

# **Energieorientierte Betrachtung von Engpässen in Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation**

## ***Energy-Oriented Analysis of Bottlenecks in Manufacturing Systems with Material Flow Simulation***

Marco Seewaldt, Uwe Bracht, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (Germany),  
marco.seewaldt@imab.tu-clausthal.de, uwe.bracht@imab.tu-clausthal.de

**Abstract:** Bottlenecks restrict the output of manufacturing systems and offer the greatest leverage for productivity. Therefore, the identification and elimination of bottlenecks is of great importance in order to ensure an efficient production. On the other hand, energy efficiency of plants is becoming more important over the last years. This paper shows how the methods for detecting shifting bottlenecks in manufacturing systems can be used to switch machines to an energy efficient state, without loss of production volume while reducing energy consumption.

## **1 Einleitung**

Klimawandel, Ressourcenverknappung und steigende Energiepreise rücken den sorgfältigen Umgang und eine ressourcenschonende Nachhaltigkeit immer stärker in den Fokus der Gesellschaft. Diese gestiegenen Ansprüche tragen zu schärferen rechtlichen Vorschriften und einem stärker ökologisch motiviertem Marktverhalten bei. Durch diese Treiber erfährt die Betrachtung von Energiekriterien auch außerhalb der besonders energieintensiven Produktionsunternehmen eine zunehmende Relevanz bei der Planung und beim Betreiben von Fabriken (Müller et al. 2009). Dadurch muss nun ein zusätzlicher Aspekt neben den Schlüsselfaktoren Flexibilität und Produktivität unter Berücksichtigung der Zielgrößen Kosten, Qualität und Zeit betrachtet werden, um auf heutigen kurzzyklisch schwankenden volatilen Märkten wettbewerbsfähig bleiben zu können. Entscheidend ist es weiterhin, primär Produktionszeiten und Liefertreue zu verbessern, ohne die Qualität und die Kosten zu vernachlässigen, jedoch mit möglichst energie- und ressourcenschonenden Einsatz.

Zur Planung von Produktionssystemen hat sich die Materialflusssimulation als Werkzeug im Rahmen der Digitalen Fabrik etabliert (Bracht et al. 2017; Pöge und Mayer 2013). In großen Unternehmen, insbesondere der Automobilindustrie, wird jede neue Produktion bzw. ganze Fabriken vor Bau und Inbetriebnahme mit der Simulation abgesichert, um geforderte Ausbringungsmengen zu erreichen. Durch die

Weiterentwicklung der Materialflusssimulation und der Integration von Energieaspekten können heute zuverlässige Energieprognosen der zukünftigen Produktion erfolgen.

Engpässe beschränken die Ausbringungsmenge des Gesamtsystems und bieten den größten Hebel zur Steigerung der Produktivität. Die Identifizierung und Beseitigung von Engpässen ist deshalb von erheblicher Bedeutung, um eine möglichst effiziente Produktion zu betreiben (Goldratt 1990). Dieses gilt ebenso bei der Betrachtung von Energieaspekten entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Dieser Beitrag zeigt auf, wie die systemtheoretischen Ansätze der Engpasstheorie bei der Analyse und Optimierung von Fertigungssystemen mit der Materialflusssimulation unter Einbeziehung des Energieverbrauchs eingesetzt werden können, damit Fertigungssysteme energieeffizienter die geforderten Ausbringungsmengen herstellen können.

## 2 Engpasstheoretische Grundlagen

Die Engpasstheorie besagt, dass der Durchsatz eines Systems ausschließlich von einem begrenzenden Faktor (dem Engpass) bestimmt wird (Goldratt 1990). Eine Verbesserung kann nur erfolgen, wenn das Gesamtsystem, ausgehend vom begrenzenden Faktor, übergreifend optimiert wird. Nach Goldratt's Theory of Constraints (TOC) (1990) erfolgt diese in fünf Schritten:

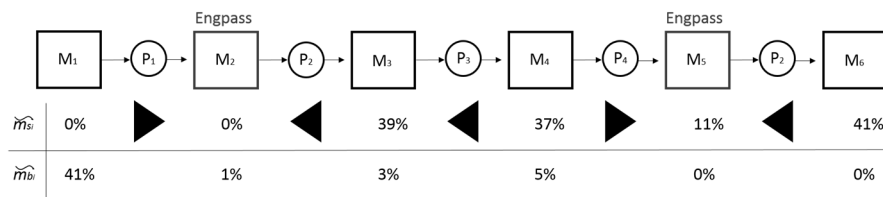
1. Identifizierung des Engpasses
2. Entscheidung über die optimale Verwendung des Engpasses
3. Unterordnung aller weiteren Prozesse unter den in 2. getroffenen Entscheidungen
4. Beseitigung des Engpasses
5. Nach der Beseitigung, starte erneut bei Schritt 1.

