

Ein Ontologie-basierter Modellierungs- und Simulationsansatz am Beispiel der ressourceneffizienten Planung spanender Prozessketten

An Ontology-Based Modelling and Simulation Approach Using the Example of Resource Efficient Planning of Metal-Cutting Process Chains

Artur Schmidt, Thorsten Pawletta, Hochschule Wismar, Wismar (Germany),
artur.schmidt@hs-wismar.de, thorsten.pawletta@hs-wismar.de

Abstract: A new modelling and simulation method is discussed which allows a quantitative energy and resource efficient related evaluation of manufacturing process chains. In general, this method is based on: (i) an ontological metamodel approach, (ii) a model base and (iii) automatic model generation capabilities. The method is illustrated by using a comprehensive manufacturing example. A special focus is set on the ontological metamodel approach for specifying different competing process structures. In conclusion, some results of the manufacturing example are discussed and an outlook of potential future research is given.

1 Problemstellung

Steigende Rohstoff- und Energiepreise stellen produzierende Unternehmen vor neue Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund werden zunehmend Methoden der Modellbildung und Simulation eingesetzt, um den Ressourcenverbrauch von fertigungstechnischen Prozessketten quantitativ zu untersuchen. Meistens steht die Untersuchung von logistischen, produktionssteuerungstechnischen und gebäudetechnischen Aspekten im Vordergrund (Junge 2007).

Gemäß der Forderung von Neugebauer (2008) die Ressourceneffizienz der Fertigungsverfahren in Prozessketten insgesamt zu analysieren, wurden von Weinert (2010) und Larek (2012) erste Modellbibliotheken für spezielle Fertigungsverfahren entwickelt. Diese basieren auf einem zeitdynamischen ereignisorientierten Modellierungsansatz und ermöglichen somit nicht nur die Berechnung von Ressourcenverbräuchen, sondern auch die zeitliche Bewertung von Verbrauchsspitzen. Die vordefinierten Modelle können parametrisiert und zu Prozessketten komponiert werden.

Bei realen Problemstellungen kann die manuelle Komposition und Parametrierung von Prozesskettenstrukturen aufgrund der Variantenvielfalt sehr aufwendig werden. Larek et al. (2013) sehen einen Lösungsansatz in der Metamodellierung in Kombination mit automatischen Modellgenerierungskonzepten und simulationsbasierten Optimierungstechniken. Unter einem Metamodell wird in diesem Zusammenhang eine formale Spezifikation von einer Menge alternativer Modellstrukturen und Modellparametrierungen verstanden.

Die Prinzipien der fertigungstechnischen Prozesskettenmodellierung/-simulation werden am Beispiel der von Larek (2012) entwickelten und durch Schmidt (2012) weiterentwickelten Modellbibliothek (*MB*) dargestellt. Bestehende Probleme werden identifiziert und Lösungen diskutiert. Anschließend erfolgt eine Konzentration auf das Problem der Varianten- und Parametervielalt. Basierend auf der System Entity Structure (*SES*) Ontologie von Zeigler und Hammonds (2007) wird ein Metamodellierungskonzept zur Spezifikation alternativer Prozesskettenstrukturen eingeführt. Im Vergleich zu den Arbeiten von Larek et al. (2013) werden neue *SES* Konstrukte zur Vereinfachung der Modellierung der Parametervielalt vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine Einführung in die automatische Generierung von Prozesskettenmodellen in MATLAB/SimEvents, welche auf dem *SES/MB* Framework von Zeigler et al. (2000) basiert. Hierfür wird die von Schwatinski et al. (2012) entwickelte *Tiny SES Toolbox* verwendet. Abschließend werden exemplarische Simulationsergebnisse demonstriert.

