaltung werden u.a. Werkzeuge, Sensoren, Handbücher und Mitarbeiter mit speziellen Kenntnissen oder Fähigkeiten benötigt.

Supply Chain Steuerung. Die Steuerung erfolgt über den Austausch von Informationen. Um die Synchronisation zwischen Material- und Informationsfluss modellhaft abbildbar und somit auch optimierbar zu machen, muss der Informationsaustausch zwischen Elementen der Supply Chain darstellbar sein. Die Steuerung und Auslösung der MSC kann zentral, dezentral oder autonom durch das Instandhaltungsobjekt erfolgen.

Um zu entscheiden, ob eine existierende graphische Modellierungsmethode verwendet werden kann, wurden 17 Modellierungsmethoden daraufhin untersucht, ob sie die zentrale Forderung nach Abbildung einzelner temporärer Objekte, also in der MSC bewegte Teile und Informationen, unterstützen. Die untersuchten Methoden umfassten sowohl kontrollflussorientierte Geschäftsprozess-Modellierungssprachen als auch Notationen, die im Produktions- oder Supply Chain Umfeld Verwendung finden, wie beispielsweise das Wertstrom-Mapping [23] oder die Prozess-Orientierte Analyse [24].

Nur Warteschlangenmodelle und gefärbte Petri Netze erfüllen dieses Kriterium. Beide Methoden lassen sich analytisch auswerten und es existieren bereits viele Auswertungsalgorithmen. Allerdings erfolgt die Auftragssteuerung in Warteschlangenmodellen ausschließlich aufgrund stochastischer Einflüsse und ist somit zur Abbildung eines Steuerungsprogramms ungeeignet. Die Marken eines gefärbten Petri Netzes stellen den jeweiligen Systemzustand modellhaft gut dar. Größere Petri-Netze können aber leicht unübersichtlich werden, da durch die Beschränkung auf zwei Arten von Knoten, den Stellen und Transitionen, die Abbildung der selben fachlichen Inhalte mehr Objekte benötigt als zum Beispiel bei Modellierungssprachen mit vielen Objekttypen wie BPMN. Diese zunächst subjektive Aussage kann durch Auswertung einer Arbeit von Dijkman et al. [25] objektiviert werden. Sie beschreibt eine automatische Transformation von BPMN-Modellen in Petri Netze. Während zur Modellierung der 13 Petri Netz-Modelle 546 Objekte erforderlich sind, so werden in BPMN nur 216 Objekte, also ca. 40%, benötigt, um denselben fachlichen Inhalt abzubilden.

Da somit keine der untersuchten Methoden alle Anforderungen unterstützt, wurde für die Methode *SIMchronization* eine neue Modellierungsmethode entwickelt.

3.2 Anforderungen zu Auswertungsmechanismen und Algorithmen

Die Konzeption von Auswertungsmechanismen für die Methode *SIMchronization* steht noch am Anfang und wird maßgeblich beeinflusst von der anstehenden Evaluation und endgültigen Ausgestaltung der Modellierungstechnik. Grundlegende Anforderung ist eine transparente Darstellung der chronologischen Abläufe von Materialbewegungen und Informationsflüssen in Kombination mit einer Darstellung des Zustands des Gesamtsystems. Damit die operativen Umsetzungsalternativen quantitativ

vergleichbar werden, sind Ressourcenkosten und Zeitinformationen, wie Durchlaufzeiten und Bearbeitungszeiten, erforderlich.

3.3 Anforderungen zur Vorgehensweise

Das Vorgehensmodell enthält Anleitungen, wie durch Anwendung der Methode die gewünschten Effekte in der MSC erreicht werden können. Eine Simulation liefert per se noch keine optimalen Ergebnisse, sondern ermöglicht eine Bewertung eines parametrisierten Modells. Um dennoch zu verbesserten Ergebnissen zu kommen, muss die Simulation im Rahmen einer Meta-Heuristik angewendet werden. So verändern beispielsweise Genetische Algorithmen [6] einzelne Modellparameter und reagieren auf die Ergebnisveränderung einer Simulation. Da in einer MSC sehr viele mögliche Parameter, wie Lagerpolitiken, Instandhaltungsstrategien, Ressourcenplanung oder auch Bearbeitungsreihenfolgen verändert werden können sieht der aktuelle Stand des Vorgehensmodells vor, dass die zielgerichtete Veränderung des Modells durch den Anwender erfolgt. Der Experte wird durch die graphische Modellierung und Transparentmachung der Wirkungszusammenhänge im Zeitverlauf mittels Animation in die Lage versetzt, Schwachstellen des Modells und deren Ursachen zu erkennen und durch Veränderung entsprechender Parameter diese zu beheben.

