

Referenzmodell zur wertstrombasierten Simulation von Unstetigförderern in der Grobplanungsphase von Produktionssystemen

Reference Model for the Value-stream-based Simulation of Discontinuous Conveyors in the Rough Planning Phase of Production Systems

Markus Rabe, TU Dortmund, Dortmund (Germany), markus.rabe@tu-dortmund.de
Walter Wincheringer, Tobias Sohny, Hochschule Koblenz, Koblenz (Germany),
wincheringer@hs-koblenz.de, sohny@hs-koblenz.de

Abstract: The application of simulation in the bidding phase offers the advantage that suppliers of production systems can secure their throughput performance and improve their competitiveness. The disadvantage of simulation, a time- and resource-intensive modelling effort, can be reduced by using reference models. Based on the well-known value stream method (VSM), this paper presents a suitable modelling concept for a simulation reference model. It analyses how discontinuous conveyors of a material flow system can be modelled with sufficient accuracy applying value stream simulation for the bidding phase. The result is presented in a data box by means of parameters based on the VSM. Dynamic aspects are taken into account.

1 Einleitung

Mit Abgabe eines Angebotes für ein kundenindividuelles Produktionssystem (PS) mit einem komplexen Materialfluss garantieren Anbieter eine definierte Durchsatzleistung (Friedland und Kühlung 2000). Für den Fall, dass ein realisiertes PS nicht den zugesicherten Durchsatz erbringt, drohen finanzielle Risiken, beispielsweise durch die erforderliche Nachbesserung des Systems. Eine Überdimensionierung des Systems, mit der Konsequenz von Mehrkosten, geht zu Lasten der Wettbewerbsfähigkeit. Daher bedarf es einer Absicherung der garantierten Durchsatzleistung des Systems zum Zeitpunkt der Grobplanung in der Angebotserstellung.

Hierzu sind die Produktionsprozesse mit den dazugehörigen Materialflüssen auf potentielle Auslegungsfehler zu überprüfen. Für eine übersichtliche Darstellung der Prozesse und deren Evaluierung eignet sich die Wertstrommethode (WSM) (Erlach 2020). Dynamisch auftretende Ereignisse lassen sich jedoch nicht ausreichend mit dieser Methode berücksichtigen (Urnauer und Metternich 2019). Für eine Abbildung dieser Ereignisse ist die ereignisdiskrete Simulation erforderlich. Diese erlaubt,

ablauffähige Modelle über die Zeit zu betrachten (Gutenschwager et al. 2017). Eine in Produktion und Logistik übliche ereignisdiskrete Simulation, insbesondere die Erstellung des dafür erforderlichen Modells, ist für die Angebotsphase allerdings zu zeit- und kostenintensiv (Friedland und Kühling 2000). Dies hat zur Folge, dass eine Simulation erst nach einer erfolgreichen Auftragsakquisition durchgeführt wird. Potentielle Planungsfehler werden erst zu diesem Zeitpunkt erkannt und führen zu aufwändigen Anpassungen. Daher bedarf es bereits in der Angebotsphase der Simulation bei geringem Modellierungsaufwand für eine hinreichend hohe Planungssicherheit der Durchsatzbetrachtung.

Dieser Beitrag ergänzt die Entwicklung eines Referenzmodells basierend auf Wertstromsimulation (Rabe et al. 2020a/b), welches sich durch eine aufwandsarme Modellerstellung von kundenindividuellen Produktionssystemen für die Angebotsphase eignet. In den Vorentwicklungen wurde mit Fokus auf der Abbildung der technischen Komponenten eines Materialflusssystemes der Reihen- und Fließfertigung bereits Produktionsprozesse, das Produkt, Zusammenführungen und Verzweigungen (Rabe et al. 2020a) sowie Stetigförderer formalisiert (Rabe et al. 2020b). Dieser Beitrag behandelt die Entwicklung eines Modellelements für die Modellierung von Unstetigförderern.

2 Wertstromsimulation und Referenzmodelle

Dem Vorteil der Simulation, experimentierbare Modelle zu erhalten, steht der Hauptnachteil einer zeitaufwändigen Modellerstellung gegenüber. Dieser kann mittels eines Referenzmodells (RM) auf ein akzeptables Niveau reduziert werden (Friedland und Kühling 2000).