2 Klassische Prozesskettenmodellierung/-simulation: Vorgehen, Probleme und Lösungsansätze

Die klassische Vorgehensweise der Modellbildung und Simulation unter Verwendung moderner Simulationsumgebungen besteht aus drei wesentlichen Schritten: (i) *Komponentenmodellierung*, (ii) *Modellgenerierung* und (iii) *Modellausführung*. Im Rahmen der Komponentenmodellierung werden dynamische Modelle einzelner Systemkomponenten erstellt und in einer *MB* organisiert. Bei der Modellgenerierung erfolgt eine Komposition und Parametrierung der Modellkomponenten der *MB* zu einem modular-hierarchischen Modell. Die anschließende Modellausführung geschieht manuell oder teilautomatisiert. Die Darstellung der genannten Schritte erfolgt anhand der von Larek (2012) vorgestellten und in Schmidt (2012) weiterentwickelten Modellbibliothek. Dazu werden exemplarisch drei alternative Prozessketten und deren Ressourcenverbräuche zum Herstellen von rotations-symmetrischen Werkstücken betrachtet (Abb. 1). Die Prozessketten bestehen aus folgenden Fertigungsverfahren:

1. Außenlängsdrehen (ALD), Vakuumhärten (VH), Anlassen (A), Außenrundscheifen (ARS)
2. Außenlängsdrehen, Induktionshärten (IH), Anlassen, Außenrundscheifen
3. Außenlängsdrehen, Außenrundscheifhärten (ARSH)

Jedes Fertigungsverfahren ist als ein ereignisdiskretes Modell, Basismodell genannt, in MATLAB/SimEvents modelliert und in einer *MB* organisiert. Die Basismodelle können in drei Grundtypen klassifiziert werden: (i) *CNC-Satzbasierte Modelle*, (ii) *Messdatenbasierte Modelle* und (iii) *Hilfsmodelle*. Bei den CNC-Satzbasierten Modellen ALD, ARS und ARSH werden die Betriebszustände, Zustandsübergänge

und die Ressourcenverbräuche direkt auf Basis der CNC-Programme berechnet. Die Basismodelle VH, IH und A zählen zur Klasse der messdatenbasierten Modelle. Ihr dynamisches Verhalten und der Ressourcenverbrauch werden unmittelbar aus Messdaten der realen Fertigungseinrichtungen identifiziert. Zu den Hilfsmodellen gehören eine Quelle (Q) und eine Senke (SK). Q und SK dienen der Generierung und Terminierung von Werkstücken, welche als Entitäten abgebildet werden. Die werkstückspezifischen Eigenschaften wie Werkstofftyp und Werkstückgeometrie, werden als Attribute der Entitäten modelliert.

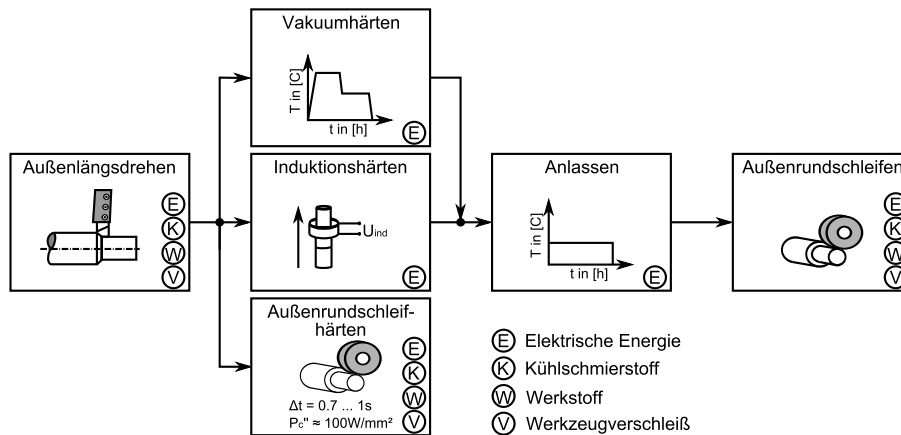


Abbildung 1: Prozesskettenstrukturen mit den zu betrachtenden Ressourcenarten je Fertigungsverfahren nach Larek (2012).

Die Basismodelle können in MATLAB/SimEvents manuell zu Prozessketten komponiert, parametrisiert und ausgeführt werden (Abb. 2). Als ausgewähltes Simulationsergebnis zeigt Abbildung 2 weiterhin die zeitliche Leistungsaufnahme der zugehörigen Prozesskette zur Herstellung von 12 Werkstücken.

