

# Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflüssen in der Automobilfertigung

Matthias Putz<sup>a</sup>, Andreas Schlegel<sup>a</sup>, Sören Lorenz<sup>a,\*</sup>, Enrico Franz<sup>a</sup>, Stephan Schulz<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz

<sup>b</sup>Technische Universität Chemnitz, 09107 Chemnitz

---

## Abstract

Eine höhere Energieeffizienz in der Automobilproduktion kann unter anderem durch verbesserte Planung erreicht werden. Bisher wurde das Energieverhaltensverhalten neuer Produktionsanlagen im Vorfeld meist nicht vollständig ermittelt, sondern durch Anschlusswerte und Gleichzeitigkeitsfaktoren abgebildet. Damit blieb vor allem der dynamische Charakter des späteren Energieverhaltens bei der Optimierung der Prozessabläufe nur ungenügend berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wurde das bereits etablierte Werkzeug der Materialflusssimulation um energetische Aspekte ergänzt. Ein neuer Simulationsbaustein für Industrieroboter ermöglicht es, deren dynamisches Verhalten bereits in frühen Planungsphasen abzubilden. Grundlage dafür sind Prozesslisten und Energieverbrauchsprofile. Ein sogenanntes M-Profil wird zur energetischen Beschreibung von Bewegungsvorgängen der Roboter vorgeschlagen. Am Beispiel einer Produktionsanlage aus dreißig Robotern wird der Ansatz getestet und eine Auswertung vorgenommen.

**Keywords:** Produktionsplanung, Energieeffizienz, Digitale Fabrik, Simulation, Materialflusssimulation, Energieflusssimulation, Industrieroboter

---

## 1. Energieeffizienz durch bessere Planung

### 1.1. Anlagenplanung in der Automobilproduktion

Gestiegene Energiepreise und der gesellschaftliche Druck hin zu nachhaltigen Produktionsweisen erfordern ein Umdenken in der Industrie. Die Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsanlagen findet daher sowohl in der Forschung, als auch in der betrieblichen Praxis seit einiger Zeit große Aufmerksamkeit.

In der Automobilproduktion und insbesondere im Karosseriebau kommen automatisierte Anlagen zum Einsatz, die im laufenden Betrieb nur noch aufwändig optimiert werden können. Zwar bieten Steuerungseingriffe noch Potential für Energieeinsparungen – die wichtigsten Parameter des Energiebedarfs sind aber mit der Inbetriebnahme bereits bestimmt. Umso höhere Bedeutung kommt der Planungsphase zu, in der das spätere Verhalten festgelegt wird. Der Energiebedarf einer zu planenden Anlage spielte als Zielgröße bisher nur eine untergeordnete Rolle. Vorrang hatten Kosten, Durchsatz und Qualität

[1]. Dies hat auch die Entwicklung der heute verfügbaren Planungswerkzeuge bestimmt. Die Funktionalität zur Prozessplanung ist so gestaltet, dass Arbeitsvorgänge detailliert mit ihren benötigten Zeiten festgehalten werden. Ressourcenbibliotheken enthalten Kosten für einzelne Betriebsmittel, aus denen automatisiert Investpläne erstellt werden können. Für den Energieverbrauch existieren solche Hilfsmittel noch nicht.

Eine genaue Planung des Produktionssystems, ist die Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb. Dafür müssen die Methoden und Werkzeuge geschaffen werden. Die Schwierigkeit besteht darin, dass einerseits die Aufwände während der Planung nur moderat erhöht werden dürfen, andererseits aber eine bestimmte Genauigkeit erforderlich ist, um tatsächlich planerische Entscheidungen zu beeinflussen. Im folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der an eine bereits bestehende Methode der Produktionsplanung in der Automobilindustrie anknüpft und am Beispiel einer Karosseriebauanlage zeigt, wie aus Planungsdaten Erkenntnisse zu deren Energieverhaltensverhalten gewonnen werden können.

### 1.2. Materialflusssimulation und Digitale Fabrik

Unter dem Begriff *Digitale Fabrik* werden die Bestrebungen zusammengefasst, die Fabrik- und Produktions-

---

\*Corresponding author

Email address: soeren.lorenz@iwu.fraunhofer.de (Sören Lorenz)

planung mit rechnergestützten Methoden und Werkzeugen zu verbessern. Die *Digitale Fabrik* ist definiert als „ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“ [2].

Die Materialflusssimulation ist eine anerkannte Methode zur Prüfung und Absicherung der Ausbringung von Produktionssystemen. Sie wird zur Optimierung bestehender, aber auch zur Planung neuer Produktionssysteme eingesetzt. Im letzteren Fall wird zunehmend die mit anderen Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* erstellte Datenbasis als Ausgangspunkt für simulative Untersuchungen genutzt. Der bisher übliche Detaillierungsgrad war dabei so gewählt, dass ganze Fertigungsbereiche oder Stationen als einzelne Objekte modelliert werden. Für die Erreichung der Hauptziele der Digitalen Fabrik, die Verbesserung von Wirtschaftlichkeit und Planungsqualität, sowie die Standardisierung von Planungsprozessen [3], ist die Materialflusssimulation ein wichtiges Werkzeug.