Zunächst wird der Engpass im Gesamtsystem identifiziert. Innerhalb von Fertigungssystemen geschieht dies häufig durch die Betrachtung von Beständen und Auslastungen der Maschinen. Anschließend erfolgen mit Fokus auf den Engpass Entscheidungen zur effizienten Nutzung, sodass dieser z. B. von Aufgaben, die nicht unbedingt im Engpass bearbeitet werden müssen, befreit wird. Darauf folgend werden alle übrigen Ressourcen/Prozesse den vorangegangenen Entscheidungen untergeordnet. Beispielsweise werden einem Fertigungssystem nur so viele Teile zugeführt, wie die kapazitätsbeschränkende Maschine abarbeiten kann, sodass die Bestände im System reduziert werden. Erst jetzt soll der Engpass z. B. durch die Anschaffung einer zusätzlichen Maschine behoben werden, da hiermit wesentlich höhere Kosten verbunden sind. Mit der Auflösung dieses Engpasses ist im Gesamtsystem an anderer Stelle zwangsweise nach obiger Deklaration ein neuer entstanden, den es nun beginnend mit Schritt 1 zu beheben gilt. Diese grundsätzlichen Regeln finden nicht nur bei der Überprüfung von Produktionsprogrammen Anwendung, sondern können vielfältig in Marketing, Vertrieb, Handel, Finanzen, Controlling oder Projektmanagement eingesetzt werden.

Damit ist ein Regelkreis zur iterativen, kontinuierlichen Verbesserung der Gesamtsystemleistung gegeben. Die Identifikation des Engpasses lässt die TOC aber offen. Kuo et al. (1996) zeigen auf, dass je nach Definition unterschiedliche Engpässe identifiziert werden können.

## 2.1 Identifizierung durch Blockade und Leerlaufen

Kuo et al. (1996) haben eine Methodik auf Basis der Betriebszustände „Blockiert“ (Blockage) und „Leergelaufen“ (Starvation) zur Engpassidentifikation in starr verketteten Fertigungssystemen, in welchen jede einzelne Maschine (alle mit gleicher Taktzeit) durch einen Puffer entkoppelt ist, entwickelt. Es werden Pfeile an allen Puffern entlang des Fertigungssystems in diejenige Richtung gesetzt, in welcher mit höherer Wahrscheinlichkeit ein Engpass auftritt (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Engpassidentifizierung in verketteten Fertigungssystemen mit Pfeilregeln (in Anlehnung an Kuo et al. 1996)

Diese Engpassidentifikatoren werden durch folgende Regeln gesetzt:

- Ist die Wahrscheinlichkeit der Blockade von Maschine  $m_i$  größer, als dass Maschine  $m_{i+1}$  leerrläuft, dann wird der Pfeil flussabwärts (nach rechts) gesetzt.
- Ist dagegen die Wahrscheinlichkeit des Leerlaufens von Maschine  $m_i$  größer als die Blockade von Maschine  $m_{i+1}$ , so wird der Pfeil flussaufwärts (nach links) gesetzt.

Eine Maschine wird als Engpass identifiziert, wenn beide angrenzenden Pfeile von beiden Seiten auf diese gerichtet sind (oder nur eine Seite für die erste und letzte Maschine). Mit dieser Methodik können entgegen der klassischen Engpasstheorie mehrere Engpässe gleichzeitig im Gesamtsystem auftauchen. Dabei hat derjenige Engpass den größten Schweregrad, der bei marginalen Produktionsratenänderungen den größten Einfluss auf die Gesamtproduktionsrate hat.