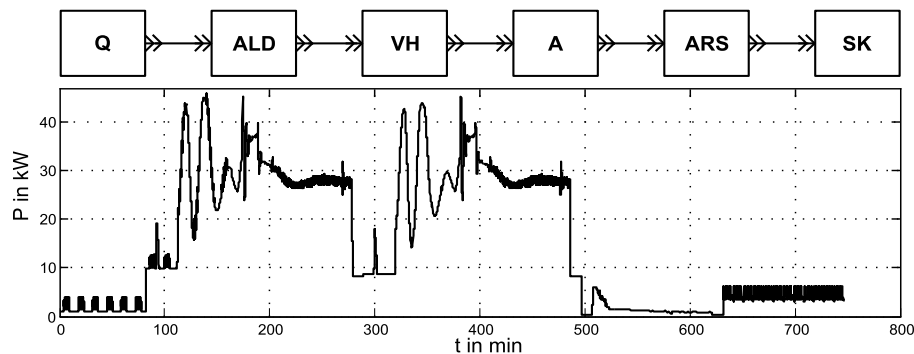


Abbildung 2: Ereignisdiskretes Simulationsmodell der ersten Prozesskette in MATLAB/SimEvents und berechnete zeitabhängige Leistungsaufnahme.

Alternative Prozesskettenstrukturen, unterschiedliche Werkstofftypen und umfangreiche Wertebereiche der Fertigungsparameter führen nach Larek et al. (2013) zu einer hohen Vielfalt an Prozesskettenvarianten (Strukturen + Parametrierungen) bei realen Problemstellungen. Zur Beherrschung der Variantenvielfalt schlagen sowohl Larek et al. (2013) als auch Hagendorf und Pawletta (2011) Metamodellierungskonzepte vor. Im nachfolgenden Kapitel wird ein Metamodellierungsansatz zur Spezifikation von Prozesskettenvarianten eingeführt.

3 Ontologische Prozesskettenmodellierung mit der System Entity Structure

Die System Entity Structure (SES) ist eine Ontologie, welche ursprünglich zur Repräsentation von Systemstrukturen in der Simulationstechnik eingeführt wurde. Sie definiert alle typischen Elemente einer anwendungsbezogenen Ontologie: (i) *Konzeptionalisierung*, (ii) *Taxonomie*, (iii) *Vererbung* und (iv) *Instanziierung*. Eine SES wird durch einen gerichteten und beschrifteten Baum dargestellt. Die Knoten des Baumes gliedern sich in zwei Kategorien: (i) *echte Knoten* und (ii) *deskriptive Knoten*. Echte Knoten repräsentieren Objekte der realen oder imaginären Welt, welche allgemein als Entitäten bezeichnet werden. Deskriptive Knoten beschreiben die Beziehung des direkten (echten) Vorgängerknotens mit dem direkten (echten) Nachfolgerknoten. Die Namen der deskriptiven Knoten besitzen stets ein Suffix wie *Dec*, *Spec*, oder *MultiAspect*. Die Endung *Dec* kennzeichnet einen Aspekt und beschreibt die Dekomposition einer Entität. Knotennamen mit der Endung *Spec* spezifizieren eine Spezialisierung und stellen die Taxonomie einer Entität dar. Der Suffix *MultiAspect* repräsentiert einen Multiplen-Aspekt, der die Zerlegung einer Entität in typengleiche Entitäten beschreibt. Bei der Modellierung mit einer SES muss die grundlegende Abfolge der Knoten beachtet werden. Es gilt einen alternierenden Modus von echten und deskriptiven Knoten einzuhalten. Dabei ist zu beachten, dass der Wurzelknoten und die Blattknoten immer Entitäten darstellen. Bezüglich umfassenderer Darstellungen sei auf die originäre Quelle Zeigler und Hammonds (2007) beziehungsweise auf Schwatinski et al. (2012) verwiesen.

Abbildung 3 zeigt die Spezifikation der Prozesskettenvarianten aus Abbildung 1 mit einer SES. Beispielhaft wird angenommen, dass das zu fertigende Werkstück aus zwei verschiedenen Materialtypen hergestellt werden kann. Weiterhin sollen werkstoffspezifisch jeweils fünf verschiedene Einstellungen für die Fertigungsparameter der Verfahren ALD und ARS zulässig sein. Aus den drei alternativen Prozesskettenstrukturen und den zulässigen Parametereinstellungen folgen mehrere tausend Prozesskettenvarianten pro Werkstofftyp. Aus Platzgründen sind die Knotenattribute der Entitäten sowie die im unteren Teil spezifizierten SES Variablen und Funktionen nur teilweise dargestellt.

