

Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation

Advanced integration of energetic consideration in discrete event simulation

Andreas Schlegel, Johannes Stoldt, Matthias Putz, Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany),
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, johannes.stoldt@iwu.fraunhofer.de,
matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

Abstract: In order to allow for truly holistic considerations, as intended in the Digital Factory concept, energy-related factors need to be considered. This has not yet been implemented for discrete event simulation (i.e. material flow simulation) in industrial companies even though it may foster the energy efficiency within production sites considerably. The reason for the lack of acceptance is that previously discussed approaches to a solution did not meet the user requirements. This paper discusses how a suitable extension, which allows for energy-related considerations within material flow simulation, can be developed paying heed to both user requirements and the state of the art. Opportunities for its utilisation as well as the associated extra time and effort are discussed by specific examples.

1 Einleitung

Mittels verschiedener Arten der Simulation sollen im Rahmen der Digitalen Fabrik Produktionssysteme ganzheitlich geplant, evaluiert und verbessert werden (VDI 4499-1 2008). Besonders die Materialflusssimulation erschließt große Verbesserungspotentiale, indem komplexe, stochastische Prozessketten innerhalb eines Produktionsnetzwerkes bei frei wählbarem Detailierungsgrad untersucht werden können. Das eingangs genannte Ziel der ganzheitlichen Planung wird allerdings nur lückenhaft und nicht in der gebotenen Tiefe seitens der marktverfügbaren Lösungen unterstützt. Vor allem im Zuge aktueller Aktivitäten zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion wurde festgestellt, dass gerade energetische Aspekte sowie Wechselwirkungen zwischen Produktionsprozess, Betriebsmitteln, versorgender und unterstützender Prozessperipherie, Fabrikgebäude und Umwelt nur mit erheblichem Aufwand untersucht werden können. Um diese Lücke zu schließen ist es erforderlich, die eingesetzten Werkzeuge weiterzuentwickeln.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Das Thema Energiesimulation nimmt in der neueren wissenschaftlichen Diskussion einen prominenten Platz ein. Folglich soll zunächst der Stand der Technik zusammengefasst werden.

Einen Ansatz zur simulativen Untersuchung energetischer Fragestellungen beschreibt Rager. Komplexe Prozesse werden mit dem Ziel unterteilt, energieintensive Teilprozesse zeitlich versetzt ablaufen zu lassen (Rager 2006). Zugrunde liegt das Konzept, Bedarfsspitzen zu verhindern, die sich als Summe einzelner Leistungsaufnahmeniveaus ergeben würden. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Solding und Petku (2005), welche konkrete Verbrauchsniveaus für einzelne Verbraucher und Teilprozesse definieren. Eine vergleichbare Lösung wurde von Wolff et al. (2012) vorgestellt und implementiert.

Die nächste Entwicklungsstufe für energetische Betrachtungen in Bezug auf die Detaillierung bildet die Verwendung approximierter Realkurvenverläufe, wie sie von verschiedenen Autoren beschrieben wird (Junge 2007; Schulz und Jungnickel 2012; Thiede 2012; Weinert 2010). Hervorzuheben sind v.a. die Arbeiten von Junge und Weinert, da diese ein hohes Maß an Flexibilität und Detailtreue ermöglichen. Zugleich bleibt festzustellen, dass hier das Dilemma zwischen erreichbarem Detaillierungsgrad und dazu notwendigen Datenaufnahmeaufwand (Zeit, Kosten) deutlich zu Tage tritt (Thiede et al. 2012). Folgerichtig ist bei der erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in die Materialflusssimulation der Abstraktionsgrad für die Bedarfsverläufe genau zu wählen.

Um den Anspruch nach Ganzheitlichkeit zu erfüllen, ist es erforderlich, zusätzlich zur elektrischen Energie auch andere Energieträger bzw. energieübertragende Medien (z.B. Druckluft) sowie unter Energieaufwand bereitgestellte Leistungen der Produktionsperipherie (z.B. Beleuchtung) zu simulieren. Dies wird bislang jedoch nur von wenigen Autoren konkret beachtet (bspw. Schulz und Jungnickel 2012; Thiede et al. 2012). Auch fehlt den untersuchten Ansätzen ein generischer Ansatz, der es gestattet, verschiedenste Energie- und Medienflüsse zu untersuchen.