Im Bereich der Simulation fungieren Referenzmodelle als Konstruktionsschemata für die Gestaltung aufgabenbezogener Simulationsmodelle (Klinger und Wenzel 2000). Das RM fokussiert sich auf die Semantik und verallgemeinert die Syntax (Schütte 1998). Es befindet sich dabei auf der gleichen semantischen Stufe wie das Modell, welches mit ihm modelliert wird. Die Beschreibung erfolgt unabhängig vom Simulationssystem (Klinger und Wenzel 2000). Ein Modulelement-Baukasten eines Simulationssystems ist folglich kein Referenzmodell, sondern die simulatorspezifische Implementierung eines Referenzmodells (Schütte 1998).

Die Kombination der statischen WSM mit der DES ist daher naheliegend und wurde mehrfach beschrieben (Rabe et al. 2020a). So weisen jüngste Analysen erneut darauf hin, dass der Nachteil der WSM als statische Momentaufnahme durch die Erweiterung um die DES ausgeglichen werden kann und zudem eine Abbildung komplexerer Materialflüsse ermöglicht (Urnaier und Metternich 2019). Den existierenden Ansätzen ist gemein, dass die Wertstrommodelle in Simulationssysteme übertragen oder um diese ergänzt wurden. Hierbei lag der Fokus auf der Wertstrommethode. Die Abbildung eines Materialflusssystemes (MFS) wird dabei zu oberflächlich vorgenommen. So sagen Meudt et al. (2017), dass die Berücksichtigung unterschiedlicher Förderprozesse mit einer Wertstromsimulation weiterer Forschung bedarf. Für die Sicherung der Planungsqualität in der Angebotsphase mit Wertstromsimulation ist eine höhere Granularität der Eingangsdaten erforderlich (Rabe et al. 2020a).

3 Struktur des Referenzmodells

Die dargestellten Vorteile der WSM, der DES und der RMe sollen miteinander kombiniert werden. Dies beinhaltet die Transparenz der WSM, die Dynamik der DES sowie ein reduzierter Modellierungsaufwand durch ein RM (Rabe et al. 2020a). Für ein modulares Konzept sind die für ein Materialflusssystem relevanten Systemelemente (Produktionsprozesse, Förderer, Produkt, Materialflusssteuerung, Bewertung) als Modellelemente abzubilden. Diese sind so zu formalisieren, dass sie miteinander verknüpft werden können (Abb. 1). Für eine hohe Transparenz erfolgt die Darstellung der Modellelemente des RMs angelehnt an die WSM in Form von Datenkästen mit geeigneten Kenngrößen unter Berücksichtigung des Verhaltens über die Zeit. Gemäß der Einordnung der RMe erfolgt der Aufbau des Konstruktionsschemas simulatorunabhängig und bietet nach Implementierung eine höhere Granularität von Materialflüssen als es gängige Software-Tools zur Wertstromsimulation ermöglichen. Angelehnt an die WSM wurden deren Grundelemente *Produktionsprozesse* und *Materialfluss* (Stetigförderer) analysiert und unter dem Aspekt der Dynamik für das RM formalisiert (Rabe et al. 2020a/b). So erfolgt beispielsweise die Abbildung der Zykluszeit (ZZ) als kapazitives Angebot eines Produktionsprozesses (Erlach 2020) als auch der Prozesszeit (PZ) zur Abbildung von Charginprozessen (Erlach 2020) produkt- und prozessspezifisch (Abb. 1).