Simulation ist in Bezug auf die Materialflüsse definiert als das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Das System ist dabei eine abgegrenzte Menge von Elementen, die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind, wobei die Wechselwirkung des Systems mit seiner Umwelt durch Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben ist [4].

Sinnvoll sind Simulationen nur dann, wenn das untersuchte System aufgrund seiner Komplexität nicht ausreichend mit mathematischen Modellen beschrieben werden kann. Auch die Absicht, das Modell für mehrere Untersuchungen zu verwenden, kann den Aufwand der Modellierung rechtfertigen. Weitere Kriterien zur Bewertung der Simulationswürdigkeit werden in [4] genannt.

Die ereignisorientierte Simulation hat sich in der praktischen Anwendung weitgehend durchgesetzt. Sie ist gekennzeichnet durch die Aufreihung bestimmter Ereignisse, die Zustandsänderungen einzelner Objekte oder des gesamten Systems bewirken. Die Hauptaufgabe bei der Entwicklung solcher Modelle ist daher die Definition der Ereignisse und die damit eingeleiteten Zustandsänderungen. Im Hinblick auf den Materialfluss werden Zustände wie *arbeitend*, *wartend*, *blockiert* oder *gestört* unterschieden. Für die Betrachtung der Energiebedarfe müssen neue Definitionen gefunden werden. Ein Ansatz dafür wird in Abschnitt 2.2 vorgestellt.

### 1.3. Untersuchung am Beispiel einer Karosseriebauanlage

Die Betrachtung der Energiebedarfe wurde am Beispiel einer typischen Karosseriebauanlage durchgeführt,

die für die Fertigung von Anbauteilen eingesetzt wird. Zum Einsatz kommen Fertigungsverfahren wie Punktschweißen, Laserschweißen und Kleben. Die Materialzuführung von etwa zehn Blechteilen erfolgt durch Werker an Einlegestationen oder Förderern. Innerhalb der Anlage ist der Materialfluss ohne spezielle Fördertechnik realisiert, die Teile werden durch Roboter mit Greifern zwischen den Stationen bewegt. Insgesamt kommen etwa dreißig Roboter an fünfzig Einzelstationen in dreihundert Prozessschritten zum Einsatz. Das System entspricht einer getakteten vollautomatisierten Fertigung.

Der elektrische Anschlusswert eines einzelnen Roboters beträgt etwa 7 kW. Über die gesamte Anlage entsteht so ein hochdynamischer Energiebedarf mit einer theoretischen Spitze von mehr als 200 kW. Da nicht alle Roboter gleichzeitig betrieben werden und die Spitzenlasten nur bei bestimmten Bewegungen eines Roboters auftreten, sind die in der Praxis auftretenden Lasten jedoch viel geringer. Dieser Umstand konnte bisher nur durch Erfahrungswissen in Form von Gleichzeitigkeitsfaktoren während der Planung berücksichtigt werden. Eine Optimierung des Verhaltens der Anlage ist darüber nicht möglich.

Wenn die genauen Zeitpunkte des Auftretens von Gesamtlastspitzen in der Anlage bekannt wären, könnten die zugehörigen Prozesse ermittelt werden. Dies würde manuelle und auch automatisierte Optimierungen der Prozesssequenz ermöglichen. Nicht zeitkritische Prozessschritte könnten verschoben werden, um Lastspitzen zu reduzieren.

## 2. Energieorientierte Materialflusssimulation

### 2.1. Simulationsziele

In der betrachteten Produktionsanlage kommen eine Vielzahl verschiedener energieverbrauchender Betriebsmittel zum Einsatz. Das Spektrum reicht von kontinuierlichen Verbrauchern wie Absauganlagen bis hin zu Punktschweißzangen, die diskontinuierlich Spitzenlasten verursachen. Soll dieses Verhalten in einem Modell abgebildet werden, muss es auf geeignete Weise abstrahiert werden. Dazu ist die Festlegung des Ziels der Modellierung und eine Begrenzung des abzubildenden Umfangs notwendig.

Mit der energieorientierten Materialflusssimulation werden die Ziele verfolgt,

- a) das Energieverbrauchsverhalten neuer Produktionsanlagen bereits in der Planungsphase abzuschätzen, um realistische Ansätze zur Dimensionierung der Infrastruktur zu erhalten;

- b) die Basis für manuelle oder automatisierte Optimierungen der Prozesssequenzen zu schaffen;
- c) die Basis für die Untersuchung der Versorgungsflexibilität einer Anlagenplanung und der Auswirkungen auf die Produktivität zu schaffen, wenn nur entsprechend einem limitierten Energieangebot produziert werden kann.