Eine bidirektionale Verknüpfung der Produktions- und Versorgungsprozesse, in der der Verbrauch unmittelbar vom Produktionsgeschehen und die Möglichkeit zur Bearbeitung wiederum von der Medienbereitstellung beeinflusst werden, ist bislang nicht im wissenschaftlichen Diskurs verankert. Lösungsansätze, die, wie von Junge (2007) und Thiede (2012) demonstriert, eine Kopplung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge verfolgen, lassen sich zudem aufgrund ihrer Komplexität schwer in Entwicklungsprozesse von Industrieunternehmen integrieren.

Stahl et al. (2013) sowie Wolff et al. (2012) haben erste Ansätze zur Umsetzung energetischer Betrachtungen in Plant Simulation vor Version 11 vorgestellt. Diese Software eignet sich im Besonderen zur weitreichenden Einführung energetischer Betrachtungen, da sie ein de facto Standard im deutschen Automobilbau ist. Dem Lösungsvorschlag von Stahl et al. (2013) wohnt nur eine geringe Flexibilität inne, da nur ausgewählte Grundobjekte von Plant Simulation für energetische Betrachtungen erweitert werden. Zugleich haben die Autoren eine Möglichkeit zur Betrachtung peripherer Systeme (Produktionsinfrastruktur) geschaffen. Wolff et al. (2012) haben im Gegensatz hierzu auf diese Betrachtungen verzichtet, sind davon abgesehen jedoch flexibler bei der Betrachtung verschiedener bestehender Modellelemente.

Ein in Plant Simulation ab der aktuellen Version 11 implementierte Ansatz für energetische Untersuchungen ist in seiner Funktionalität dem Ansatz von Wolff et al. (2012) sehr ähnlich. So werden „Energiezustände“ mit den bereits vorhandenen „Ressourcenzuständen“ abgeglichen um Statistiken über den Verbrauch einzelner Modellbestandteile zu erheben. Hierbei kann stets nur ein energieübertragendes Medium betrachtet werden. Alle Energiezustände sowie die Transitionen zwischen diesen sind fest vordefiniert und lassen sich nur in Bezug auf Leistungsaufnahme und Übergangszeit verändern. Im Unterschied zu Wolff et al. werden die Energiebetrachtungen nicht mittels einzelner, zentraler und spezialisierter Bausteine sondern unmittelbar in den bestehenden Materialflussobjekten durchgeführt. Interaktionen zwischen der bereitstellenden Infrastruktur untereinander und mit den Materialflussobjekten finden keine Beachtung, jedoch besteht eine bidirektionale Verknüpfung von „Energie-“ und „Ressourcenzustand“. Damit ist gemeint, dass gleichsam der Energieverbrauch vom Produktionsgeschehen abhängt und das energetische Abschalten zu einer Unterbrechung der Produktion führt.

3 Anforderungen an eine flexible Erweiterung

Ausgehend vom beschriebenen Entwicklungsstand mit den genannten Potenzialen und Defiziten wurde ein neuer Ansatz zur erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation entwickelt. Dabei galt es, dem ganzheitlichen Anspruch der Digitalen Fabrik einerseits sowie den Anforderungen potentiellen Anwender (Integrierbarkeit in und Kompatibilität zu existierenden Planungswelten) andererseits gerecht zu werden. Hierzu wurden im Vorfeld sechs Kernforderungen definiert.

Aus den Anwendererfordernissen folgt, dass besonderes Augenmerk auf der Umsetzung einer generischen und flexiblen Lösung liegen muss, die sich an etablierten Standards und Vorgehensweisen orientiert. In Expertenbefragungen wurde deutlich, dass einer Integration von Energiebetrachtungen mittels spezieller Erweiterungsbausteine in bestehenden Planungswerkzeugen gegenüber z.B. der Verbindung von Materialflusssimulatoren mit weiteren, speziell für energetische Untersuchungen prädestinierten Simulationstools unbedingt zu bevorzugen ist.