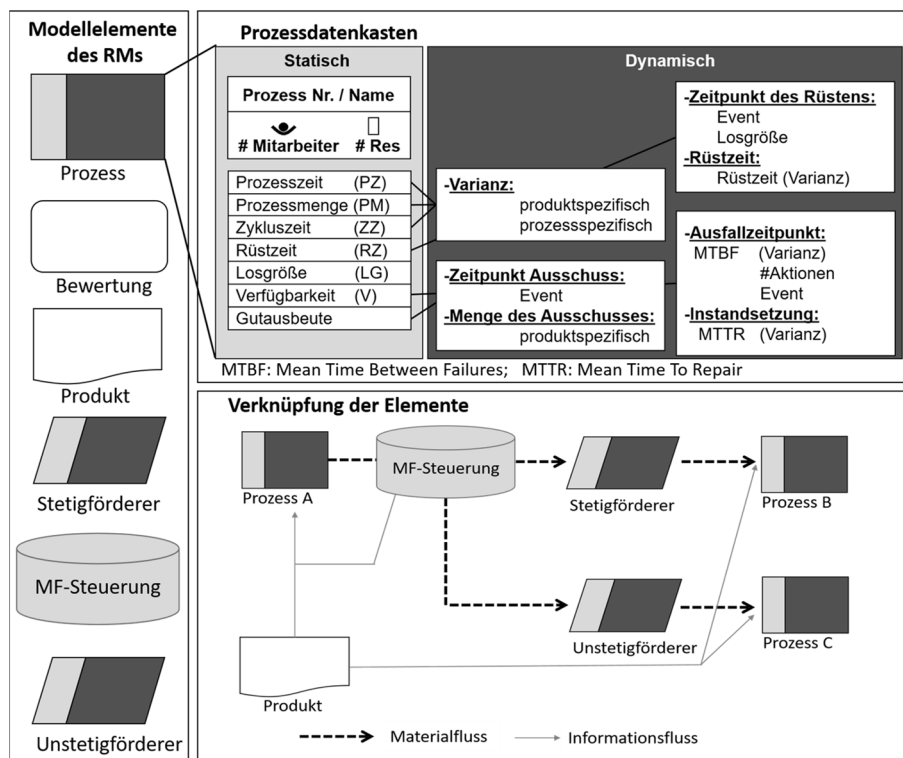


Abbildung 1: Übersicht des Referenzmodells (Rabe et al. 2020a, S.374)

3.1 Informationen zu Unstetigförderern in der Angebotsphase

Die Repräsentation des Materialflusses (Förderer) erfolgt bei der WSM einzig durch Pfeilsymbole und Materialbestände in Form von Dreiecken zwischen Produktionsprozessen (Erlach 2020). Förderer erzeugen einen kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Materialfluss (MF), was eine Unterscheidung in Stetigförderer (z. B. Förderband) und Unstetigförderer (z. B. Fahrerloses Transportsystem, FTS) bedingt (ten Hompel et al. 2018). Angelehnt an die WSM bedarf es der Entwicklung von Kenngrößen unter Berücksichtigung von dynamischen Aspekten, welche die Unstetigförderer hinreichend genau beschreiben. Ferner soll die Darstellung in einem Datenkasten erfolgen, welcher sich zur Abbildung aller Unstetigförderer eignet. Für die Abbildung von Unstetigförderern bedarf es zuerst der Bestimmung, welche Daten und Informationen zum Zeitpunkt einer Angebotsphase vorhanden sind. Hieraus lassen sich Erkenntnisse zur Bestimmung der Kenngrößen ableiten, welche bei der Abgrenzung, was im RM betrachtet wird und was nicht, unterstützen. Ausgang bildet hierbei die Materialflussplanung (MFP). Der MF und das Layout sind miteinander verknüpft (Kesselring 2017). Das Layout ermöglicht die graphische Ausgestaltung der räumlichen Anordnung von Funktions- und Struktureinheiten sowie von Verbindungselementen (Schenk et al. 2014) und hat dabei Einfluss auf die Flexibilität eines MFS (Rabe 2003). Die MFP untergliedert sich in die Phasen der *Ideal-, Real- und Detailplanung*, wobei die Ideal- und Realplanung zusammengehörig als Grobplanung bezeichnet werden (Arnold und Furmans 2019). Die Inhalte einer Angebotsphase sind hierbei mit denen der Grobplanung gleichzusetzen (Ebert et al. 2015).

- Die *Idealplanung* liefert die technisch und organisatorisch optimale Lösung eines MF-Konzeptes, wobei bestehende Restriktionen, beispielsweise wie Fluchtwege (Schenk et al. 2014), keine Beachtung finden (Arnold und Furmans 2019). In Form eines Blocklayouts erfolgt aus Materialflusssicht die räumlich optimale Anordnung (geringster Förderaufwand) der Funktionselemente (Grundig 2018).
- In der *Realplanung* erfolgt die Ausarbeitung der optimalen MF-Variante. Bestehende Restriktionen werden dabei berücksichtigt. Ferner erfolgt u. a. die Bestimmung des geeigneten Fördermittels (FTS, Hängebahn) sowie die Wahl und Anordnung der Betriebsmittel (Arnold und Furmans 2019). Betreffend der Förderanlagen liegt das Hauptaugenmerk auf der Durchsatzbetrachtung, der Bestimmung der Anzahl der Fördermittel in Abhängigkeit des Streckenlayouts sowie einer grob definierten Streckenführungsstrategie als Navigation zur Bestimmung der Position des Fördermittels und der Strecke zur Zielposition (Trenkle 2018, Kesselring 2017). Das Groblayout visualisiert dabei eine realisierbare räumliche Anordnung der Funktionseinheiten unter Berücksichtigung von funktionalen, materialflussseitigen und flächenabhängigen Einflussfaktoren (Grundig 2018).

Abbildung 2 stellt die einzelnen Inhalte der Materialfluss-, Layout- und Fördertechnikplanung in Bezug zu der Ideal- und Realplanung einer Angebotsphase dar.