Im Simulationsmodell sollen alle fertigungsrelevanten Prozesse berücksichtigt werden, um den zeitlichen Ablauf korrekt zu repräsentieren – aus energetischer Sicht aber zunächst nur die Prozesse, an denen Roboter beteiligt sind. Diesen Prozessen sollen charakteristische Energieverbrauchsprofile zugeordnet werden, um so den Verbrauch zu definierten Zeitpunkten zu ermitteln und den Verlauf für die gesamte Anlage oder auch einzelne Anschlussgruppen darstellen zu können. Die Auswertung und Darstellung kann auch außerhalb des Simulators erfolgen, falls dies aus praktischen Gründen sinnvoll erscheint. Daneben soll geklärt werden, ob die Materialflusssimulation auch auf diesem detaillierteren Modellierungsniveau sinnvoll eingesetzt werden kann.

Die Simulationswürdigkeit ist gegeben, da kein mathematisch-analytisches Modell bekannt ist, das den beschriebenen Anwendungsbereich mit der gegebenen Komplexität abdecken könnte. Desweiteren soll das Simulationsmodell der iterativen Untersuchung von Möglichkeiten zur Verbrauchssenkung dienen. Somit ist eine wiederholte Verwendung des Simulationsmodells absehbar.

## 2.2. Energieverbrauchsprofile für Roboter

Die Abbildung des realen Energieverbrauchsverhaltens technischer Einrichtungen durch Energieverbrauchsprofile ist eine häufig angewandte Methode. Damit soll meist eine Basis für gesetzliche Regelungen oder die Möglichkeit zum Vergleichen verschiedener technischer Lösungen geschaffen werden. Zunächst muss dafür der Nutzen der technischen Einrichtung normiert und anschließend das energetische Verhalten ermittelt werden. Im folgenden werden einige Ansätze dazu vorgestellt.

Dietmair et al. [5] stellen ein Prognosemodell zur Vorhersage des Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen vor. Sie verknüpfen die Energieverbrauchsprofile mit den Betriebszuständen der spezifischen Maschinenkomponenten. Mit der Kumulation der Energieverbräuche der einzelnen Betriebszustände, die die Werkzeugmaschine während der Bearbeitung eines Auftrages durchläuft, lässt sich für diese der Energiebedarf prognostizieren.

Weinert [6] untersucht die Planung von Auftragssequenzen in Abhängigkeit von den Energieverbrauchspro-

filen jeder am Prozess beteiligten Arbeitsstation. Auf Basis sogenannter Energy-Blocks kann eine energieeffiziente Auftragsreihenfolge bestimmt werden, da zu jedem Auftrag der Energiebedarf auf Basis seiner zusatandsabhängigen Verbräuche kumuliert und visualisiert werden kann. Dies ermöglicht eine Prognose von Energiebedarf und energetischen Lastspitzen des Produktionssystems in Abhängigkeit vom abzuarbeitenden Produktionsprogramm.

Als Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken benennen Hesselbach und Junge [7] unter anderem die Absenkung von Leistungsspitzen aus Steuerungssicht. Dies soll durch eine geeignete Simulationsstudie auf Basis einer Materialflusssimulation unter Hinzunahme der Aufzeichnung des Leistungsverlaufs erreicht werden. Durch die so erreichte Visualisierung des Leistungsverbrauchs in Zusammenhang mit den logistischen Abläufen im System können Maßnahmen, wie beispielsweise die Koordinierung von energieintensiven Prozessen eingeleitet werden, die vorhandene Leistungsspitzen senken und den Gesamtenergieverbrauch verringern.

In der Anlagensteuerungstechnik und der Produktionsplanung haben sich bestimmte Zustandsunterscheidungen der betrachteten Systeme bereits etabliert. In Tabelle 1 sind solchen Zustandsbezeichnungen mögliche energetische Zustände zugeordnet. Eine solche Zuordnung ist nicht immer eindeutig möglich und muss im konkreten Anwendungsfall überprüft werden.

Die betrachteten Industrieroboter entsprechen komplexen elektrischen Verbrauchern. Ihr Lastprofil ist besonders schwierig zu charakterisieren. Als programmierbare universelle Handhabungsgeräte führen sie verschiedenste Prozesse aus, die sich in vielen Parametern unterscheiden. Während Traglast oder Verfahrgeschwindigkeit zumindest als skalare Größen erfasst werden können, entziehen sich die im Raum vollzogenen Bahnbewegungen jeder einfachen formalen Beschreibung. In der Planungsphase ist es außerdem weder nötig, noch möglich, jeden Prozessparameter bereits präzise zu ermitteln.