Entsprechend dem Aspekt der Ganzheitlichkeit wird zweitens eine differenzierte Betrachtung aller Energie- und Medienflüsse zusätzlich zum Materialfluss gefordert. Vor allem bei der Abbildung von Produktionsprozessen und -anlagen reicht es nicht, sich im Modell auf Leistungsaufnahmen elektrischer Verbraucher zu beschränken. Zu berücksichtigen sind ebenso die jeweiligen Bedarfe an allen anderen Energieträgern wie Gas, an Prozessmedien wie Druckluft oder Kühlmittel sowie die Bereitstellung weiterer Prozessvoraussetzungen (PV) wie etwa Beleuchtung.

Zur Realisierung der Erweiterung wird drittens eine Umsetzung in Form generischer Module gefordert. Sowohl Anlagen der Produktion als auch jene der Infrastruktur, lassen sich energetisch nach dem systemtheoretischen Ansatz in gleicher Art beschreiben. Beide nehmen verschiedene Zustände ein, in denen sie als „Verbraucher“ bestimmte Energien, Medien und Prozessvoraussetzungen in Anspruch nehmen, andere dabei als „Erzeuger“ ihrer Umgebung zur Verfügung stellen (gewollt z.B. die Druckluft eines Kompressors, ungewollt z.B. die Abwärme einer Fräsmaschine) und dabei ggf. einen Materialfluss realisieren. Die Energiesimulation muss der Erzeuger-Verbraucher-Dualität Rechnung tragen.

Die vierte Forderung betrifft die detaillierte Abbildung von Betriebszuständen (BZ). Zur energetischen Beschreibung soll anlagenbezogen eine frei wählbare Anzahl an BZ dienen. Diese nehmen Einfluss auf die Intensität des Materialflusses, welcher bspw. im BZ „standby“ ruht. Zusätzlich definieren sie die bereitzustellenden eingehenden bzw. bereitgestellten abgegebenen Energie, Medien und PVs. Betriebszustandsübergänge werden in der fünften Forderung thematisiert. Differenziert wird zwischen programm- und ereignisgesteuerten Zuständen. Erstere werden aufgrund interner oder externer Schalthandlungen eingenommen, meist materialflussbezogene Ereignisse führen aus diesen dann zu den zweitgenannten BZ. Übergänge zwischen BZ nehmen eine definierte Zeit in Anspruch.

Als abschließende sechste Anforderung wird die Eignung der zu entwickelnden Module zur Erprobung und virtuellen Inbetriebnahme von Strategien und Softwaretools der energiesensitiven Produktionssteuerung definiert. Konkret betrifft dies deren Fähigkeit, wahlweise mit simulationsinternen und externen Steuerungsinstanzen, d.h. zusätzlicher Software, zu interagieren.

4 Implementation

Entsprechend der primären Kernforderung wurde eine etablierte Simulationslösung ausgewählt, die gleichermaßen einen konkreten Markt erschließt und die alle geforderten Grundfunktionen mitbringt. Die ausgewählte Software „Plant Simulation“ nimmt in vielen Bereichen eine Marktführerposition ein. Von zentraler Bedeutung war die enge Anlehnung an den VDA Automotive Bausteinkasten, der einen herstellerübergreifenden, weiterentwickelten De-facto-Standard für die deutschen Fahrzeugherstellern definiert (Mayer und Pöge, 2010).

Grundlage des entwickelten Ansatzes ist ein allgemeingültiges Komponentenmodell, mit dem sich gemäß der dritten Forderung alle in der Fertigung vorhandenen Elemente beschreiben lassen. Dieses ist in Abbildung 1 dargestellt und teilt sich in zwei grundsätzliche Ebenen. In der Horizontalen ist der Materialfluss versinnbildlicht, während in der Vertikalen der Energie- und Medienfluss angedeutet ist. Ersteren bildet Plant Simulation standardmäßig ab, während bislang (in V10.1) keine Funktionalitäten zum Abbilden des Verbrauchs und der Erzeugung von Energie und Medien gemäß Forderung 2 existieren.