4 Metamodell

Die Konzeptualisierung der Anforderungen führt zu dem, in Abbildung 1 dargestellten Metamodell zur Beschreibung der MSC. Die Bildung der einzelnen Modelltypen folgte der Überlegung, dass Ressourcen und Teile/Komponenten in vielen verschiedenen MSCs eines Unternehmens Verwendung finden können und durch die explizite Abbildung in eigenen Modellen deren Wiederverwendung erleichtert wird:

- Supply Chain Network Modell zur Abbildung der Material- und Informationsflüsse
- Ressourcen Modell, enthält alle Ressourcen, die in einem oder mehreren Supply Chain Network Modellen genutzt werden
- Komponenten Modell, enthält die beweglichen Objekte des Materialflusses (Teile) und deren Struktur. In der Domäne Instandhaltung sind dies die in einer Instandhaltung Anlage verbauten Bauteile und die Ersatzteile, die zur Instandsetzung benötigt werden.

Für die Klassennamen des Supply Chain Network Modells wurden die Begriffe „Make“, „Plan“, „Source“ und „Deliver“ des SCOR-Modells [17] übernommen.

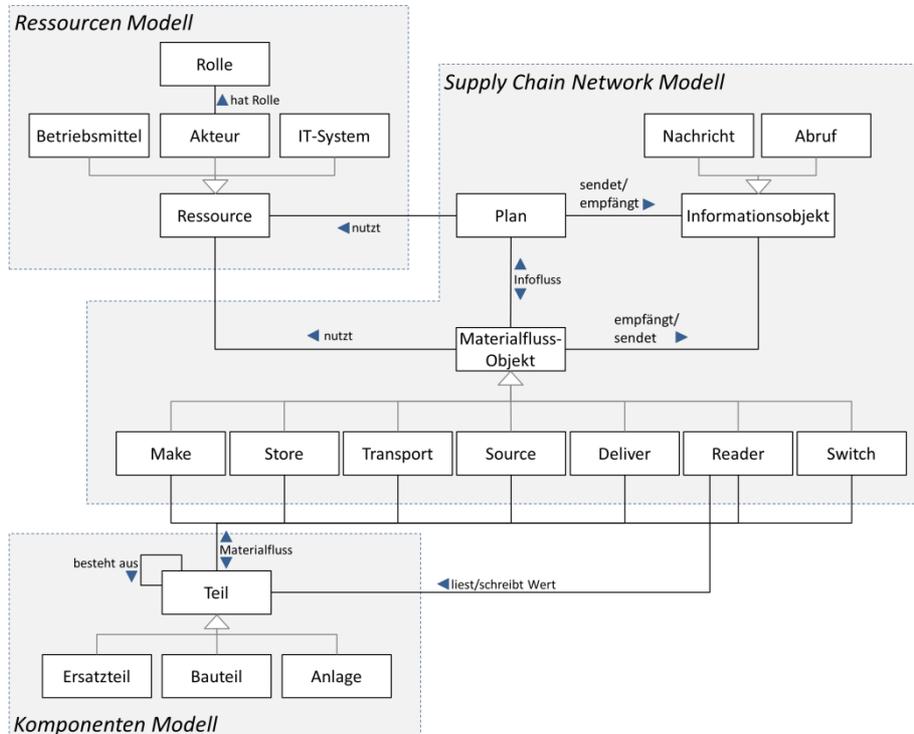


Abb. 1. Ausschnitt aus dem Metamodell der SIMchronization-Methode

Im Folgenden werden die wichtigsten Modellierungsklassen des Supply Chain Network Modells erläutert. Auf Attribute wird nur insofern eingegangen, als dass sie direkt in Zusammenhang mit der Dynamisierung des Modells stehen.