Alle Blattknoten der SES entsprechen einem Basismodell der MB, was durch das Knotenattribut $\{mb = \dots\}$ gekennzeichnet ist. Der Wurzelknoten *Prozesskette* mit dem nachfolgenden Aspekt *ProzessketteDec* beschreibt die Zerlegung jeder *Prozesskette* in die Entitäten *Q*, *ALD* und *SK* sowie in eine spezielle Prozessvariante *PV*. Die Kopplungsbeziehungen der einzelnen Entitäten eines Aspekt-Knotens sind an der Aspekt-Kante definiert. Das Tupel $(Q.out, ALD.in)$ an der

ProzessketteDec-Kante bedeutet, dass der Ausgangsport von Q mit dem Eingangsport von ALD verbunden ist.

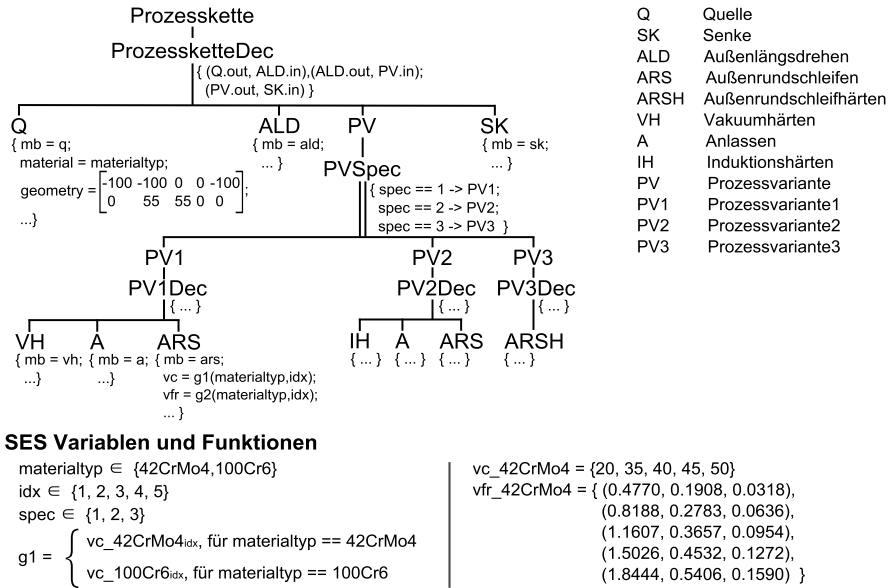


Abbildung 3: SES zur Spezifikation der Prozesskettenstrukturen aus Abbildung 1 einschließlich zulässiger Parametrierungen.

Die Spezialisierung *PVSpec* beschreibt, dass die Entität PV durch eine der Nachfolger-Entitäten *PV1-PV3* zu konkretisieren ist. Die Auswahlregeln an der Kante von *PVSpec* definieren, wie die Konkretisierung bei der Modellgenerierung zu erfolgen hat. Im vorliegenden Beispiel erfolgt die Konkretisierung in Abhängigkeit von der SES Variablen *spec*. Die spezialisierten Prozessvarianten *PV1-PV3* sind zusammengesetzte Entitäten, die im Kontext einer Systemsimulation gekoppelte Systeme darstellen. Ihre Zerlegung wird durch die zugehörigen Aspekte *PV1Dec-PV3Dec* beschrieben.

In der dargestellten SES definieren alle Blattknoten Knotenattribute {...}. Sie spezifizieren die zulässigen Parametrierungen des entsprechenden Basismodells. Die Entität Q besitzt zum Beispiel die Knotenattribute *material* und *geometry*. Das Knotenattribut *geometry* ist eine Konstante und definiert in Form einer z-x-Koordinatenmatrix eine Anfangsgeometrie für alle zu erzeugenden Werkstücke. Material ist ein Knotenattribut, deren Wert sich aus der SES Variablen *materialtyp* ergibt. Die zulässige Wertemenge der SES Variablen *materialtyp* ist im Abschnitt SES Variablen und Funktionen definiert (Abb. 3). Eine konkrete Wertzuweisung erfolgt erst während der Modellgenerierung (vgl. Kapitel 4). Damit definieren die SES Variablen eine Art Eingangsschnittstelle. Die Spezifikation der differenzierten fertigungstechnischen Parameter ist am Blattknoten *ARS* der Prozessvariante *PV1* anhand der Knotenattribute *vc* und *vfr* dargestellt. Ihre Belegung ist von dem zu bearbeitenden Werkstofftyp und der für den Werkstofftyp zulässigen Wertemenge abhängig. Diese beiden Sachverhalte sind mit SES Variablen und SES Funktionen