Diese Aspekte werden im vorgestellten Ansatz durch einen zusätzlichen Baustein (eniBRIC) abgedeckt. Dieser kann als Einzelelement funktional eingesetzt werden, um bspw. ein Subsystem in der Fabrik abzubilden, welches Energien, Medien oder Infrastrukturleistungen bereitstellt (Druckluftkompressor, Lüftungsanlage, Beleuchtung etc.). Komplementär zu bestehenden Elementen der Plant Simulation Klassenbibliothek, zu denen auch alle Objekte des VDA Automotive Bausteinkastens gezählt werden können, bildet er den energetisch relevanten Input (z.B. Aufnahme an Elektroenergie und Kühlwasser einer Induktionserwärmungsanlage) und Output (z.B. Abwärme über Abluft und Kühlwasser) je Betriebszustand ab. Hierzu wurde eine Reihe spezifischer Methoden entwickelt, welche zusammen mit verschiedenen Informationselemente (Tabellen, Listen, Variablen) alle notwendigen Funktionen in einem einheitlichen Baustein mit definierten Schnittstellen bereitstellen.

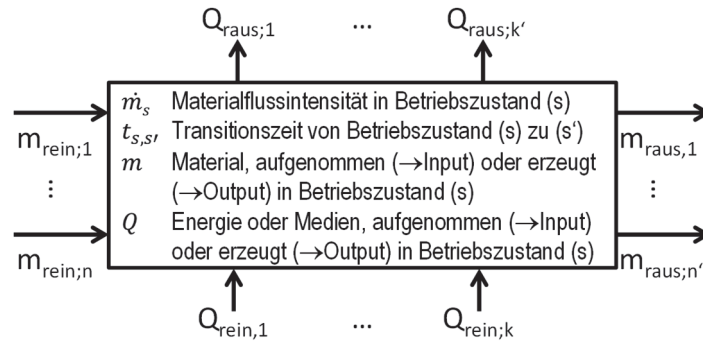


Abbildung 1: Komponentenmodell von Produktionsmitteln und Infrastruktur

Um dem angesprochenen Dilemma von Detaillierungsgrad und Datenaufwand zu entgehen, verwendet die entwickelte Erweiterung konstante Verbrauchsdaten pro Betriebszustand. Auf diese Weise kann die zusätzlich benötigte Rechenzeit auf ein Minimum reduziert werden. Beim Aufbau des Simulationsmodells werden für alle Komponenten die im Vorfeld bestimmten Betriebszustände hinterlegt. Diesen werden jeweils für Energie und Medium definierte Beträge als Input und Output zugeordnet.

Das Zusammenwirken der einzelnen Module ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass eniBRIC für jede betrachtete Komponente im Produktionssystem einzeln zu instanzieren ist, während der Auswerte- und der Konfigurationsbaustein einmalig im Modell sind. Zur Zuordnung von Erzeugern einzelner Medien an bestimmte Verbraucher (Anlagen, Peripheriesysteme) wird zudem ein zentraler Konfigurationsbaustein eingeführt. In diesem werden neben diesen Verknüpfungen von Betriebsmitteln und Infrastruktur auch globale Einstellungen hinterlegt, die das Verhalten einzelner Instanzen beeinflussen. Ein neuer Auswertebaustein dient zur Datenaggregation im Modell und erlaubt die simulationsbegleitende und abschließende Auswertung erhobener Daten. Bei Produktionskomponenten wird zudem – über Sensoren gesteuert – ein Informationsaustausch zwischen eniBRIC und den nativen Materialflusstationen realisiert. Hiermit kann beispielsweise der Effekt unterschiedlicher Energieverbräuche zwischen einer angeschalteten, wartenden und einer produzierenden Maschine abgebildet werden.

Während der Simulation kann der Betriebszustand der einzelnen eniBRIC Instanzen über eine standardisierte Schnittstelle verändert werden. Diese kann durch externe Anlagensteuerungssoftware oder von zusätzlich zu implementierender Steuerungslogik verwendet werden. Sobald ein Betriebszustandswechsel (Transition) initiiert wird, prüft die betroffene Instanz zunächst, ob ausreichend Kapazität für die benötigten Medien bei den jeweiligen Erzeugern (z.B. Trafostation oder Kompressor) verfügbar ist. Trifft dies nicht zu wird konfigurationsabhängig entweder der Wechsel blockiert bis der Mangel beseitigt wurde oder eine entsprechende Meldung wird ausgegeben. Sobald eine Transition beginnen kann, wird zunächst eine vordefinierte Zeit durchlaufen, während der sich das jeweilige Objekt im Wechsel befindet. Je nach Richtung des Wechsels verändert sich das In- und Output verhalten so, dass bis zum Erreichen des Zielzustands stets der maximale Verbrauch aber der minimale Output anliegt. Die verstreichende Zeit kann dabei individuell für jeden Wechsel in einen oder aus einem beliebigen Betriebszustand heraus definiert werden.