4.1 Modellierungsklasse „Make“

Objekte der Klasse „Make“ beschreiben die Tätigkeiten im Materialfluss, die mit der Gewinnung, Be- und Verarbeitung von stofflichen Gütern befasst sind [26]. Darunter fallen bspw. Produktionsschritte, Inspektionen, Verlade- oder Entladevorgänge und Instandsetzungstätigkeiten.

Attribut Produktionsprogramm. Ein Make-Prozessschritt benötigt als Input eine Kombination verschiedener Teiletypen in jeweils definierter Menge. Nach einer Bearbeitungszeit, liefert der Produktionsschritt als Output eine bestimmte Anzahl von Teilen pro Teiletyp. Diese Festlegung der benötigten Input-Kombination, der gelieferten Output-Kombination und der Bearbeitungszeit wird durch die Angabe eines *Produktionsprogramms* vorgegeben.

Attribut Auftragshöhe. Die Anzahl der in einer Periode zu startenden Aufträge wird als Integer-Zahl ≥ 0 angegeben. Aufträge können über einen Informationsfluss-Kanal per Nachricht erteilt werden, oder sich als Ergebnis einer in diesem Attribut auszuwertenden Regel (siehe Kapitel 5.1) ergeben.

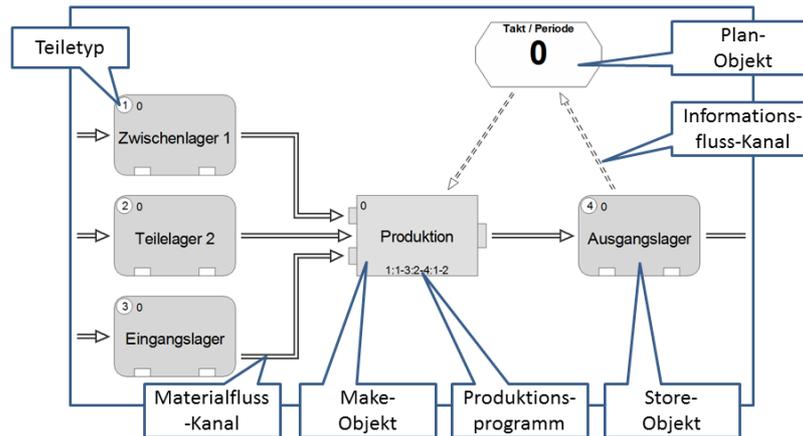


Abb. 2. Verwendung von Modellierungsklassen in einem Beispielmodell

4.2 Modellierungsklasse „Store“

Ein Objekt der Klasse „Store“ bildet einen Liegeplatz ab. Das Lagern und Puffern von Teilen dient der Zeitüberbrückung. Vorgängerobjekte im Materialfluss lagern Teile ein und nachfolgende Objekte rufen benötigte Teile aus einem Store ab.

Attribut Teiletyp. In einem Store können eine beliebige Anzahl von Teile genau eines Teiletyps gelagert werden. Die Typisierung eines Stores definiert somit eindeutig den Teiletyp der Teile, die über die ein- und ausgehenden Materialfluss-Kanäle des Stores bewegt werden können.

Attribut Wertminderung. Während der Lagerung können die Teile einer Wertminderung unterliegen. Diese Wertminderung kann in diesem Attribut als Regel hinterlegt werden. In der Domäne Instandhaltung wird dieses Attribut verwendet, um die Abnutzungs- oder Zustandsfunktion eines Teils abzubilden.

Attribut Lagerstand. Aktuelle Anzahl von Teilen des definierten Teiletyps die abrufbar im Lager liegen. Die Simulation (siehe Kapitel 5.2) aktualisiert dieses Attribut nach jedem Lagerab- oder zugang.

In der Domäne Instandhaltung wird der Liegeplatz neben dem klassischen Einsatz als Puffer auch zur Abbildung der instand zu haltenden Anlage verwendet. Für jede Komponente einer Anlage wird ein Store-Objekt modelliert. Das darin „gelagerte“ Teil ist somit das Instandhaltungsgut, das an seinem Einsatzort einer Abnutzung unterliegt.