## 2.2 Bottleneck-Walk

Lorentzen (2012) und Roser (2015) benutzen ebenso Pfeile als Identifikatoren im sogenannten „Bottleneck-Walk“ zur Engpassidentifizierung. Dabei werden die Betriebszustände der Maschinen sowie die Pufferbestände in bestimmten zeitlichen Abständen während eines Rundgangs entlang der Fertigungslinie gesammelt (Abb. 2). An den Maschinen werden die Pfeile durch die Betriebszustände „Einlauf Leer“ und „Auslauf belegt“ gesetzt. Sie zeigen flussaufwärts, wenn nicht genügend Teile vorhanden sind und ein vorgelagerter Prozess dafür die Ursache ist. Dementsprechend zeigen Pfeile flussabwärts, wenn aufgrund nachfolgender Prozesse die Maschine blockiert ist. In den Zuständen „Gestört (Breakdown)“ und „Arbeitend (Processing)“ kann keine Aussage getroffen werden. Die Pfeile an den Puffern werden entsprechend ihrer Füllstände ausgerichtet. Die Grenzen für die Pfeilrichtung können dabei nach absoluten oder prozentualen Füllständen gesetzt werden.

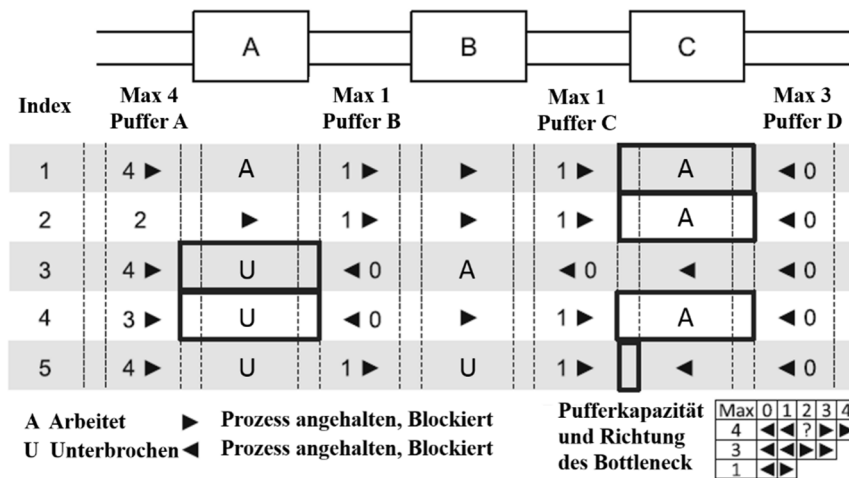


Abbildung 2: Bottleneck-Walk für ein Fertigungssystem

Ersteres bietet sich vor allem bei sehr kleinen Puffermaximalkapazitäten an. Es erfolgt nach oben und unten eine gleichmäßige Festlegung (z. B. Füllstand < 30 % oder > 70 %). Zeitlich treten Engpässe an verschiedenen Stellen im System auf. Über eine Analyse der Frequenz, mit welcher Häufigkeit Engpässe wo auftreten, können die kritischen Systembestandteile festgestellt und eine Priorisierung zur Behebung aufgestellt werden. Dabei helfen die gesammelten Betriebszustände, die Gründe für den Engpass zu bestimmen.

### 3 Energieorientierte Materialflusssimulation

Durch die einleitend aufgeführten Treiber sind Materialflusssimulationswerkzeuge in den letzten Jahren durch verschiedene Ansätze so weiterentwickelt worden, dass heute zuverlässige Energieprognosen für den Betrieb von Produktionssystemen gemacht werden können. Ein erster Ansatz erfolgte von Junge (2007), der verschiedene Systeme zur Stoff- und Energieflusssimulation von Maschinen mit der Materialflusssimulation durch eine Onlinekopplung kombinierte. Die Materialflusssimulation einer Produktion wird mit der thermischen Gebäudesimulation sowie eines dritten Simulators zur Berechnung der elektrischen Verbräuche gekoppelt, um eine energieeffizientere Produktionssteuerung und Prognose des Energiebedarfes der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zu ermöglichen. Dabei erfolgte die Berücksichtigung der Außen- und Hallentemperatur, der Lüftungsrate sowie der jeweiligen Schadstoffkonzentration in der Hallenluft. Thiede (2012) verfolgt ein ähnliches Ziel, indem er am Beispiel der Druckluftversorgung mehrere Simulationssysteme miteinander verbindet. In der Forschungsarbeit von Schacht (2014) wird der Einsatz der Energiesimulation im Planungsprozess des Karosserierohbaus beschrieben. Er koppelt dabei nicht mehrere verschiedene Simulationswerkzeuge, sondern integriert in eine bestehende Materialflusssimulationssoftware die Möglichkeit, Energieverbräuche von Maschinen und Anlagen abzubilden. Die Arbeit befasst sich hauptsächlich mit dem elektrischen Bedarf von Industrierobotern mit dem Ziel, die TGA besser dimensionieren zu können. Wolff et al. (2013) analysieren die Druckluft anhand der