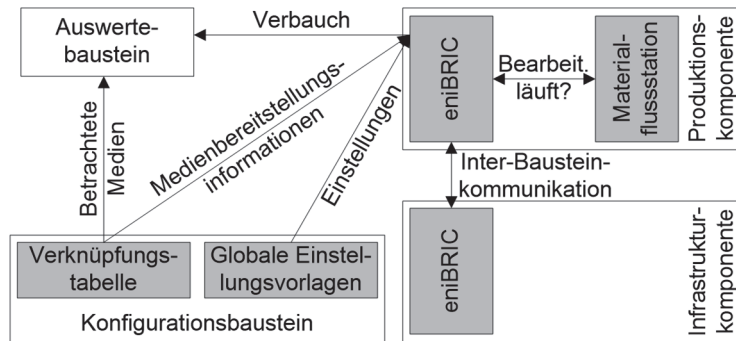


Abbildung 2: Zusammenwirken der einzelnen Bausteine

5 Fallstudien zum Einsatz von eniBRIC

Durch seine generische Konzeption ist eniBRIC sehr wandlungsfähig in seinem Einsatz. Dies wird nachstehend an konkreten Fallbeispielen illustriert. In diesem Zusammenhang wird zudem auf das resultierende Laufzeitverhalten der erweiterten Simulation eingegangen.

5.1 Simulation von Fertigungssystemen

In der industriellen Praxis werden ganze Fertigungssysteme unter anderem simuliert, um Dimensionierungen und Steuerungskonzepte zu verifizieren. Mittels eniBRIC ist es möglich in diesem Kontext auch energetische Betrachtungen durchzuführen und explizit energiesensitive Strategien und Software zur Fertigungssteuerung zu untersuchen. Dies wird nachfolgend an einem exemplarischen Produktionssystem demonstriert (Putz et al. 2012). Das betrachtete System (Abbildung 3) besteht aus fünf Arbeitsstationen, welche in einer getakteten Hauptfertigungslinie organisiert sind. Gemäß ihrer Anordnung im Materialfluss werden an diesen die Vorder- und Hintertüren (Fünf-Türer), die Motorhaube und die Heckklappe, die Vordertüren (Drei-Türer) und die Kotflügel montiert sowie eine Fehlerkontrolle durchgeführt.

Die vier erstgenannten Arbeitsplätze beziehen benötigte Teile von je zwei unabhängigen Subsystemen, welche aus einer bis fünf Arbeitsgruppen (als Einheit gesteuert) bestehen und jeweils durch Puffer von der Hauptlinie entkoppelt sind. Aus energetischer Sicht wurden unter anderem Beleuchtung, Druckluft, elektrischer Strom und Kühlwasser sowie die jeweiligen Erzeuger betrachtet.

In dieses Modell wurden verschiedene Methoden zur Steuerung der einzelnen Anlagen sowie der Fertigung implementiert (Stoldt et al. 2013), welche dem eniMES-Konzept (vgl. Putz et al. 2012) entstammen. Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass unter Verwendung dieser der Systemenergieverbrauch signifikant verringert werden kann, ohne dass mit großen Einbußen bei der Ausbringung des Gesamtsystems zu rechnen ist. Konkret lassen sich bis zu 18 % elektrische Energie einsparen, wobei ca. 0,2 % weniger Fahrzeuge gefertigt werden (Putz et al. 2012).