4.3 Modellierungsklasse „Plan“

Zentrale Steuerungsaufgaben können mit Objekten der Klasse „Plan“ abgebildet werden. Plan ist Teil des Informationsflusses. Die Methode Wertstromdesign [27] verwendet ein ähnliches Konstrukt zur Abbildung von Steuerungsaufgaben, worunter Rother [27] den Geschäftsprozess Produktionsplanung und -steuerung (PPS) versteht.

Attribut Aktives Steuerungsprogramm. Kann ein Set von Regeln enthalten, die während der Simulation zu Beginn jeder Periode ausgewertet werden.

Attribut Reaktives Steuerungsprogramm. Kann ein Set von Regeln enthalten, die immer beim Eingang einer Nachricht ausgewertet werden.

4.4 Weitere Modellierungsklassen

Der Modelltyp *Supply Chain Network Modell* enthält zusätzlich folgende Klassen.

Relationsklasse „Informationsfluss-Kanal“. Zwischen den beiden verbundenen Objekten besteht ein Kanal zur Weitergabe von Informationen.

Relationsklasse „Materialfluss-Kanal“. Zwischen den beiden verbundenen Objekten besteht ein Kanal zur Bewegung von Teilen.

Klasse „Reader“. Liest Daten aus einem beweglichen Teil aus, bzw. beschreibt den Datenspeicher des Teils.

Klasse „Switch“. Verzweigungen im Materialfluss-Kanal. Die Steuerung, welchen Weg ein Teil nimmt kann dezentral oder zentral erfolgen.

Klasse „Source“. Bildet den Beschaffungsprozess ab. Generiert Teile und speist sie in das Materialflusssystem ein.

Klasse „Deliver“. Bildet den Absatzprozess ab. Konsumiert Teile und entnimmt sie dem Materialflusssystem.

Klasse „Transport“. Wie Klasse „Store“, nur mit einer festgelegten minimalen Liegezeit, der Transportzeit.

5 Dynamisierung des Modells

Voraussetzung für die Dynamisierung des Modells ist die Festlegung einer Periodendauer bzw. Taktzeit. Die Periodendauer wird maßgeblich von der Granularität der Modellierung der Supply Chain bestimmt und ist mindestens so lange wie die kürzeste Bearbeitungszeit aller Make-Prozesse des Modells. Perioden können bspw. für Minuten, Tage oder Schichtdauern stehen.

5.1 Regeln

Durch Instanziierung der Klassen des vorgestellten Metamodells wird ein statisches Strukturmodell der Supply Chain erstellt. Mittels zusätzlicher Beschreibung von Objekteigenschaften durch Regeln kann das aktive bzw. reaktive Verhalten von Objekten

im Zeitverlauf definiert werden. Die Regeln, gemäß dem OMG-Standard [28] sogenannte *production rules*, werden in dafür vorgesehene Attribute der Modellierungsobjekte eingetragen und beeinflussen damit während der Simulation das Verhalten dieser Objekte, beispielsweise indem sie:

- in Make-Objekten die Auftragshöhe ermitteln
- in Plan-Objekten durch Reaktion auf abgerufene Objektzustände und Versand von resultierenden Aufträgen mittels Nachrichten die Supply Chain steuern
- in Reader-Objekten Daten aus Teilen auslesen und weitersenden bzw. Daten darauf speichern (zur Abbildung von AutoID-Technologien, wie RFID).

Beispiele für Regeln.

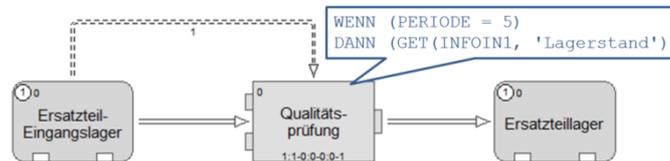


Abb. 3. Regel im Make-Objekt

Durchläuft die Simulation die 5. Periode, so feuert die Regel (siehe Abbildung 3) im Make-Objekt und liest den Lagerstand des Objekts am anderen Ende der Relation „INFOIN1“ ein. Dieser Wert wird der Simulation als Auftragshöhe zurückgegeben.