Zylinderkopffertigung in einem Komponentenwerk der Automobilindustrie, ebenfalls integriert innerhalb eines Simulationssystems. Diese wenigen beispielhaft aufgeführten Forschungsarbeiten zeigen ein breites Spektrum an Möglichkeiten, Energieaspekte auf unterschiedliche Art und Weise mit der Materialflusssimulation zu kombinieren. Zu allen wichtigen produktionstechnischen Energiemedien wie Beleuchtung, Druckluft, Prozesswärme, Klima- und Lüftungstechnik sowie elektrischer Energie können zunehmend mehr Anwendungen gefunden werden. Der Fokus liegt hierbei auf der elektrischen Energie. Im Betrachtungsrahmen der elektrischen Energie kann grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Zielen beim Einsatz einer energieorientierten Materialflusssimulation nach Keller und Reinhart (2016) differenziert werden. Eine energieflexible Produktion zeichnet sich daraus aus, die benötigte Energie zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen. Ziel ist es durch organisatorische Maßnahmen oder technisch angepasster Systeme einzelne Produktionsprozesse aufgrund ihres prognostizierten Energieverbrauchs so anzustoßen, dass der gesamte Lastgang der Fabrik optimiert bzw. geglättet wird (Liebl et al. 2015). Auf der anderen Seite steht die Einsparung von Energie durch Effizienzmaßnahmen. Durch den optimierten Einsatz wird pro Produkt weniger Energie zur Herstellung benötigt. Die energieorientierte Materialflusssimulation kommt dabei während der Planung als auch zur Optimierung des Betriebes zum Einsatz. Als Vorreiter ist die Automobilindustrie zu nennen. Inzwischen setzt eine Vielzahl an Branchen die Materialflusssimulation zur Energieprognose ein. Wenzel et al. (2013) zeigen auf, wie eine ganzheitliche, durchgängig simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Automobilindustrie möglich ist.

#### **4 Methodik zur energieorientierten Betrachtung von Engpässen**

Die Methoden zur Engpassidentifizierung und -beseitigung werden hauptsächlich zur Verbesserung der Produktivität und Flexibilität unter dem klassischen Zielgrößendreieck Kosten, Zeit und Qualität zur Ausbringung einer bestimmten Produktionsmenge eingesetzt. Der Faktor Energie spielte hierbei bisher kaum eine Rolle. Die Ablaufsimulation ist ein Standardwerkzeug der Digitalen Fabrik und essentieller Bestandteil, um Kapazitäten und Bedarfe von Produktionen zu planen und zu prognostizieren. Mit ihr werden Anlagen optimiert und ausgetaktet und damit (indirekt) dynamisch auftretende Engpässe beseitigt, um geforderte Mengen auszubringen. Kaum eine Analyse/Simulation von Engpässen in Fertigungssystemen berücksichtigt dabei Energiefaktoren. Einen ersten Ansatz zeigen Seewaldt et al. (2017) am Beispiel des Karosserierohbaus auf. Bei Auftreten von Engpässen durch Störungen werden über eine intelligente Steuerung der Pufferbelegung vorangehende oder nachfolgende Stationen bei Eintreten bestimmter Ereignisse in einen energieeffizienteren Zustand (energiesparende Fahrweise, Standby oder Aus) versetzt. Dieses entspricht im Prinzip einer ähnlichen Vorgehensweise, unter Einbeziehung des elektrischen Verbrauches, wie in Abschnitt 2.1 und 2.2 aufgeführt. Jedoch werden keine Pfeile zur Engpassidentifizierung verwendet. In der Arbeit wird gezeigt, dass durch eine minimale Anpassung der maximalen Pufferkapazitäten und dem Einsatz einer energieorientierten Steuerung als Reaktion auf einen Engpass im laufenden Betrieb Energieeinsparungen möglich sind. Aus den Ausführungen kann geschlussfolgert werden, dass allgemeine, nach oben und unten symmetrisch aufgestellte Regeln zum Setzen der Grenzen (vgl.