Die Planungsdaten enthalten Prozessbeschreibungen und Zeitdauern, woraus folgende Prozessstypen abgeleitet wurden:

**Warten** Der Roboter bleibt eingeschaltet und ist bereit, sofort sein Programm fortzusetzen. Im Simulationsmodell wird dieser Zustand generiert, sobald ein Roboter die Abarbeitung der Prozesse unterbrechen muss, weil die erforderlichen Bedingungen nicht erfüllt sind.

**Aufnehmen** Mit dem Roboter und einem montierten Greifer wird ein Teil aufgenommen. Die Bewegung

Steuerungstechnischer Aspekt	Materialflussaspekt	Energieaspekt			
		Elektroenergie komplex	Elektroenergie einfach	Druckluft	Kühlwasser
Produzierend	Arbeitend Blockiert	Lastprofil	Ein	Bedarfsprofil	Wärmeeintrag
Produktionsbereit	Wartend	Grundlast	Ein	Leckagen	kein Wärmeeintrag
Betriebsbereit	Pausiert	StandBy	Aus	Geschlossen	Geschlossen
Aus	Gestört Ungeplant Rüstend	Aus	Aus	Geschlossen	Geschlossen

Tabelle 1: Zustände unter verschiedenen Betrachtungsaspekten

erfolgt mit großer Präzision und geringer Bahngeschwindigkeit. Am Ende dieses Prozesses treten Energiebedarfe durch die Aktuatoren des Greifers auf, beispielsweise Druckluftverbräuche bei pneumatischen Spannern.

**Ablegen** Mit dem Roboter wird ein Teil auf einer Vorrichtung oder einem Förderer abgelegt. Dies entspricht dem Ablauf beim *Aufnehmen*.

**Halten** Mit dem Roboter wird ein Teil lagerichtig gehalten, zum Beispiel für die Bearbeitung mit einem stationären Werkzeug. Der Energiebedarf ist durch die Lageregelung gegenüber dem *Warten* erhöht.

**Arbeiten** Mit dem Roboter und einem montierten Werkzeug wird ein Bearbeitungsprozess ausgeführt, wie beispielsweise Punktschweißen. Der Energiebedarf in diesem Zustand entspricht dem von *Halten*. Eine Unterscheidung ist dennoch sinnvoll, weil dadurch die Energiebedarfe des Werkzeugs in den zeitlichen Ablauf der Roboterprozesse eingeordnet werden können. Beim *Halten* wird angenommen, dass keine solchen Energiebedarfe auftreten oder sie einem anderen Betriebsmittel zugeordnet werden.

**Verfahren** Mit dem Roboter wird eine Bewegung zum Erreichen einer Zielposition ausgeführt. Dies ist gekennzeichnet durch ein Beschleunigen, einer Phase mit relativ konstanter Bahngeschwindigkeit und einem Abbremsen. Haftkräfte und Massenträgheit verursachen Lastspitzen zu Beginn und Ende des Prozesses.

Abgesehen von *Verfahren* werden die Prozesstypen in der Simulation mit jeweils konstantem Energiebedarf ab-

gebildet. Für das *Verfahren* wäre eine Reduktion auf einen Durchschnittswert eine sehr grobe Vereinfachung. In Messungen hat sich für diese Prozesse ein M-förmiger Leistungsverlauf über der Zeit ergeben. Die gemessenen Lastspitzen bei koordinierten Bewegungen lagen deutlich unter dem Anschlusswert des Roboters. Es besteht auch eine Abhängigkeit des energetischen Verhaltens von der Lage der Bahnkurve relativ zur Roboterkonsole [8]. Dieser Zusammenhang wird nicht berücksichtigt, da die genauen Bahnkurven in frühen Planungsphasen ohnehin nicht zu ermitteln sind. Für die Simulation wird der M-förmige Verlauf der Leistungskurve durch die in Abbildung 1 dargestellte lineare Annäherung abgebildet.

### 2.3. Aufbau des Modells

Das Simulationsmodell wurde unter Verwendung der Software *Plant Simulation* erstellt. *Plant Simulation* ist ein ereignisorientiertes Simulationssystem, geeignet um komplexe Produktionssysteme mit ihren Materialflüssen in Modellen abzubilden. Die Software stellt eine Vielzahl von Standardbausteinen, zum Beispiel für Stationen, Förderstrecken und Puffer in einer Bibliothek zur Verfügung, mit denen sich komplexe Netzwerke erstellen lassen.

Während die Arbeitsstationen mit dem Standardbaustein *Einzelstation* abgebildet werden können, wird für den Roboter ein neues Netzwerk erstellt, um den Anforderungen für die Abbildung des Zustands des Roboters und der Berücksichtigung der Prozesssequenz als Grundlage für den Simulationsfortschritt gerecht werden zu können.