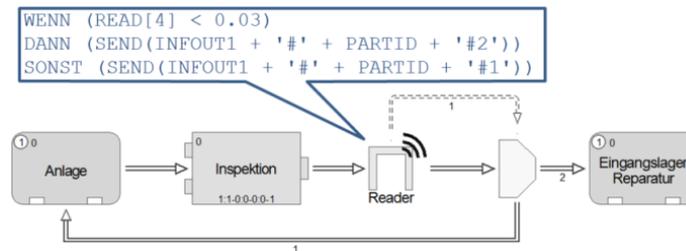


Abb. 4. Regel im Reader-Objekt

Diese Regel (siehe Abbildung 4) wird für jedes Teil ausgewertet, das am Reader vorbei geführt wird. Ist der Abnutzungsvorrat [1] eines Teils (hier ausgelesen aus Speicherplatz 4) kleiner als 0.03, so muss dieses Teil zur Reparatur. Der Reader sendet über ausgehenden Informationsfluss-Kanal „INFOOUT1“ eine Nachricht an den Switch, dass das Teil mit der PARTID den Materialfluss-Kanal mit Nummer 2 nehmen muss.

5.2 Simulation

Ein diskreter Simulationsalgorithmus durchläuft für eine vorzugebende Anzahl von Perioden wiederholt das Modell und bewegt Teile und Nachrichten durch die Supply Chain. Dafür werden in jeder Periode die Regeln in Kombination mit der Struktur gemäß einem Prioritätenschema ausgewertet.

Die Simulation liest für alle Objekte deren Vorbedingungen erfüllt sind, die verhaltensbeschreibenden Regeln aus und wertet diese mittels eines Regelauswertungsmechanismus (Rules Engine) unter Parametrisierung mit Input-, aktuellen Modell- und Simulationsdaten kontextspezifisch aus. Aus den zurückgegebenen Ergebnissen werden Nachrichten generiert und diese über Informationskanäle an Empfängerobjekte gesendet, Lagerbestände per Abruf ermittelt oder Produktionsaufträge für Make-Objekte generiert, die in weiterer Folge zu Teilebewegungen im Materialfluss führen.

5.3 Animation und Zustandsfolgemodelle

Die Animation visualisiert die Teile, Nachrichten und Abrufe, die durch die Informations- und Materialfluss-Kanäle bewegt werden. Dabei kann entweder der Weg eines Teils über mehrere Perioden hinweg durch die MSC betrachtet werden oder der Zustand der gesamten MSC während einer Periode dargestellt werden. Diese Darstellung einer Periode bezeichnen wir als *Zustandsfolgemodell*.

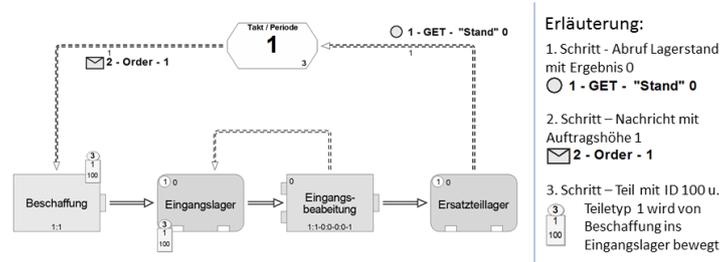


Abb. 5. Einfaches Beispiel eines generierten Zustandsfolgemodells für die Periode 1

Um die für die Analyse der Synchronisation erforderliche Reihenfolge der Vorgänge darzustellen, werden alle Teile, Nachrichten und Abrufe mit einer Nummerierung versehen. Teile, die in dieser Periode gelagert sind, sich also nicht bewegen, werden ebenfalls visualisiert. Man erkennt somit beispielsweise, welche Aktionen durch eine Nachricht auslöst werden und kann die resultierende Abfolge analysieren. Vergleicht man die Zustandsfolgemodelle mehrere aufeinanderfolgenden Perioden miteinander, kann man die Entwicklung von Lagermengen beobachten und somit Wartezeiten identifizieren.