spezifiziert. In Abbildung 3 sind beispielhaft die SES Variablen mit den zulässigen Wertemengen für den Werkstofftyp 42CrMo4 ($vc_{42CrMo4}$; $vrf_{42CrMo4}$) und die SES Funktion $g1(materialtyp,idx)$ definiert. Der Funktionsparameter idx ist ebenfalls eine SES Variable. Sie kodiert den Index zur Zuordnung eines Fertigungsparameters aus der geordneten Wertemenge. Die ebenfalls am ARS Knoten benutzte SES Funktion $g2(materialtyp,idx)$ ist analog zur Funktion $g1$ aufgebaut.

Die von Schwatinski et al. (2012) eingeführte Definition von SES Variablen und Funktionen stellt eine Erweiterung zur originären SES Ontologie dar. Sie ermöglichen sowohl eine einfache Spezifikation von alternativen Prozessketten als auch implizite Spezifikation von Zwangsbedingungen über Knotenattribute. Dies reduziert die Komplexität der Baumstruktur. Weiterhin unterstützen die SES Variablen und Funktionen eine einfache Erweiterung von SES Spezifikationen. Soll beispielsweise die betrachtete SES um einen neuen Werkstofftyp erweitert werden, so ist lediglich eine Anpassung bei der Definition der SES Variablen und Funktionen durchzuführen. Im Vergleich zu den SES basierten Modellen von Larek et al. (2013) sowie von Hagedorf und Pawletta (2011) zeichnet sich die SES in Abbildung 3 durch eine wesentlich bessere Übersichtlichkeit und vereinfachte Erweiterbarkeit aus.

4 Vom ontologischen Modell zum ausführbaren Simulationsmodell

Die Entwicklung der SES Ontologie ist eng mit den Arbeiten zur Discrete Event System Specification (DEVS) verbunden. In diesem Zusammenhang wurden auch Methoden zur automatisierten Modellgenerierung entwickelt. Die Kombination dieser Methoden mit der SES und MB wird *SES/MB Framework* (Abb. 4) genannt (Zeigler et al. 2000). Schwatinski et al. (2012) stellen mit der Tiny SES Toolbox die Methoden des SES/MB Frameworks allgemein für MATLAB/Simulink sowie die SimEvents Toolbox zur Verfügung.

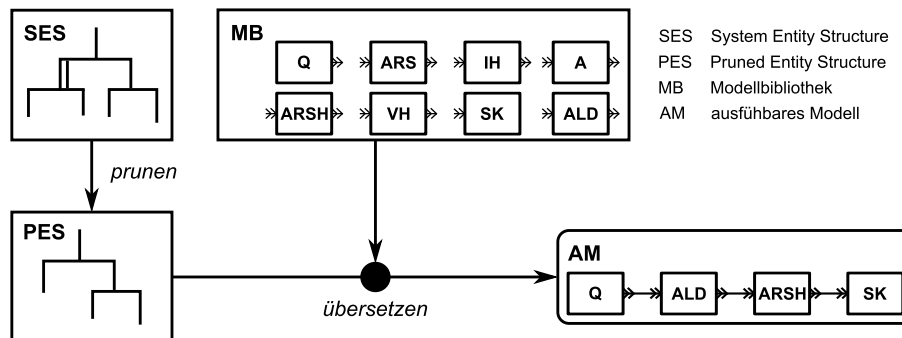


Abbildung 4: Prinzip des SES/MB Ansatzes.

Die Menge der Systemstrukturen und der zulässigen Parametrierungen wird gemäß Kapitel 3 in einer SES spezifiziert. Die dynamikbeschreibenden Modellkomponenten werden als konfigurierbare Basismodelle in einer MB organisiert. Im Rahmen der Modellgenerierung wird im ersten Schritt (*prunen*) eine

konkrete, parametrisierte Systemstruktur aus der SES abgeleitet. Dazu müssen den SES Variablen gemäß den Wertebereichsdefinitionen Werte zugewiesen werden. Für die SES in Abbildung 3 werden beispielsweise folgende Wertzuweisungen angenommen: $spec=1$, $materialtyp=42CrMo4$, $idx=1$.