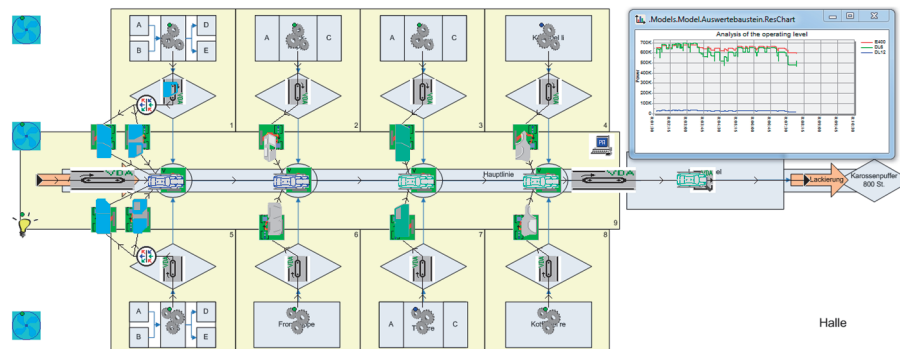


Abbildung 3: Modell während eines Simulationslaufs

Bei der Entwicklung von eniMES-Funktionen wurde das beschriebene Modell zudem genutzt, um verschiedene Fertigungssituationen zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine Möglichkeit zum Export aller relevanten Modellinformationen, wie etwa Abhängigkeiten oder Transitionszeiten, geschaffen. Diese Daten werden für die Untersuchung von Testszenarien in die eniMES-Software eingelesen. Während der individuellen Versuche werden, unter Verwendung einer OPC-basierten Realzeitkopplung, die einzelnen eniBRIC Instanzen durch die eniMES-Software gesteuert (Stoldt et al. 2013). Auf diese Weise ist es möglich, die entwickelte Lösung auch ohne zusätzliche Hardware für eine Vielzahl verschiedener Szenarien zu überprüfen. Daraus ergibt sich eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Entwicklung derartige Software, welche voraussichtlich auch im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme zum Tragen kommt.

5.2 Modellierung von Anlagen mit veränderlichem Verbrauch

In Produktionssystemen kann zumeist nicht davon ausgegangen werden, dass alle betrachteten Betriebsmittel über ihre gesamte Betriebszeit hinweg einen konstanten Verbrauch haben. Ein klassisches Beispiel hierfür sind Wärmebehandlungsöfen, welche während einer einzigen Wärmebehandlung zum Teil verschiedene Temperaturprofile durchlaufen. Es lässt sich feststellen, dass der jeweils notwendige Energieeintrag vom Anstieg der Temperaturkurve abhängt. Qualitativ betrachtet muss besonders viel Heizleistung eingebracht werden, wenn die Temperatur angehoben wird. Soll sie unverändert bleiben, muss lediglich die entstehende Verlustleistung ausgeglichen werden. Ein Abkühlen kann entweder passiv, ohne Energieeintrag oder aktiv mit zusätzlicher Kühlleistung realisiert werden.

Gemäß diesen grundlegenden Zusammenhängen kann ein Wärmebehandlungsöfen als einzelne Station mit einer eniBRIC-Instanz abgebildet werden. Der variable Verbrauch wird hierzu über mehrere Betriebszustände modelliert, welche zeitlich gesteuert nacheinander durchlaufen werden. Die genaue Reihenfolge kann hierbei als Information dem zu bearbeitenden Teil (BE) mitgegeben werden. Exemplarisch ist dieser Lösungsansatz in Abbildung 4 dargestellt. Im Teilbild a) ist das zu durchlaufende Temperaturprofil für zwei unterschiedliche Teilevarianten gezeigt. Der in b) gezeigte Graph zeigt das resultierende Lastprofil des Ofenmodells, wobei die Varianten in der Reihenfolge 2, 1, 2 (noch in Bearbeitung) den Ofen betreten. Unter

Verwendung einer einfachen Schaltlogik lassen sich somit auch langzyklische Veränderungen im Verbrauch ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand abbilden.