4 Formalisierung der Unstetigförderer

Entscheidend für das RM in der Angebotsphase ist die Wahl des Detailierungsgrads. Da diese Festlegung ein erhebliches Erfahrungswissen voraussetzt (Gutenschwager et al. 2017), wurde die VDI-Richtlinie 4465 (VDI 2016) herangezogen, welche mittels Leitfragen unterstützt. Relevant sind hierbei insbesondere die Fragestellungen, ob (i) die Modellierungsgenauigkeit sinnvoll mit der verfügbaren Informationsbasis

Inhalte in der Angebotsphase	Materialfluss- und Layoutplanung		Fördertechnikplanung
	Idealplanung	Blocklayout inkl. Materialflussmatrizen	-
Realplanung	Groblayout unter Berücksichtigung: <ul style="list-style-type: none"> • verbleibender Restriktionen • Wahl des geeigneten Fördermittels 		<ul style="list-style-type: none"> • Streckenlayouts • Streckenführungsstrategien (grob spezifiziert)

Abbildung 2: Übersicht der Planungsinhalte einer Angebotsphase

gewählt wurde in Verbindung mit der Frage, ob (ii) das Weglassen von Aspekten das Modell noch glaubwürdig erscheinen lässt (VDI 2016).

Bezugnehmend zu (i) wäre die Nichtbetrachtung von Aspekten, welche nach der Grobplanung erfolgen, methodisch richtig, da das RM für die Angebotsphase konzipiert wird. Ausgehend von der dargestellten Analyse der Informationsbasis zum Zeitpunkt einer Angebotsphase ist diese allerdings zu grob, sodass gemäß (ii) der entstehende Auslegungsfehler zu groß wird und der Vorteil der Simulation, das auszulegende System mittels ablauffähiger Modelle hinreichend genau abzubilden, nicht mehr gegeben wäre. Entsprechend bedarf es der ganzheitlichen Betrachtung der Aspekte der Unstetigförderer und einer Analyse, ob und wie der betreffende Aspekt zu berücksichtigen ist. Im Unterschied zu bestehenden Ansätzen wie dem von Kesselring (2017), der ein virtuelles Konfigurationsmodell zur Planung und Konfiguration von Förderanlagen mittels mehrerer Modellelemente und Streckenabschnitte für alle Planungsphasen vorstellt, soll in diesem Beitrag die Abbildung der Unstetigförderer simplifiziert mit einem Datenkasten angelehnt an die WSM für die Angebotsphase erfolgen. Für eine hinreichend genaue Abbildung der Unstetigförderer sind die in Abbildung 3 dargestellten Aspekte zu analysieren.

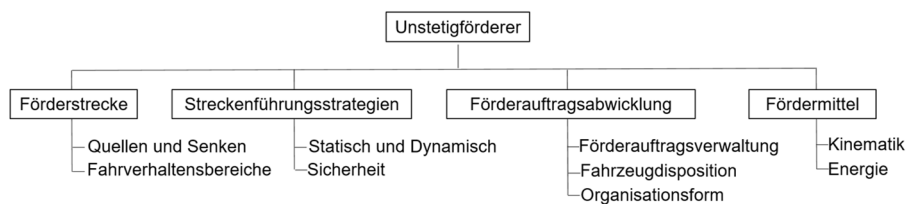


Abbildung 3: Analyse der Unstetigförderer (in Anlehnung an Kesselring 2017, S.96)

4.1 Förderstrecke

Dem Layout entsprechend bewegen sich Fördermittel auf einer Förderstrecke von Lastaufnahme- (Quellen Q) zu Lastabgabestationen (Senken S) als Start- und Endpunkte eines Materialflusses (ten Hompel et al. 2018). Diese können mit dem vorgestellten Datenkasten für Produktionsprozesse (Abb. 1) abgebildet werden (Rabe et al. 2020a/b). Betreffend der Förderstrecke sind Angaben zum Fahrverhalten zu spezifizieren. Hierzu zählen Geschwindigkeit und Beschleunigung, wodurch auch Abstandsregelungen der Fördermittel zueinander erforderlich werden (Kesselring 2017). Darüber hinaus existieren Überhol- und Ausweichbereiche sowie Sperrbereiche. Die Sperrbereiche sind Förderstreckenabschnitte, in welchem Fördermittel mit entgegengesetzten Fahrtrichtungen physisch nicht aneinander vorbeifahren können. Einzeln sind diese Bereiche in beide Richtungen passierbar (Kesselring 2017).