Durch die Variablenbelegung $spec=1$ wird am deskriptiven Knoten PVSpec die Entität PV1 mit dem zugehörigem Teilbaum ausgewählt. Die Belegung der Variablen $materialtyp$ ermöglicht eine konkrete Wertzuweisung beim Knotenattribut $material$ an der Entität Q. Die Auflösung der Funktionen $g1$ und $g2$ ermöglichen die Wertzuweisung der Knotenattribute vc und vfr an der Entität ARS. Das Ergebnis ist eine reduzierte Baumstruktur ohne entscheidungsbehaftete Ausdrücke. Zeigler et al. (2000) bezeichnen diesen Vorgang als Prunen, weshalb die reduzierte Baumstruktur Pruned Entity Structure (PES) genannt wird. Die PES in Abbildung 5 repräsentiert eine Prozesskettenvariante (Struktur + Parametrierung) der ersten Prozesskettenstruktur nach Abbildung 1.

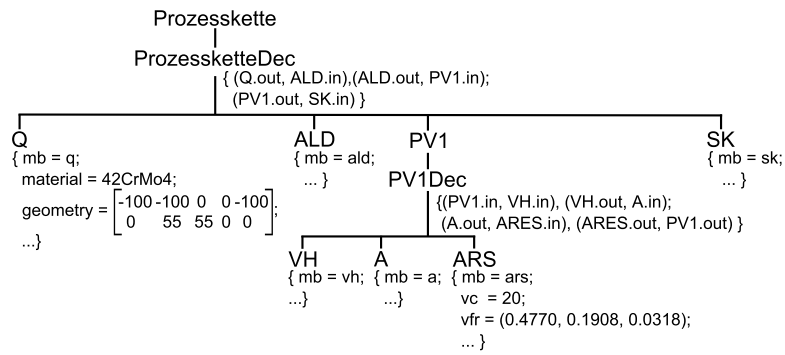


Abbildung 5: PES der ersten Prozesskette mit angedeuteten Knotenattributen.

Im zweiten Schritt (*übersetzen*) der Modellgenerierung erzeugt ein Modellübersetzer auf Basis der PES und den Modellkomponenten der MB ein ausführbares Modell (AM) gemäß Abbildung 2. Das AM kann anschließend durch den Simulator der Simulationsumgebung ausgeführt werden.

Zur Verarbeitung mit der Tiny SES Toolbox muss eine SES prädikatenlogisch in SWI-Prolog formuliert werden. Zu diesem Zweck stellen Schwatinski et al. (2012) dem Anwender vordefinierte SES Prädikate zur Verfügung, so dass in keinem Fall das Erlernen von Prolog erforderlich ist.

Der in SWI-Prolog implementierte Prune Algorithmus wird vom Anwender über eine MATLAB Funktion aufgerufen. Als Parameter sind der Name der SES Datei und die Werte der SES Variablen zu übergeben. Anhand der SES Variablen erzeugt SWI-Prolog eine PES und übermittelt diese in Form von Strings zurück an MATLAB. Weiterhin stellt die Tiny SES Toolbox die Modellübersetzung in Form einer MATLAB Funktion zur Verfügung (Schwatinski und Pawletta 2013). Diese generiert unter Verwendung der Simulink API aus der PES und der MB ein ausführbares MATLAB/SimEvents Modell. Da die Methodik automatisierte Modelluntersuchungen zum Ziel hat, verzichtet die Tiny SES Toolbox auf die Generierung von Subsystemen und löst diese automatisch auf. Bezüglich näherer

Details zur Prolog-MATLAB Schnittstelle und zur Modellübersetzung sei auf die Veröffentlichung von Schwatinski und Pawletta (2013) verwiesen.