Die Zufuhr der Baugruppen wird durch *Quellen* realisiert. Unter der Voraussetzung, dass sich die Produktion nicht aufgrund von Unterbrechungen bei der Materialzufuhr verzögert, wird keine Erzeugungsdauer eingesetzt.

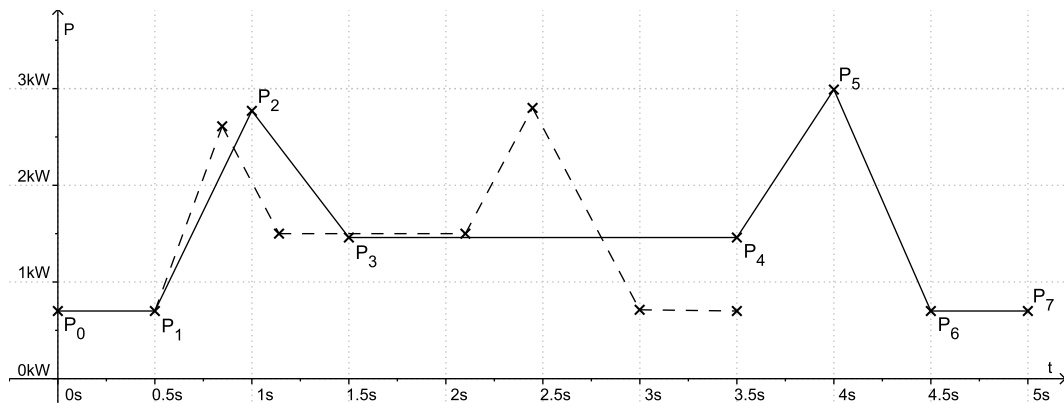


Abbildung 1: M-Profile für den Energiebedarf beim Verfahren mit zwei Verfahrensdauern

Eine Besonderheit in der Modellierung des Materialflusses ist die Belegung der Arbeitsstation durch bloßes Halten eines Bauteils durch den Roboter unter eine Vorrichtung. So wird mit dem Roboter zum Beispiel beim Klebenauftrag ein Bauteil unter die Klebepistole gehalten. Während dieser Aufgabe ist der Roboter durch das Halten des Bauteils aus Sicht des Materialflusses im Zustand *arbeitend*, ebenso die Station, die mit dem Bauteil belegt ist. Im Modell wird das Bauteil auf der Station abgelegt, jedoch bleibt der Roboter im Zustand *arbeitend* und wartet vor der Arbeitsstation.

Für die Roboter ist ein eigenes Netzwerk erstellt worden, welches dupliziert in dem Modell verwendet wird. Die eingefügten Roboternetzwerke unterscheiden sich ausschließlich durch die ihnen zugrundeliegende Prozess-tabelle, die beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt ist. Zusätzlich zu den abgebildeten Feldern wird die Prozess-tabelle im Simulationsmodell durch ein dem Prozess zugeordnetes Verbrauchsprofil ergänzt.

Zur Visualisierung und nachfolgenden Auswertung werden *Einzelstationen* in das Roboternetzwerk implementiert, welche die verschiedenen Zustände des Roboters abbilden. Die Darstellung des Greiferinhalts, der je nach Greifvorrichtung des Roboters auch mehrere Baugruppen aufnehmen kann, wird mit einer *Parallelstation* realisiert. Zur Wiedergabe des Zustands eines Roboters dient eine Gruppe von *Einzelstationen* für *arbeitend*, *produktionsbereit*, *blockiert*, *pausiert* und *gestört*. Innerhalb dieser Gruppe kann nur eine Station mit einem beweglichen Materialflussobjekt belegt sein. Die belegte Station entspricht damit dem Zustand des Roboters. Eine weitere Gruppe von *Einzelstationen* ist für die Nachbildung der Greiferzustände *geöffnet* und *geschlossen* vorgesehen. Desweiteren enthält das Roboternetzwerk eine *Einzelstation* zur Eingabe von Störungen. Mit Hilfe dieser Station können Wartungsintervalle sowie geplante oder zufällige

Störungen modelliert werden.

#### 2.4. Ablauf der Simulation

Vor dem Start des eigentlichen Simulationslaufs erfolgt die Initialisierung der Roboternetzwerke. Es werden bewegliche Materialflussobjekte generiert und auf den entsprechenden Einzelstationen abgelegt, um den Anfangszustand des Roboters zu erzeugen. Beim Start der Simulation sind alle Roboter im Zustand *betriebsbereit*. Für den ersten auszuführenden Prozess eines jeden Roboters wird ein Starterereignis in die der Simulation zugrunde liegende Ereignisliste geschrieben.

Die Starterereignisse der Prozesse bzw. die Prozesse selbst werden in der Ereignisliste mit einem Status versehen. Dieser kann einen Wert zwischen 0 und 3 annehmen und beschreibt den Prozess als geplant, aber nicht begonnen (0), begonnen und im Moment aktiv (1), begonnen, aber aktuell unterbrochen (2) oder als beendet (3).