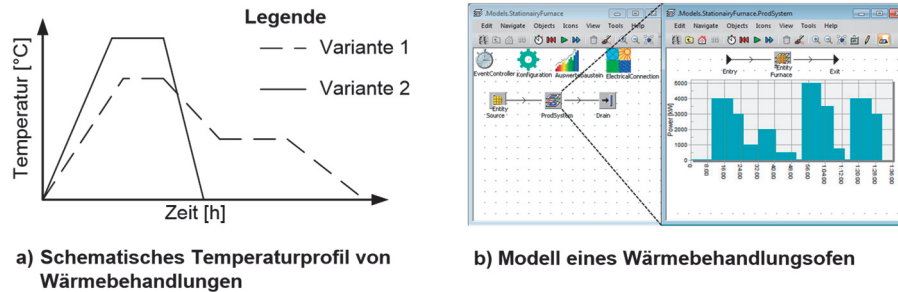


Abbildung 4: Exemplarische Modellierung eines WärmebehandlungsOfens

5.3 Erkenntnisse zum Laufzeitverhalten

Der Einsatz einer Erweiterung zur Betrachtung von Energie im Rahmen der Materialflusssimulation wirkt sich unmittelbar auf die Durchführungsdauer von Simulationsstudien aus. Insbesondere während der Phase der Datenermittlung, -aufbereitung und -abstimmung sowie der Simulationsexperimente ist mit einem Mehraufwand zu rechnen. Welcher Umfang an Daten benötigt wird, ist in diesem Zusammenhang von der Anzahl der modellierten Anlagen und der Art des angenommenen Verbrauchsmodells ab. Letzteres wurde bei eniBRIC auf den einfachsten anzunehmenden Fall des konstanten Verbrauchs reduziert, aus welchem Grund der tatsächliche Mehraufwand vor allem von der Datenakquise abhängt.

Die zusätzlich für die Durchführung der Simulationsexperimente benötigte Zeit ist ebenfalls vom Verbrauchsmodell sowie von der Implementation abhängig. Da eniBRIC in der Lage ist eine beliebige Anzahl unterschiedlicher Medien abzubilden, ist der zusätzliche Rechenaufwand zudem von der Menge betrachteter Medien abhängig. Diese Zusammenhänge wurden mittels eines Modells eines deutschen OEM mit 779 Facility-Objekten des VDA Automotive Baustein Kastens untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst (Originallaufzeit: ca. 30 min).

Besonders bemerkenswert ist hierbei, dass bereits die Vorbereitung zur Installation von eniBRIC, hier die Einbindung der entsprechenden Klassenbibliothek sowie das Hinzufügen weiterer, nicht automatisch ausgeführter Methoden, die Simulationszeit verlängert. Der Grund hierfür konnte bislang nicht genau bestimmt werden. Wurden alle Facility-Objekte mit eniBRIC erweitert, stieg die Rechenzeit um ca. 13 % an, was aus zusätzlichen Sensorabfragen beim Ein- und Austreten von BE resultiert. Die weiteren Szenarios untersuchten spezifische Einstellungen bezüglich der Datenerfassung. Im Minimalszenario wird lediglich der Gesamtverbrauch des Modells ermittelt, während bei „voll global“ die Momentanlast über die Zeit sowie Informationen für eine objektspezifische Verbrauchsrekonstruktion (offline) erfasst werden. Das Maximalszenario sieht darüber hinaus ein getrenntes Loggen der Verbräuche aller Instanzen von eniBRIC vor. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei rationeller Datenerfassung mit eniBRIC auch mehrere Medien abgebildet werden können, ohne die Simulationsdauer mehr als zu verdoppeln.

Tabelle 1: Ergebnisse zur Studie des Laufzeitverhaltens

Szenario	1 Medium	2 Medien	3 Medien
Vorbereitet	104,48 %	104,48 %	104,48 %
Installiert (aus)	112,63 %	112,63 %	112,63 %
Installiert (minimal)	149,84 %	157,86 %	165,12 %
Installiert (voll global)	157,41 %	172,78 %	184,77 %
Installiert (maximal)	173,66 %	193,23 %	211,37 %

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zur erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation gestattet eine umfassende Analyse des Ressourcenverbrauchs in Produktionsprozessen. Er kann zum energetischen Vergleich von Planungsvarianten der Fabrik- und Strukturplanung, zur dynamischen Dimensionierung von Infrastrukturanlagen sowie zur Bewertung energiesensitiver Lösungen zur Produktionsplanung und Fertigungssteuerung eingesetzt werden.

Die Verwendung etablierter Simulationstools und Branchenbibliotheken stellt eine nahtlose Integrierbarkeit in industrielle Planungsumgebungen sicher. Durch das sehr gute Laufzeitverhalten der erweiterten Simulationsmodelle und die aufwandsarme Erweiterung bestehender Modelle werden wesentliche Barrieren überwunden, die heute noch auf Seiten der Anwender eine generelle, standardmäßige Anwendung der Ablaufsimulation zur Planung energieeffizienter Fabrikssysteme verhindern.