Abschnitt 2.2) in diesem Praxisbeispiel nicht zu den besten Ergebnissen führen. Für eine energieorientierte Betrachtung müssen mehr Betriebszustände als bisher üblich betrachtet werden, da in diesen unterschiedliche Energie verbraucht wird (Tab. 1). Dabei erfolgt der Bezug nur auf die Betrachtung der elektrischen Energie. Generell können durch geringe Anpassungen und Erweiterungen auch andere Energieformen entsprechend betrachtet werden.

**Tabelle 1:** Energetische Betriebszustände (in Anlehnung an Kohl 2016)

Betriebszustand	Energetischer Lastfall
Arbeitend	Arbeitend
Energiesparend Arbeiten	Mit reduzierter Geschwindigkeit und geringerem Energieverbrauch arbeiten
Rüstend	Rüstend
Betriebsbereit	Wartend/Grundniveau
Blockiert	Blockiert/Grundniveau
Gestört	Gestört/Grundniveau
Standby	Zwischen Grundniveau und Aus
Aus	Aus

#### 4.1 Vorgehensweise

Um mit der Ablaufsimulation Engpässe energieorientiert optimieren zu können, ist ein mehrstufiger Prozess notwendig:

1. Betrachtung des Gesamtsystems und Zusammenfassung der Bereiche und Maschinen zwischen Entkopplungspuffern
2. Ermittlung der Energiedaten
3. Simulationsmodellerstellung
4. Optimierung durch Simulation
  - Energiesparende Arbeitsgeschwindigkeit
  - Anlagenindividuelle Festlegung der Grenzen für die Engpassindikatoren
  - Kapazitätsanpassungen der Puffer (soweit real umsetzbar)

Durch die Erweiterung des Betrachtungsrahmens um Energieaspekte werden die Pfeilregeln vielschichtiger. Deswegen müssen die in Abschnitt 2.1 und 2.2 vorgestellten Identifikationsmethoden so angepasst werden, dass sie nun auch für eine energieorientierte Betrachtung genutzt werden können. Dabei ist es sinnvoll verschiedene Regeln einzuführen, je nachdem ob ein Engpass durch eine Störung hervorgerufen wird oder nicht.

*Bei nicht störungsbehafteten Betrieb:*

- Ist der aktuelle Bestand eines Puffers größer als ein vorher festgelegter Mindestbestand, so wird ein Pfeil flussaufwärts gesetzt.
- Fällt der Bestand unter ein bestimmtes Maß, so wird der Pfeil flussabwärts gesetzt.
- Bei einem Pufferbestand zwischen diesen beiden Grenzen kann keine Aussage getroffen werden.

Zeigen zwei Pfeile von beiden Richtungen auf einen Bereich, so wird dieser in den langsameren, energiesparenden Arbeitsmodus gesetzt, denn er würde bei voller Geschwindigkeit Gefahr laufen, den nachfolgenden Puffer komplett zu füllen und den vorgeschalteten leerlaufen zu lassen. Für den letzten und ersten Bereich einer Anlage erfolgt die Schaltung entsprechend der Stellung des einen angrenzenden Pfeiles. *Bei Auftreten einer Störung*: Ist der nachgeschaltete Bereich eines Puffers gestört, werden in beide Richtungen gegenüber dem nicht störungsbehafteten Betrieb priorisierende Pfeile gesetzt und die nachfolgenden und vorangeleragerten Bereiche in den energiesparenden Arbeitsmodus versetzt. Damit ist gewährleistet, dass die Anlage auf möglichst energieeffiziente Weise vor der Blockade und dahinter bis zum Leerlaufen arbeitet. Sobald diese geschehen ist, werden die Anlagen in Standby versetzt und bei Behebung der Störung zeitlich passend wieder hochgefahren.