Nach der Initialisierung des Modells beginnt der eigentliche Simulationslauf. Während der Simulation wird die Ereignisliste durchlaufen und anhand der Bedingungen geprüft, ob ein Prozess begonnen, fortgesetzt, unterbrochen oder beendet werden kann. Im Falle der Beendigung wird der Folgeprozess des jeweiligen Roboters mit dem Status 0 in die Liste eingetragen. Kann die Ereignisliste ohne Änderungen durchlaufen werden, wird das als nächstes eintretende Ereignis berechnet. Um diese Dauer kann die Simulationszeit dann fortschreiten.

Den Prozessen der Roboter ist ein Verbrauchsprofil zugeordnet. Sobald ein Prozess in der Simulation endet, wird ein Eintrag in einer Tabelle generiert. In dieser werden die abgearbeiteten Prozesse mit ihrem Startzeitpunkt, ihrer Dauer und dem zugeordneten Verbrauchsprofil mitgeschrieben. Diese Tabelle bildet die Grundlage für die nachfolgende Auswertung der Energieverbräuche. Ergeben sich ablaufbedingt Wartezeiten für die Roboter, so

Nr.	Prozess- bezeichnung	Prozess- typ	Zeit [s]	Start- station	Ziel- station
1	Teil aufnehmen	aufnehmen	6	S <sub>120</sub>	S <sub>120</sub>
2	Anfahren S <sub>150</sub>	verfahren	5	S <sub>120</sub>	S <sub>150</sub>
3	Stanzmutter setzen	halten	3	S <sub>150</sub>	S <sub>150</sub>
4	Anfahren S <sub>160</sub>	verfahren	6	S <sub>150</sub>	S <sub>160</sub>
5	Kleberauftrag	halten	3,5	S <sub>160</sub>	S <sub>160</sub>
6	Anfahren S <sub>170</sub>	verfahren	5	S <sub>160</sub>	S <sub>170</sub>
7	Teil einlegen	ablegen	6	S <sub>170</sub>	S <sub>170</sub>
8	Anfahren S <sub>120</sub>	verfahren	7	S <sub>170</sub>	S <sub>120</sub>

Tabelle 2: Prozesssequenz eines Roboters

wird für diese ebenfalls ein Eintrag in der Tabelle generiert.

Im Simulationsmodell sind keine zufälligen Ereignisse, wie beispielsweise Störungen vorgesehen. Deswegen muss es nach einer Einschwingphase einen stationären Zustand erreichen. In diesem Zustand ergibt sich für die gesamte Anlage eine feste Prozesssequenz, die sich wiederholt. Für das erstellte Simulationsmodell wurden keine Daten aus dem Anlagenbetrieb wie Verfügbarkeiten oder Taktzeiten von Einzelstationen verwendet. Es können also nur die Prozesszeiten hinsichtlich ihrer vorgegebenen Dauer und dem Takt der Ausbringung überprüft werden. Im stationären Zustand entsprechen die Prozesszeiten den Vorgaben. Die vom Planer vorgesehene Taktzeit für die Gesamtanlage wird erreicht und eingehalten. Insgesamt erscheint das Verhalten der Simulation plausibel.

### 3. Energetische Auswertung

In der Auswertung protokollierte Daten eines Simulationslaufs werden in einer Tabelle mit u. a. den Feldern *Startzeitpunkt des Prozesses*, *ausführende Ressource*, *Verbrauchsprofil* und *Prozessdauer* abgelegt. Diese Tabelle bildet die Basis für die Zuordnung der Verbrauchsprofile. Die Verfahrensprozesse der Roboter haben Prozessdauern zwischen einer und sechs Sekunden. Bei Prozessdauern von weniger als 2,5 s wird das Profil neben der reinen zeitlichen Skalierung durch ein Absenken der Lastspitzen und Anheben des Plateaus angepasst. Das Verbrauchsprofil *Arbeiten* ist für die Fertigungsprozesse selbst vorgesehen. Entsprechend der gewählten Begrenzung des Simulationsumfangs sind diese zwar implementiert, jedoch keine Verbrauchsprofile hinterlegt.

Den Prozesseinträgen werden die Daten der Verbrauchsprofile zugeordnet. Der ereignisdiskrete Ansatz wird hier aufgegeben, da für die Lastspitzen und Wechsel der Energiebedarfsniveaus in der Simulation keine

Ereignisse erzeugt wurden. Die Zuordnung wird auf der Basis einer Skalierung mit Inkrementen von einer Hundertstelsekunde vorgenommen. Nachdem eine Tabelle mit einzelnen Leistungswerten zu bestimmten Zeitpunkten entstanden ist, wird eine lineare Interpolation zwischen aufeinanderfolgenden Werten durchgeführt. Dadurch kann zu jedem Zeitpunkt der Energieverbrauch für einzelne Roboter, Robotergruppen und die gesamte Anlage festgestellt werden.