Abstandsregelungen, Ausweichregeln sowie Entscheidungen, wann welches Fördermittel Vorfahrt hat, erfolgen beim Detaillayout und werden in Folge dessen in der Angebotsphase nicht betrachtet.

Die Einsatzformen der Förderstrecke untergliedern sich in den Fließlinien- und Taxibetrieb (Kesselring 2017). Durch ihre geringe Anzahl an Verzweigungen und Zusammenführungen bildet der Fließlinienbetrieb ein Layout mit geringerer Komplexität (Kesselring 2017). Hierbei kommen meistens spurgebundene Unstetigförderer zum Einsatz. Dem gegenüber ist der Taxibetrieb mit einer größeren Anzahl an Verzweigungen und damit verbundenem komplexeren Layout charakterisiert. Hierbei kommen meistens nicht spurgebundene Fördermittel zum Einsatz (Kesselring 2017).

Bzgl. der spurgebundenen Fördermittel ergeben sich Streckenführungen. Neben Geraden und Kurven existieren Zusammenführungen und Verzweigungen, welche einen Materialfluss in verschiedene Richtungen ermöglichen (Arnold und Furmans 2019). Sowohl die Zusammenführungen als auch die Verzweigungen können mit dem vorgestellten Prozessdatenkasten (Abb. 1) (Rabe et al. 2020a) abgebildet werden, beispielsweise der Zeitbedarf für eine Weichenumschaltung als Zykluszeit (ZZ).

4.2 Streckenführungsstrategien

Mit Betrachtung der Streckenführung bedarf es einer Streckenführungsstrategie, die sich in statische und dynamische Strategien aufteilt (Kesselring 2017). Bei einer statischen Streckenführung bedarf es einer Routingtabelle an jeder Verzweigungsstelle zur Bestimmung des entsprechenden Förderwegs (Kesselring 2017). Hierbei kann das Routing in Abhängigkeit des Förderguts oder der Zielposition erfolgen. Die Berücksichtigung des Routings zum Zeitpunkt der Angebotsphase ist entsprechend vom Groblayout abhängig. Für eine effiziente Anwendung des RMs, angelehnt an die Darstellungsform der WSM in einem Datenkasten, ist das Ziel, eine vom Layout abstrahierte Betrachtung mittels Kenngrößen zu entwickeln. Detaillierte und aufwendige Ansätze wie in Rabe (2003), welcher das Layout mittels Graphen und Knotenpunkten als geometrische Koordinaten abbildet, werden daher nicht betrachtet. Für die Umsetzung sollen die Fördergüter (Produkte) Attribute in Form von *Quellen (Lastaufnahme-)* und *Senken (Lastabgabepositionen)* als Produktionsablaufschemata besitzen. Das Ablaufschema ermöglicht einen produktspezifischen Materialfluss und übernimmt das *Routing* (Ulrich und Albrecht 2019). Die Abfrage erfolgt bei der Aufnahme des Förderguts durch das Fördermittel.

Mit Kenntnis der Quellen- und Senkenposition lassen sich in Abhängigkeit des Layouts die Distanzen (kürzeste Förderstrecke) bestimmen. Diese Beziehungen sind in einer *Kürzesten-Wege-Matrix* zu hinterlegen, sodass in Abhängigkeit der produktspezifischen mittleren *Fördergeschwindigkeit v* die benötigte *Förderzeit* im System ermittelt wird. Hierdurch ist die Abbildung eines Fließlinienbetriebs möglich. Ferner sind Schaltzeiten bei Verzweigungen und Zusammenführungen additiv zu berücksichtigen (Abb. 4).

Die dynamische Streckenführung ist dadurch definiert, dass die Förderstrecke während des Betriebs bestimmt wird (Kesselring 2017). Hierbei erfolgt die Berechnung der Förderstrecke mittels einer hinterlegten Strategie, beispielsweise für die schnellste oder kürzeste Strecke. Eine Ausarbeitung einer dynamischen Streckenführung ist herstellerspezifisch (Trenkle 2018). Zudem benötigen Unstetigförderer ohne Spurbindung einen hohen Planungsaufwand, welcher der Detailplanung zuzuordnen ist. Folg-

lich findet die Betrachtung einer dynamischen Streckenführung keine Berücksichtigung für ein RM in der Angebotsphase. Mit der Kürzesten-Wege-Matrix kann deren Abbildung allerdings abstrahiert werden. Unter Berücksichtigung der kürzesten Quellen- und Senkenbeziehungen, ausgehend von einem Groblayout, ist mit einer imaginären Spurbindung eine hinreichend genaue Abbildung der Förderstrecke möglich. Hierdurch kann auch der Taxibetrieb abgebildet werden.

von \ nach	Position 1	Position 2	Position 3	...
Position 1		20 m	X	...
Position 2	20 m		72 m	...
Position 3	45 m	72 m		...
...