5 Exemplarische Prozesskettenuntersuchung

Zur Validierung der methodischen Ansätze und zur Verifikation der entwickelten Softwarewerkzeuge wurde eine von Larek et al. (2013) beschriebene Prozesskettenuntersuchung durchgeführt. Bei dem Beispiel handelt es sich um ein simulationsbasiertes Optimierungsproblem. Die Zielstellung kann wie folgt formuliert werden: Ausgehend von den Prozesskettenstrukturen in Abbildung 1 ist eine Prozesskettenvariante (Struktur + Parametrierung) gesucht, bei der der elektrische Energieverbrauch (E_v), der Kühlschmierstoffverbrauch (K_v) und der Werkzeugverschleiß (V) minimal sind. Die meisten simulationsbasierten Optimierungsansätze betrachten nur Parameteroptimierungsprobleme bezogen auf ein Modell mit einer statischen Modellstruktur (März et al. 2011). Für die Durchführung der Optimierung mit den genannten Zielen wird auf den Ansatz von Hagendorf und Pawletta (2011) aufgebaut. Dieser Ansatz ermöglicht eine simulationsbasierte Struktur- und Parameteroptimierung (SSPO) auf Basis des SES/MB Frameworks in Kombination mit einem Genetischen Algorithmus (GA).

Das Anwendungsbeispiel enthält einen strukturbezogenen Optimierungsparameter am deskriptiven Knoten PVSpec (Abb. 3). Dieser ist mit der Variablen spec kodiert und besitzt die Wertemenge $\{1, 2, 3\}$. Dazu kommen weitere fertigungstechnische Optimierungsparameter in Form von Modellparametern der Basismodelle. Die konkreten Optimierungsparameter lauten: ap_{ALD} , f_{ALD} und vc_{ALD} an der Entität ALD und vc_{ARS} , vfr_{ARS} als 3×1 Vektor bestehend aus den Zustellungen für das Schruppen, Schlichten und Feinschlichten an der Entität ARS. Diese sind nur teilweise als Knotenattribute und SES Variablen in Abbildung 3 dargestellt.

Der GA stellt für die Modellgenerierung und Modellausführung den übergeordneten Experimentrahmen dar. Der aktuell berechnete Parametervektor des GA initialisiert die SES Variablen für die nächste Modellgenerierung und anschließende Modellausführung. Die Simulationsergebnisse jeder Modellvariante werden durch eine Gütefunktion (s. Gl. 1) bewertet. Die Gütefunktion beinhaltet normierte Verbräuche welche mit Gewichtungsfaktoren behaftet zu einem Verbrauchswert verdichtet werden.

$$G = \frac{1}{3} E_v + \frac{1}{3} K_v + \frac{1}{3} V \rightarrow \min \quad (1)$$

Abbildung 6 zeigt die Simulationsergebnisse der Prozesskettenuntersuchung. In Abbildung 6 entspricht jede Experimentnummer einer konkreten Prozesskettenvariante. Als GA wurde identisch zu den Arbeiten von Larek et al. (2013) die MATLAB Global Optimization Toolbox verwendet. Der GA untersucht von den mehreren tausend möglicher Prozesskettenvarianten etwas weniger als 240. Die optimale Prozesskettenvariante wird im 219. Experimentdurchlauf ermittelt. Diese repräsentiert die dritte Prozesskettenstruktur, bestehend aus den Fertigungsverfahren ALD und ARSH, mit den optimierten Fertigungsparametern für vc_{ALD} , f_{ALD} und ap_{ALD} . Die Ergebnisse entsprechen den Untersuchungsergebnissen von Larek et al (2013).

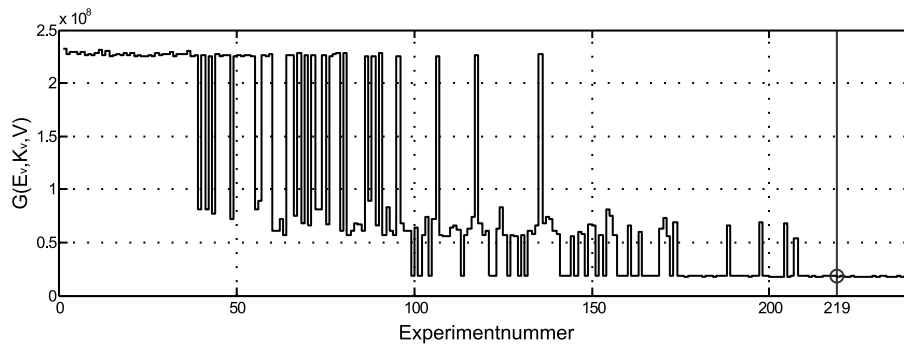


Abbildung 6: Ergebnisse der Prozesskettenuntersuchung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der klassischen Vorgehensweise der Modellierung und Simulation fertigungstechnischer Prozessketten wurde die Beherrschung der Variantenvielfalt als gravierendes Problem identifiziert. Aufbauend auf dem System Entity Structure/Model Base (SES/MB) Framework wurde ein Lösungsansatz entwickelt. Methodisch basiert dieser auf drei grundlegenden Konzepten: (i) Modellierung einzelner Fertigungsverfahren und Organisation der Modelle in einer MB, (ii) Spezifikation aller zulässigen Prozesskettenvarianten (Struktur + Parametrierung) mit einer SES, (iii) Bereitstellung von Methoden zur automatisierten Generierung ausführbarer Simulationsmodelle.