Das Ergebnis kann in Form von Lastgangdiagrammen dargestellt werden. In Abbildung 2 ist der Verlauf für die Anlage mit etwa dreißig Robotern dargestellt. Das Zeitintervall umfasst einen Produktionszyklus von 55 s im eingeschwungenen Zustand der Simulation. Mit etwa 30 kW bis 45 kW ist der Gesamtanschlusswert der Anlage im Betrieb erkennbar. Auch die Lastspitzen und der Zeitpunkt ihres Eintretens können identifiziert und deren Ursache untersucht werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt für die Analyse der identifizierten Lastspitzen an einer Gruppe von drei Robotern. Die Überlagerung der M-Profile ist hier gut zu erkennen. Lastspitzen ergeben sich an Zeitpunkten, an denen die Roboter gleichzeitig anfahren. Im Diagramm der Robotergruppe ist beispielsweise erkennbar, dass Roboter *B3* nach der Gesamtlastspitze auf das Energieverbrauchsniveau *Warten* übergeht. In den Prozessplänen könnte nun die Möglichkeit gesucht werden, das vorhergehende *Verfahren* zu verzögern. Die grafische Darstellung des Leistungsverlaufs in Zusammenhang mit der Prozesstabelle zur Identifikation von Lastspitzen und hohen Energieverbräuchen ist somit eine geeignete Basis zur Entwicklung von Vorschlägen zur Optimierung dieses Verhaltens.

### 4. Diskussion

Das Ziel war die Erstellung eines Simulationsmodells einer komplexen Karosseriebauanlage, um den Energieverbrauch der eingesetzten Roboter in ihrer Gesamtheit

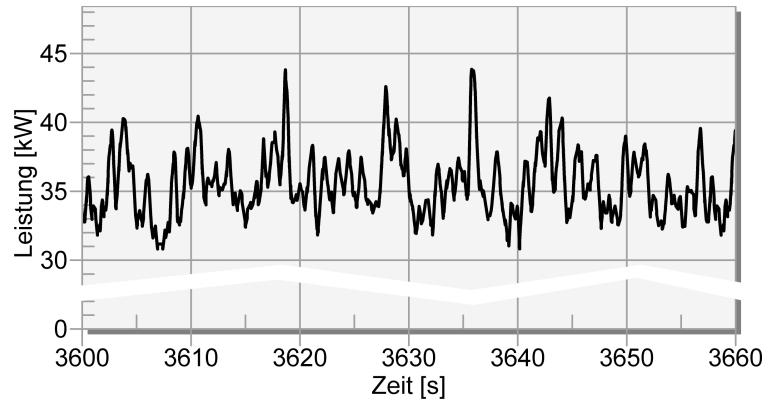


Abbildung 2: Lastkurve der gesamten Anlage

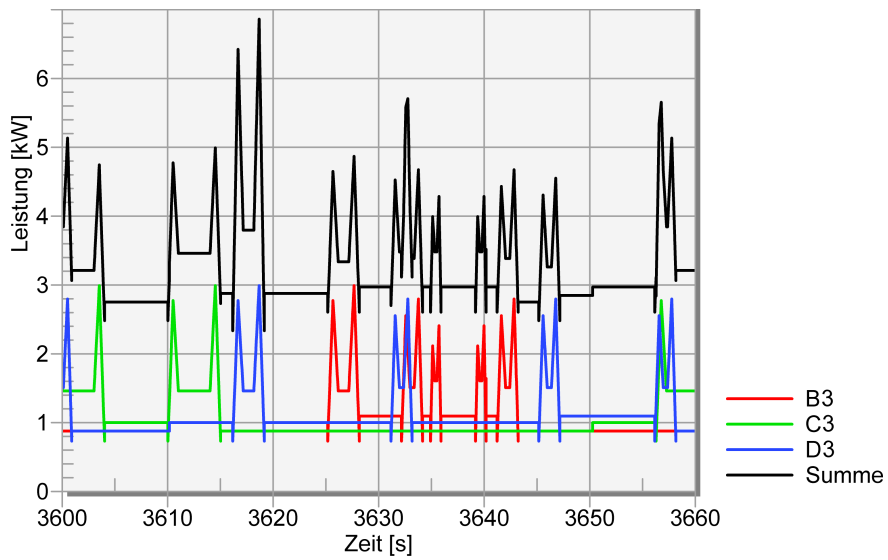


Abbildung 3: Lastkurve einer Gruppe aus drei Robotern

zu untersuchen. Dafür sollten ausschließlich bereits bestehende Planungsdaten verwendet werden, um eine Methodik zu finden, die auch in zukünftigen Neuplanungen einsetzbar ist.