X: Keine Verbindung

Abbildung 4: Darstellung der Kürzesten-Wege-Matrix

Des Weiteren werden Detailanalysen der Sicherheitsaspekte, wie das Ausweichen oder ein Stillstand, um eine Kollision zu vermeiden, sowie sicheres Bremsen, sodass das Fördergut nicht vom Fördermittel fällt, ausgeklammert (Kesselring 2017). Diese sollen mittels herstellerepezifischer Erfahrungen bei der Förderzeit berücksichtigt werden (Ullrich und Albrecht 2019). Im Fokus steht eine Durchsatzbetrachtung bei einer frühen Planungsphase in Abhängigkeit der Anzahl von Unstetigförderern. Ein einzelnes Fördermittel ist bei einer solch frühen Planungsphase nicht ausschlaggebend. Entscheidend ist eine hinreichend genaue Abbildung der Förderdistanzen, sodass Durchsatzbetrachtungen in Abhängigkeit der Förderzeiten möglich sind.

4.3 Förderauftragsabwicklung

Für die Zielfestlegung bei einer Auftragsabwicklung bedarf es der Verarbeitung von Förderaufträgen und der spezifischen Zuweisung zu einem freien Fördermittel. Dies lässt sich wie folgt untergliedern (Ullrich und Albrecht 2019):

1. Auftrag generieren: Die Förderaufträge werden nach Fertigstellung eines Prozesses an einer Quelle (Lastaufnahme-position) generiert.
2. Förderauftragsverwaltung: Die generierten Aufträge werden in der Förderauftragsverwaltung nach dem FIFO-Prinzip angeordnet (Ullrich und Albrecht 2019). Eine ideale Reihenfolgebildung der Aufträge, ausgehend von einem übergeordneten PPS-System (Ullrich und Albrecht 2019), liegt nicht im Fokus des RMs und wird nicht weiter betrachtet. Das erfordert eine Differenzierung in die Förderauftragsverwaltung und Fahrzeugdisposition.
3. Fahrzeugdisposition: Die Fahrzeugdisposition bestimmt das freie Fördermittel für die Ausführung des Auftrags (Ullrich und Albrecht 2019). Für diese Ermittlung kommen unterschiedliche herstellerepezifische Strategien zum Einsatz, beispielsweise zur Vermeidung von Staus (Ullrich und Albrecht 2019). Durch die *Kürzeste-Wege-Matrix* ist die aktuelle Position der Fördermittel an Quellen und Senken bekannt. Um eine hinreichend genaue Abbildung zu erzielen, soll der Auftrag dem freien Fördermittel zugewiesen werden, welches zur Lastaufnahme-position die kürzeste Distanz aufweist. Hierbei erfolgt keine Änderung der Reihenfolge der Aufträge; diese werden nach Auftritt ihrer Generierung verarbeitet (FIFO-Prinzip). Für den Fall, dass keine Förderaufträge vorliegen, verharret das

Fördermittel an seiner letzten Position, was bei einer Wiederaufnahme eine Leerfahrt zur Quelle bedingt. Die Auftragsvergabe und damit verbundene Anschlussfahrt (Last- oder Leerfahrt), soll hierbei ausschließlich an der Quelle oder Senke erfolgen und nicht auf dem Pfad (während der Förderzeit) sobald das Fördermittel leer ist. Ferner wird eine Priorisierung hinterlegt (Attribute), sodass die Versorgung der Prozesse mit Material eine größere Gewichtung hat als die Entsorgung von Leergut.

Als Organisationsform erfolgt die Betrachtung einer direkten Verbindung (1:1) von Q zu S. Milkruns (1:m bzw. n:1) und Routenzüge (n:m) werden nicht abgebildet.