5.4 Toolimplementierung und Evaluation mit Anwendungsbeispiel

Die Umsetzung von *SIMchronization* auf der Metamodellierungs-Plattform *ADOxx*[®] leitete die Evaluation der Modellierungstechnik und der Auswertungsalgorithmen ein (*ADOxx*[®] ist eine registrierte Marke der BOC Information Technologies Consulting AG). Es wurden sämtliche beschriebene Klassen und deren Attribute erstellt und der Simulations- und Animationsalgorithmus auf Skriptbasis prototypisch implementiert.

Anwendungsbeispiel. Im in Abbildung 6 dargestellten praxisnahen Beispiel soll die Anlagenausfallszeit durch eine effiziente Inspektionsplanung verringert werden und gleichzeitig die notwendige Ersatzteil-Lagermenge reduziert werden. Dafür wurde eine MSC erstellt, die das Instandhaltungsobjekt und dessen Zustandsverlaufs-Funktion (dargestellt im Diagramm rechts unten), die Inspektion, Instandsetzung und eine 2-stufige Beschaffungs-Supply Chain vom Ersatzteil-Lieferanten bis ins hausinterne Lager enthält. Die Steuerung der Ersatzteilbeschaffung erfolgt durch ein zentrales System, der Transport vom Lieferanten ins Haus dauert 5 Perioden, ein Instandsetzungsvorgang 2 Perioden. Das Modell ist über Regeln so parametrisiert, dass alle 5 Perioden eine Inspektion des Zustands des Instandhaltungsobjekts erfolgt. Liegt der Zustand unter einer definierten Grenze wird das Teil angesteuert und in Folge die Anlage mit einem Ersatzteil aus dem hausinternen Lager instandgesetzt. Die zentrale Steuerung bestellt für jedes verbaute Ersatzteil beim Lieferanten ein neues und ruft zusätzlich, jede 6. Periode den Lagerstand des internen Ersatzteil-Lagers ab. Ist dieser kleiner als 2 wird 1 Ersatzteil beschafft.

Der Simulationsalgorithmus wurde für 100 Perioden angewendet und liefert folgende Ergebnisse. Das Balkendiagramm „Anlagenverfügbarkeit“ stellt die Betriebsfähigkeit der Anlage durch Abbildung der Werte „0“ und „1“ dar. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die oben angeführte Parametrisierung des Modells während jedem Instandsetzungsvorgang zu einem 3 Perioden langen Anlagenausfall führt. Dieser ist durch die Dauer des Instandsetzungsvorgangs und eine verzögerte Beauftragung bedingt. Das Balkendiagramm „Lagermenge hausinterne Ersatzteile“ zeigt den Verlauf des hausinternen Ersatzteil-Lagerstands, der nach einer Einschwingphase 3 Stück beträgt und nach einer Instandsetzung kurz auf 2 Stück abfällt.

Eine Analyse des Modells zeigt, dass der nicht benötigte Lagerstand hauptsächlich durch ein Synchronisationsproblem von Abfragezeitpunkten des internen Lagerstands und der durch den Transport verursachten Zeitverzögerung zwischen Bestellung und Lagereingang entsteht. Passt man die Abfragefrequenz an die Lieferzeit an so ergibt eine erneute Simulation, dass sich bei gleichbleibender Anlagenverfügbarkeit die durchschnittliche Ersatzteil-Lagermenge dieses Typs um 1 Stück reduziert.