Zur besseren Beherrschung der Parametervielheit wurde die originäre SES um SES Variablen und SES Funktionen erweitert. Es wurde die grundlegende Umsetzung des SES/MB Frameworks in der MATLAB/SimEvents Umgebung aufgezeigt. Anschließend wurde dessen Kombination mit simulationsbasierten Optimierungsmethoden an einer exemplarischen Prozesskettenuntersuchung demonstriert. Neben klassischen Modellparametern sind auch unterschiedliche Strukturvarianten Bestandteil des Optimierungsproblems.

Zukünftig soll die Methode auf komplette Fertigungsstrukturen angewendet werden. Dazu werden vom Kooperationspartner, der Stiftung Institut für Werkstofftechnik (IWT) an der Universität Bremen, Modelle weiterer Fertigungsverfahren entwickelt. Weiterhin sollen neben den bisher untersuchten Ressourcenarten auch logistische Größen, wie Pufferkapazitäten, Losgrößen usw. mitbetrachtet werden

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Kooperationspartner Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen Abteilung Fertigungstechnik und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Fördernummern: BR 825/62-1 und PA 631/2-1).

Literatur

- Hagendorf, O.; Pawletta, T.; Larek, R.: Meta-Model-based Estimation of Optimal System Variants with MATLAB/Simulink. *Simulation Notes Europe* 22 (2012) 1, S. 7-14.
- Hagendorf, O.; Pawletta, T.: A Framework for Simulation Based Structure and Parameter Optimization of Discrete Event Systems. In: Wainer, G.A.; Mosterman, P.J. (Hrsg.): *Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications*, CRC Press Inc. of Taylor & Francis Group, USA, 2011, S. 199-222
- Junge, M.: *Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung*. Diss., Univ. Kassel, 2007
- Larek, R.; Brinksmeier, E.; Pawletta, T.; Hagendorf, O.: Model-Based Planning of Resource Efficient Process Chains Using System Entity Structures. In: Schuh, G.; Neugebauer, R.; Uhlmann, E. (Hrsg.): *Future Trends in Production Engineering - Proc. of the 1st Conf. of the German Academic Soc. for Prod. Eng. (WGP)*, Berlin, 8.-9 June 2011, Springer 2013, S. 361-372
- Larek, R.: *Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung*. Diss, Univ. Bremen, 2012
- März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*. Springer 2011
- Neugebauer, R.: *Energieeffizienz in der Produktion, Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf*. Fraunhofer Gesellschaft, 2008
- Schmidt, A.: *Entwicklung eines Simulators zur energetischen Bewertung von Prozessketten der spanenden Bauteilfertigung mit MATLAB/SimEvents*. Master-Thesis, Hochschule Wismar, 2012
- Schwatinski, T.; Pawletta, T.: Ontologische Modellierung und Modellgenerierung in der MATLAB/Simulink Umgebung: Die „Tiny SES Toolbox“. In: Reichardt, R. (Hrsg.): *ASIM-Treffen STS/GMMS 2013 - ARGESIM Report 41*, Düsseldorf, 28.2-1.3 2013, ARGESIM/ASIM Pub. TU Vienna, 2013, S. 57-64.
- Schwatinski, T.; Schmidt, A.; Pawletta, T.: *Tiny SES Toolbox.*, Website 2012, http://www.mb.hs-wismar.de/cea/SES_Tbx/sesToolboxMain.html
- Weinert, N.: *Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme*. Diss., TU Berlin, 2010
- Zeigler, B.P.; Hammonds, P.: *Modeling and Simulation-Based Data Engineering*. Elsevier Academic Press, 2007
- Zeigler, B.P.; Praehofer, H.; Kim, T.G.: *Theory of Modeling and Simulation*. Second Edition, Elsevier Academic Press, 2000