4.4 Fördermittel

Zuletzt bedarf es der Abbildung des Fördermittels. Hierbei ist die produktspezifische *Kapazität* als Fassungsvermögen der Fördermittel zu beachten. Ferner sind die *technische Verfügbarkeit* (MTBF) in Abhängigkeit von Aktionen oder einem Event und die Reparaturzeit (MTTR) zu berücksichtigen. Für den Fall, dass der Be- und Entladevorgang durch das Fördermittel aktiv erfolgen kann, sind die produktspezifischen Prozesszeiten (PZ) $PZ_{Beladen}$ und $PZ_{Entladen}$ des Fördermittels zusätzlich zur Förderzeit zu berücksichtigen. Neben einer reinen Lastaufnahme und -abgabe können Unstetigförderer zudem in einen Produktionsprozess integriert sein (ten Hompel et al. 2018), beispielsweise in eine Roboterschweißzelle. Entsprechend ist die PZ zu berücksichtigen, für welche das Fördermittel in den Produktionsprozess eingebunden ist und nicht für weitere Fahraufträge zur Verfügung steht. Ferner können bei Montagetätigkeiten mehrere Unstetigförderer benötigt werden, um die erforderliche Prozessmenge (PM) zu erhalten. Entsprechend ist eine produktspezifische *Logik* zu etablieren, an welchen Prozessen und in welcher Anzahl die Unstetigförderer als Teil des Prozesses zur Verfügung stehen müssen. Eine Aufladung des Energiespeichers des Unstetigförderers kann u. a. induktiv oder an Lade- bzw. Akkutauschstationen erfolgen (Ullrich und Albrecht 2019). Eine induktive Ladung, die bei einem einfachen Layout während der Fahrt erfolgt, bedarf keiner weiteren Betrachtung (vgl. Ullrich und Albrecht 2019). Bei Ladestationen und Akkutauschstationen bedarf es einer gezielten Steuerung, welcher Unstetigförderer welche Station bei welchem Energielevel ansteuern darf (Trenkle 2018). Da diese Steuerung vom Hersteller abhängt und erst in der Detailplanung erfolgt, wird dies für das RM in der Angebotsphase nicht betrachtet. Aus Materialflusssicht ist allerdings die Verfügbarkeit des Fördermittels, als Relation der Betriebszeit zur Ladezeit, von entscheidender Bedeutung und wird folglich als *Betriebsstunden pro Ladezeit* berücksichtigt. Betreffend einer Durchsatzbetrachtung haben die layoutbedingten Förderstrecken sowie die Anzahl an Fördermitteln einen Haupteinfluss. Physikalische Aspekte wie die Kinematik (Rangierparameter), Abmessungen sowie die Beschleunigung und Verzögerung in Relation zur Förderzeit sind vernachlässigbar klein und werden erst bei der finalen Auswahl des Fördermittels in der Detailplanung relevant (VDI 2016).

Aus der Analyse ergibt sich konkret der Datenkasten für Unstetigförderer mitsamt der *Kenngrößen*, der alle abzubildenden Eigenschaften ganzheitlich bündelt (Abb. 5). Dieser bildet das Modellelement Unstetigförderer für das Referenzmodell basierend auf der WSM. Die definierten *Eingabeparameter* sowie die *produktspezifische Routingtabelle* werden in der Simulation verarbeitet. In Abhängigkeit des produktspezifischen Materialflusses (*Routingtabelle*) erfolgt die Bestimmung der Förderstrecke mittels der hinterlegten *Matrix*. In Kombination mit der produktspezifischen

mittleren *Fördergeschwindigkeit* v wird die *Förderzeit* im System berechnet. Die *Prozesslogik* erlaubt die Abbildung möglicher Montagetätigkeiten.

Die *Förderauftragsabwicklung* weist dem freien Fördermittel mit der kürzesten Distanz zur Quelle den Auftrag zu (*Fahrzeugdisposition*). Dies erlaubt eine Abbildung von mehreren Unstetigförderern ($\#$ *Ressourcen*) eines Typs mit einem Datenkasten. Durch das Modellelement in Form eines Datenkastens soll neben der Abbildung der Unstetigförderer mit einer Simulation der Durchsatz in Abhängigkeit der Anzahl an Unstetigförderern durch den Anwender bestimmt werden (Was-wären-wenn-Szenarien). Die Evaluierung erfolgt in einer weiteren Entwicklung.