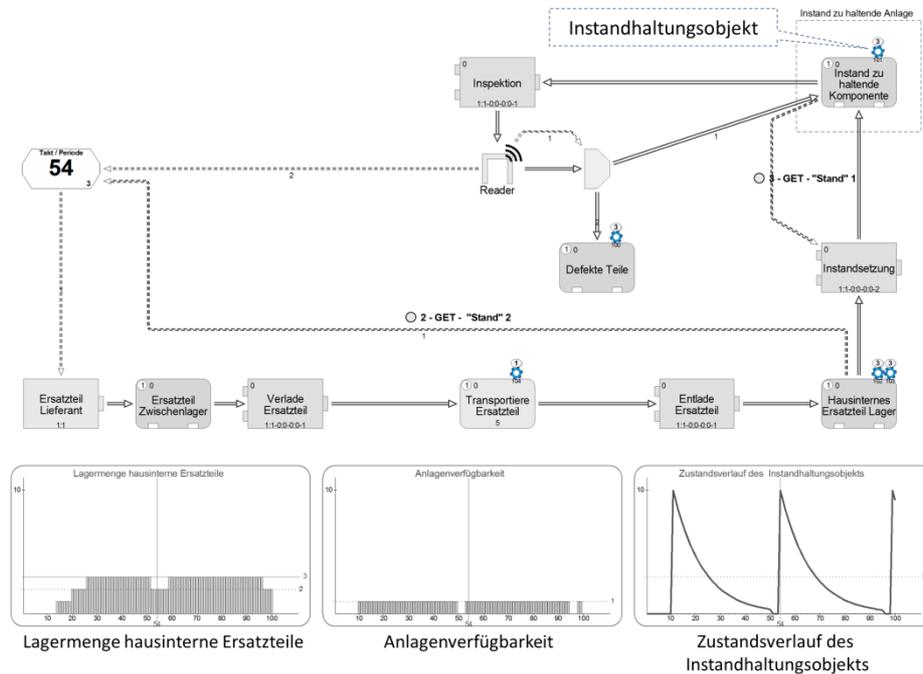


Abb. 6. Anwendungsbeispiel der Methode *SIMchronization*

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode *SIMchronization* stellt ein Instrument zur Dokumentation, Analyse und Verbesserung von Maintenance Supply Chains dar. Die im Zuge der Methodenanwendung für jede Periode automatisch generierten Zustandsfolgemodelle geben Aufschluss über die chronologischen Wirkungszusammenhänge von Steuerungsinformationen und resultierenden Materialbewegungen im logistischen Netzwerk.

Die Anforderungen an die Modellierungstechnik wurden aus der wissenschaftlichen Literatur der Domänen Instandhaltungsmanagement und Supply Chain Management abgeleitet. Eine erste modellhafte Abbildung praxisnahe Fallbeispiele ist gelungen, muss aber noch mit Domänenexperten diskutiert werden, um gegebenenfalls weitere, bisher noch nicht berücksichtigte Anforderungen mit aufzunehmen.

Die technische Umsetzbarkeit der Methode auf einer Metamodellierungs-Plattform wurde anhand eines Prototyps gezeigt. Die in der Forschungsfrage formulierte Zielsetzung nach Unterstützung bei der Minimierung der Ersatzteil Bevorratung und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit wurde mittels eines praxisnahen Anwendungseispiels dargestellt. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Evaluation der Methode bezüglich ihrer Anwendbarkeit, Flexibilität und Akzeptanz in der Praxis. Des Weiteren muss mittels einer empirischen Untersuchung ein Vergleich dieser Methode mit

bestehenden, beispielsweise mathematisch-analytischen Methoden, angestellt werden um die Sinnhaftigkeit ihrer Anwendung zu belegen.

Zentral für die Anwendbarkeit und die Ergebnisqualität der Methode ist das noch detailliert zu beschreibende Vorgehensmodell. Es enthält neben den Handlungsanweisungen und Richtlinien zur Erfassung der benötigten Daten und Erstellung der Modelle auch Anleitungen zur zielgerichteten Anwendung der Simulation im Rahmen einer Meta-Heuristik und Interpretation der resultierenden Ergebnisse. Da ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Praktikabilität und den Einsatz der Methode die zur Verfügung stehenden Auswertungsmechanismen sein werden, wird in deren Konzeption und Implementierung weiterer Forschungsbedarf gesehen.