Unter Verwendung von eniBRIC wird es überdies möglich entsprechende Outputs zu verfolgen um eine Verbindung von Materialfluss- und Gebäudesimulation herzustellen. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um den Einfluss des Produktionsregimes auf die zeitliche Entwicklung der internen Wärmelasten in einer Fertigungsumgebung nachzubilden. Somit wird eine energetische Bilanzierung und Optimierung über die bislang getrennt betrachteten Planungsbereiche und Leitebenen von Gebäude, Infrastruktur und Produktion hinweg möglich.

Künftige Arbeiten zielen u.a. darauf ab, hierfür eine noch bessere Datenqualität durch die Hinzunahme thermischer Betrachtungen zu erreichen. So soll die aus den bekannten Energieflüssen resultierende Erwärmung von Bauteilen und Betriebsmitteln sowie deren Wärmeabgabe und Abkühlung im Zeitverlauf des Transports und der Lagerung abgebildet werden. Damit können energetische Interaktionen zwischen Produktion und Gebäude untersucht werden und Prozesse mit einem engen thermischen Prozessfenster werden bewertbar.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse fassen Arbeiten zusammen, die im Rahmen der Projekte InnoCaT® und eniPROD® entstanden sind. Das vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschungsprojekt „Innovationsallianz Green Car Body Technologies,“ wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (Förderkennzeichen 02PO2700 ff) und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Das Spitzentechnologiecluster „Energieeffiziente Produkt- und

Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®) wird finanziert aus Mitteln der Europäischen Union (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung) und des Freistaats Sachsen.

Literatur

- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Dissertation, Kassel: Universität Kassel 2007.
- Mayer, G.; Pöge, C.: Auf dem Weg zum Standard - Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens, in: Zülch, G. (Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 29-36.
- Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.: Methodik und Framework zur energiesensitiven Fertigungssteuerung in der Variantenfließfertigung. In: Müller, E.; Bullinger, A. C. (Hrsg.): Tagungsband „Intelligent vernetzte Arbeits- und Fabrikssysteme – VPP2012“. Chemnitz: TU Chemnitz IBF 2012, S. 131-140.
- Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung. Dissertation, Augsburg: Universität Augsburg 2006.
- Schulz, S.; Jungnickel, F.: A General Approach to Simulating Energy Flow in Production Plants via Plant Simulation. Tagungsband, 10th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Istanbul, Turkey, 31.10.-02.11.2012, S. 730-735.
- Stahl, B.; Taisch, M.; Cannata, A.; Müller, F.; Thiede, S.; Herrmann, C.; Cataldo, A.; Cavadini Antonio, F.: Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning, in: Nee, A. Y.C.; Song, B.; Ong, S.-K. (Hrsg.): Re-engineering Manufacturing for Sustainability. Singapore: Springer Science+Business Media 2013, S. 493-498.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Putz, M.: Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation, in: Nee, A. Y.C.; Song, B.; Ong, S.-K. (Hrsg.): Re-engineering Manufacturing for Sustainability. Singapore: Springer Science+Business Media 2013, S. 165-170.
- Solding, P.; Petku, D.: Applying Energy Aspects on Simulation of Energy Intensive Production Systems. Tagungsband, 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, USA, 04.-07.12.2005, S. 1428-1432.
- Thiede, S.: Energy Efficiency in Manufacturing Systems. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Thiede, S.; Bogdanski, G.; Herrmann, C.: A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. In: Wits, W. W.; Jauregui-Becker, J. M.; Möhring, H.-C. (Hrsg.): 1st CIRP Global Web Conference: Interdisciplinary Research in Production Engineering (CIRPE2012), Elsevier 2012, S. 28-33.
- VDI 4499-1: Digitale Fabrik – Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 2008.
- Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Dissertation, Berlin: Technische Universität Berlin 2010.
- Wolff, D.; Kulus, D.; Dreher, S.: Simulating Energy Consumption in Automotive Industries. In: Bangsow, S. (Hrsg.): Use Cases of Discrete Event Simulation – Appliance and Research. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 59-86.