Es entstand ein Simulationsbaustein für Roboter, der es ermöglicht, zusätzlich zu den materialflussorientierten Zuständen über eine Prozessstabelle energetische Zustände in die Ereigniskette einzureihen. Durch Änderungen in dieser Prozessstabelle können neue Prozesssequenzen sowie weitere Parameter leicht auf ihre Auswirkungen überprüft werden. Das Leistungsverhalten der Simulationssoftware wird aufgrund der nachgelagerten Auswertung der Lastprofile nicht wesentlich beeinträchtigt.

Gegenüber dem bisherigen Vorgehen mit Gleichzeitigkeitsfaktoren wird eine deutlich höhere Planungsqualität erreicht. Die Kenntnis des dynamischen Energieverbrauchs und das Reduzieren von Lastspitzen ermöglichen kleiner dimensionierte Versorgungseinrichtungen. Verluste durch meist geringe Wirkungsgrade bei niedriger Auslastung können so reduziert werden.

In weiterführenden Arbeiten können die Energieverbräuche der von den Robotern bewegten Werkzeuge berücksichtigt werden. Die bereits definierte Prozessklasse *Arbeiten* bildet den Ausgangspunkt dafür. Auch andere Medienverbräuche, die durch Materialflussereignisse ausgelöst werden, können in der Simulation aufgezeichnet werden. Zum Beispiel können für Operationen wie *Aufnehmen* und *Ablegen* Verbrauchsprofile für den Druckluftbedarf hinterlegt werden.

Die Leistungsverläufe für die verschiedenen Verbrauchsprofile sind noch nicht hinreichend messtechnisch überprüft. Systematische Messungen an Industrierobotern mit dem Ziel, bessere Abstraktionen für Planungsmodelle zu liefern, müssen die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität sicherstellen. Dabei können relevante Parameter ermittelt werden, mit denen die Verbrauchsprofile für einzelne Roboterkonfigurationen zu modifizieren sind. Im Modell sind beispielsweise bereits Korrekturparameter für die Bahngeschwindigkeit der ausgeführten Bewegungen und die angebrachte Traglast vorgesehen.

Die Integration der Auswertung in den Simulationsprozess im Sinne eines Echtzeit-Energiebedarfs würde es ermöglichen, Startbedingungen für Prozesse in Abhängigkeit vom aktuellen Energiebedarf der Anlage zu formulieren. So könnte der Einfluss eines verknappten Energieangebots – etwa in Form einer maximal zulässigen Netzlast – auf typische Materialflussgrößen wie Ausbringung und Durchlaufzeiten untersucht werden.

Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* werden einen bedeutenden Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs von Produktionssystemen liefern, indem sie bereits früh in

der Planungsphase fundierte Entscheidungen ermöglichen. Die Erhöhung der Planungsaufwände muss durch eine bessere Datenintegration über verschiedene Planungswerkzeuge hinweg begrenzt werden. Dies stellt einen zukünftigen Forschungsschwerpunkt im Bereich des *Product Lifecycle Management* dar, auf den in [9] ein Ausblick gegeben wird.

## 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 und vom Projektträger Karlsruhe (PT-KA) betreut. Das Spitzentechnologiecluster „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ wird finanziert aus Mitteln der Europäischen Union (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung) und des Freistaats Sachsen.

## Literatur

- [1] E. Müller, J. Engelmann, J. Strauch, Energieeffizienz als Zielgröße in der Fabrikplanung, Werkstattstechnik – Online (7/8) (2008) 634–639, ISSN 1436-4980.
- [2] VDI, Richtlinie 4499, Blatt 1, Digitale Fabrik - Grundlagen, Februar 2008.
- [3] W. Kühn, Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner, Hanser, München, Wien, ISBN 3-446-40619-0, 2006.
- [4] VDI, Richtlinie 3622, Blatt 1, Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen, März 2000.
- [5] A. Dietmair, A. Verl, M. Wosnik, Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile, Werkstattstechnik – Online (7/8) (2008) 640–645, ISSN 1436-4980.
- [6] N. Weinert, Planung energieeffizienter Produktionssysteme, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (05) (2010) 503–507, ISSN 0932-0482.
- [7] J. Hesselbach, M. Junge, Reduzierung von Energiespitzen durch Fabriksimulation, Industrie Management 21 (2) (2005) 35–37, ISSN 0179-2679.
- [8] R. Neugebauer, M. Putz, J. Böhme, M. Todtermuschke, M. Pfeifer, New aspects of Energy Consumption Analysis in Assembly Processes and Equipment, in: G. Seliger (Ed.), CIRP: The 9th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 2011.
- [9] M. Putz, A. Schlegel, S. Lorenz, Looking to resource efficient car manufacturing from the point of planning. Short technical presentation at STC-O, CIRP General Assembly, 2011.