Literatur

1. Alcalde Rasch, A.: Erfolgspotential Instandhaltung: theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements. Erich Schmidt, Berlin (2000)
2. Pérès, F., Noyes, D.: Envisioning e-logistics developments: Making spare parts in situ and on demand: State of the art and guidelines for future developments. *Computers in Industry* 57, 490-503 (2006)
3. Fabry, C., Schmitz-Urban, A.: Maintenance Supply Chain Optimisation within an IT-Platform: Network Service Science and Management. In: 2010 International Conference on Management and Service Science (MASS), pp. 1-4 (2010)
4. Fettke, P.: Supply Chain Management: Stand der empirischen Forschung. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 77, 417-461 (2007)
5. Kennedy, W.J., Wayne Patterson, J., Fredendall, L.D.: An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics* 76, 201-215 (2002)
6. Van Horenbeek, A., Pintelon, L., Muchiri, P.: Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management* 1, 189-200 (2010)
7. Wang, H.: A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research* 139, 469-489 (2002)
8. Dekker, R.: Applications of maintenance optimization models: a review and analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 51 (3), 229-240 (1996)
9. Volovoi, V.: Modeling of system reliability Petri nets with aging tokens. *Reliability Engineering & System Safety* 84 (2), 149-161 (2004)
10. Park, C.-W., Lee, H.-S.: A multi-class closed queueing maintenance network model with a parts inventory system. *Computers & Operations Research* 38, 1584-1595 (2011)
11. Campos, M.A.L., Márquez, A.C.: Modelling a maintenance management framework based on PAS 55 standard. *Quality and Reliability Engineering International* 27, 805-820 (2011)
12. Heym, M.: *Methoden-Engineering: Spezifikation und Integration von Entwicklungsmethoden für Informationssysteme*. Universität St. Gallen, Hallstadt (1993)
13. Gutzwiller, T.A.: *Das CC-RIM Referenzmodell für den Entwurf von betrieblichen, transaktionsorientierten Informationssystemen*. Physica, Heidelberg (1994)
14. Holten, R.: *Konstruktion domänenspezifischer Modellierungstechniken für die Modellierung von Fachkonzepten*. Inst. für Wirtschaftsinformatik, Münster (2001)
15. Karagiannis, D., Kühn, H.: Metamodelling platforms. In: Bauknecht, K., Tjoa, A.M., Quirchmayr, G. (eds.): *E-Commerce and Web Technologies*. LNCS, Vol. 2455, pp. 182-182 (2002)

16. Frank, U., Bodo, v.L.: Anforderungen an Sprachen zur Modellierung von Geschäftsprozessen (2003)
17. Supply Chain Council Inc.: Supply Chain Operations Reference (SCOR®) model. Overview - Version 10.0. (2010)
18. Ye, Y., Yang, D., Jiang, Z., Tong, L.: Ontology-based semantic models for supply chain management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37, 1250-1260 (2008)
19. Vegetti, M., Gonnet, S., Henning, G., Leone, H.: Towards a supply chain ontology of information logistics within process industry environments. In: 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Rio de Janeiro (2005)
20. Fox, M.S., Barbuceanu, M., Gruninger, M.: An organisation ontology for enterprise modeling: Preliminary concepts for linking structure and behaviour. *Comput. Ind.* 29, 123-134 (1996)
21. Madni, A.M., Lin, W., Madni, C.C.: IDEONTM: An extensible ontology for designing, integrating, and managing collaborative distributed enterprises. *Systems Engineering* 4, 35-48 (2001)
22. Jendoubi, L.: Management mobiler Betriebsmittel unter Einsatz ubiquitärer Computersysteme in der Produktion. Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart, Stuttgart (2007)
23. Erlach, K.: Wertstromdesign: der Weg zur schlanken Fabrik. Springer, Berlin Heidelberg (2010)
24. Meyer, U.B., Creux, S.E.M., Weber Marin Silva, A.K.: Grafische Methoden der Prozessanalyse : für Design und Optimierung von Produktionssystemen. Hanser, München [u.a.] (2005)
25. Dijkman, R.M., Dumas, M., Ouyang, C.: Semantics and analysis of business process models in BPMN. *Information and Software Technology* 50, 1281-1294 (2008)
26. VDI: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen. VDI-Richtlinie 2411 (1970)
27. Rother, M., Shook, J.: Sehen lernen: mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen. Lean Management Inst., Aachen (2004)
28. Production Rule Representation (PRR). Version 1.0, Vol. formal/2009-12-01 (2009)