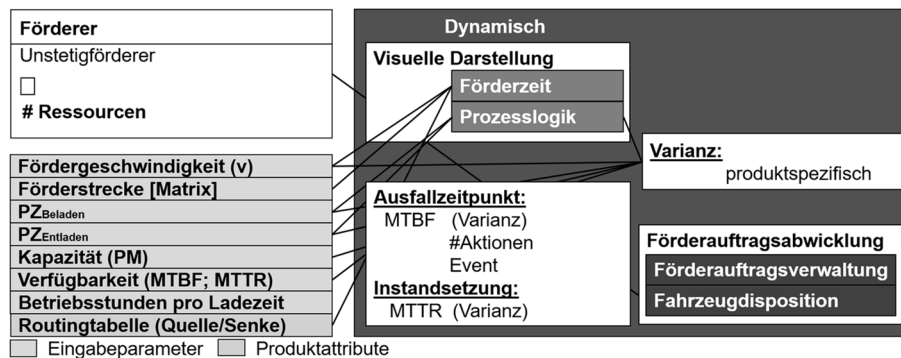


Abbildung 5: Datenkasten für Unstetigförderer

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für Anbieter von kundenindividuellen Produktionssystemen mit einem komplexen Materialfluss bietet die Anwendung der Simulation zum Zeitpunkt der Angebotsphase den Vorteil einer exakten Angebotserstellung. Ein frühzeitiges Erkennen von Auslegungsfehlern steigert zudem die Wettbewerbsfähigkeit. Hierzu muss der Modellierungsaufwand möglichst gering ausfallen. Eine Kombination der WSM und Simulation verspricht eine transparente Darstellung aller erforderlichen Produktionsprozesse in Verbindung mit den entsprechenden Material- und Informationsflüssen unter Beachtung der Dynamik. Der bestehende Nachteil einer ressourcen- und zeitintensiven Modellerstellung von Simulationsmodellen wird mit einem Referenzmodell (RM), basierend auf einer Wertstromsimulation, reduziert. In diesem Beitrag wurden Kenngrößen unter Beachtung von dynamischen Aspekten definiert, welche Unstetigförderer hinreichend genau beschreiben und mit dem RM, basierend auf Wertstromsimulation, effizient in einer Angebotsphase abgebildet werden können.

In einer weiteren Entwicklung des RMs basierend auf einer Wertstromsimulation bedarf es der Untersuchung der Materialflusslogik. Hierzu sollen Standard-Logiken erarbeitet werden, welche eine Materialflusssteuerung hinreichend genau abbilden. Ferner sind Kenngrößen zu erarbeiten welche eine Bewertung eines Materialflusssystems ermöglichen. Die Gesamtkonzeption wird nach der Ausarbeitung in einem Prototyp simulatorspezifisch implementiert und im industriellen Umfeld hinsichtlich des Modellierungsaufwands und der Ergebnisdarstellung evaluiert.

Literatur

- Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 7. Auflage. Berlin: Springer 2019.
- Ebert, R.-E.; Schachmanow, J.; Wrobel, G.: Intelligente Planung von Produktionssystemen. ZWF (2015) 110 (3), S. 103-106.
- Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. 4. Auflage. Berlin: Springer 2020.
- Friedland, R.; Kühling, M.: Referenzmodelle für Fertigungssysteme. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Erlangen: SCS 2000, S. 133-150.
- Gutenschwager, K., Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik – Grundlagen und Anwendung. Berlin: Springer 2017.
- Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. 6. Auflage. München: Hanser 2018.
- Kesselring, J.: Prozessbegleitende Planung und Konfiguration von Fördertechnikanlagen unter Zuhilfenahme von virtuellen Konfigurationsmustern und Konfigurationsmodellen. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation 2017.
- Klinger, A.; Wenzel, S.: Referenzmodelle – Begriffsbestimmung und Klassifizierung. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Erlangen: SCS 2000, S. 13-29.
- Meudt, T.; Kaiser, J.; Metternich, J.; Spieckermann, S.: Wertstrommodellierung und -simulation im Zeichen von Digitalisierung und Industrie 4.0. ZWF (2017) 112 (12), S.865-868.
- Rabe, M.: Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialflusssimulation. Technische Universität Berlin, Dissertation 2003.
- Rabe, M.; Wincheringer, W.; Sohny, T. (2020a) Reference model based on value stream simulation for the evaluation of production systems in the bidding phase. In: 13th International Conference of Research in Logistics and Supply Chain Management (RIRL), Le Havre: 7.-9. Oktober 2020.
- Rabe, M.; Wincheringer, W.; Sohny, T. (2020b) Referenzmodell basierend auf Wertstromsimulation zur Bewertung von Produktionssystemen in der Angebotsphase. In: Proceedings 25. Symposium Simulationstechnik, Online Conference, 14-15 Oktober 2020, S. 373-380.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Berlin: Springer 2014.
- Schütte, R.: Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung. Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle. Wiesbaden: Springer 1998.
- ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. Berlin: Springer 2018.
- Trenkle, A.: Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation BAND 93 2018.
- Ullrich, G.; Albrecht, T.: Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel – mit Praxisanwendung zur Technik – für die Planung. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer 2019.
- Urnauer, C.; Metternich, J.: Die digitale Wertstrommethode. ZWF (2019) 114 (12), S. 855-858.
- VDI: Richtlinie 4465 Modellierung und Simulation, Blatt 1 – Modellbildungsprozess. Berlin: Beuth 2016.