## 4.2 Analyse des Systems

In modernen Fertigungssystemen (z. B. im Karosserierohbau) sind nicht alle einzelnen Maschinen, wie von Kuo et al. (1996) (vgl. Abschnitt 2.1) gefordert, jeweils durch Entkopplungspuffer getrennt. Stattdessen sind sie in einzelnen Bereichen gegliedert und agieren z. B. als eine Einheit in einem Schutzkreis. Um Pfeile als Engpassidentifikatoren anwenden zu können, müssen deshalb Maschinen und/oder Bereiche zwischen den Entkopplungspuffern zusammengefasst werden, sodass übergreifend ein wertschöpfendes Netzwerk von direkt aufeinanderfolgenden Puffern und Maschinen/Bereichen entsteht. Dieses kann im Simulationsmodell durch die Benutzung von Unternetzwerken erfolgen, sodass im Detail jede einzelne Maschine weiterhin abgebildet ist, jedoch im Hauptnetzwerk des betrachteten Systems die geforderte Struktur für die Benutzung von Pfeilregeln vorhanden ist (vgl. hierzu auch die Ausführungen zu einer hierarchischen Modellstruktur von Kohl 2016).

## 4.3 Bestimmung der Energieverbräuche in den Betriebszuständen

Über jeder Energieeffizienzmaßnahme steht die geforderte Qualität des Produktes. Ist es technisch nicht möglich, langsamer und energiesparender alle prozesstechnischen Ansprüche zu erfüllen, so darf dieser Anlagenteil nicht energiesparend produzieren. Stattdessen wird normal produziert und anschließend betriebsbereit gewartet, während andere Maschinen im Energiesparmodus arbeiten. Viele Einzelbestandteile von Fertigungssystemen arbeiten zudem nicht die volle Zeit. Hier muss individuell der Energiesparmodus festgelegt werden. Eine besondere Schwierigkeit stellt momentan weiterhin die zuverlässige Datenbasis von Energieverbräuchen der Maschinen dar. Verschiedene Varianten und Fertigungsschritte lassen selbst auf gleichen Maschinen individuelle Lastkurven entstehen. Auch in anderen Simulationswerkzeugen werden Energieprognosen für Maschinen mit eingebunden. So können für aktuelle Industrieroboter genaue Energieprognosen für verschiedene Beschleunigungen, Verfahrensgeschwindigkeiten und Bahnkurven simulativ ermittelt werden (Quelle). Damit können aufwendige reale Messungen, die bei Planungen von Anlagen noch gar nicht vorliegen können und deshalb auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden muss, vermieden werden können.

#### 4.4 Simulationsmodellerstellung

Allgemeine Vorgehensweisen und Techniken bei der Modellerstellung sind nicht Hauptbestandteil dieses Beitrags. Auf vertiefende Informationen sei hierzu insbesondere auf Schacht (2014) verwiesen. Die Pfeile sollten auch visuell in das Simulationsmodell integriert werden. Für den Anwender wird somit die Transparenz dieser Methodik erhöht sowie deren Nutzeneffekte besser deutlich gemacht. Für die Optimierung des Simulationsprozesses selbst ist es wichtig, über passende Schnittstellen die Energieverbräuche einzelner Maschinen aus anderen Simulationswerkzeugen oder realen Messungen direkt in die Ablaufsimulation z. B. über Datenbanken einzubinden, sodass der Anwender hierfür neben der eigentlichen Modellerstellung keinen Mehraufwand betreiben muss.

#### 4.5 Energieorientierte Engpassoptimierung

Es stehen grundsätzlich unterschiedliche Parameter zur energieorientierten Engpassoptimierung zur Verfügung:

- Festlegung der Arbeitsgeschwindigkeit im Energiesparmodus
- Grenzen für die Regeln zum Setzen der Pfeile
- Anpassung der maximalen Pufferkapazitäten

Diese Freiheitsgrade haben gegenseitig direkten Einfluss aufeinander und beeinflussen aus der Kombination ihrer Einzelausprägungen in Gesamtheit das Ergebnis. Sie können deswegen nicht einzeln voneinander getrennt betrachtet werden. Damit entsteht aus den geforderten Rahmenbedingungen und den technischen Möglichkeiten ein Minimierungsproblem:

*„Finde diejenige optimale Kombination aus Arbeitsgeschwindigkeit im Energiesparmodus, Regeln für die Engpassidentifikatoren und den maximalen Pufferkapazitäten, sodass die verlangte Ausbringungsmenge mit minimalem Energieverbrauch hergestellt werden kann.“*

Um den Aufwand zur Feststellung der optimalen Kombination zu verringern, sollten in Voruntersuchungen Schranken für den Betrachtungsrahmen der energiesparenden Arbeitsgeschwindigkeit und den möglichen maximalen Pufferkapazitäten festgelegt werden. Bei der Analyse von bereits real gebauten Anlagen wird in der Regel eine Änderung der Pufferkapazitäten ausgeschlossen, da diese Umbaumaßnahmen nur mit einem hohen Aufwand, die in keinem Verhältnis zur Energieeinsparung stehen, möglich sind. Des Weiteren unterliegen sie technischen und wirtschaftlichen Maximalgrößen. Durch die simulative Absicherung der Austaktung einer Anlage ohne Berücksichtigung von Energieverbräuchen kann die untere Schranke zur Dimensionierung der maximalen Pufferkapazität vorab festgelegt werden. Entsprechend kann die obere Schranke durch technische und wirtschaftliche Gegebenheiten ebenfalls festgelegt werden. Insgesamt kommt damit immer noch eine Vielzahl an möglichen Lösungsvorschlägen zustande. Hier bieten aktuelle Materialflusssimulationswerkzeuge wie Plant Simulation die Option, durch den Einsatz von genetischen Algorithmen eine gute Lösung zu finden. Als Fitnesswert kann der Energieverbrauch alleine oder gewichtet mit der Summe an Pufferkapazitäten benutzt werden.



## 5 Anwendungsfall

Die vorgestellte Vorgehensweise wird im Folgenden anhand eines repräsentativen Teilbereichs des Karosserierohbaus in der Automobilbranche vertiefend dargestellt. Dieser besteht aus ca. 70 fertigungstechnischen Einzelsystemen von Industrierobotern zum Schweißen und Transportieren von Teilen, Klebeeinheiten sowie Falzstationen. Diese sind in fünf Bereichen getrennt, die über vier Entkopplungspuffer mit einer Kapazität von sechs Einheiten getrennt sind. Durch Voruntersuchungen kann für die Bereiche eine sinnvolle Untergrenze von 80 % der normalen Geschwindigkeit für eine energiesparende Arbeitsweise ermittelt werden. Damit ergibt sich bei einer Austaktung von 60 s eine Taktzeit im Energiesparmodus von maximal 75 s. Untersucht wird in der Simulation die Erhöhung der Taktzeit im Sparmodus in Schritten von 1 s. Die aus technischer Sicht maximale Größe eines Puffers beträgt 10 Einheiten. Gefordert wird eine durchschnittliche Ausbringungsmenge von 52 Teilen pro Stunde, die ohne Energiesparmaßnahmen erbracht wird. Die Grenzen der Pfeilregeln werden ebenfalls in Schritten von 1 untersucht. Ergebnisse verschiedener Optimierungsmöglichkeiten zeigt Tabelle 2.

*Tabelle 2: Simulationsergebnisse*

Szenario	Pufferkapazitäten	Pfeile (Min/Max)	Takt Sparmodus	Output/h	Energiebedarf pro Teil
1	6	-	-	52,04	100 %
2	6	1/2	75s	50,01	97,1 %
3	10	-	-	54,01	98,9 %
4	7	2/4	71s	52,06	96,1 %
5	10/9/10/10	2/7	75s	53,69	93,9 %

Die Ausgangsergebnisse ohne Energieoptimierungen sind in der ersten Zeile dargestellt. Es konnte bei gleichbleibenden maximalen Pufferkapazitäten keine Lösung gefunden werden, die die geforderte Ausbringungsmenge erbringt, gefunden werden. Die Energiesparmaßnahmen zeigen immer eine Reduzierung der Gesamtausbringungsmenge in diesem Beispiel (Szenario 2). Eine Erhöhung der Pufferkapazitäten ist unumgänglich. Szenario 4 zeigt eine gefundene Parameterkombination, die bei einer schon kleinen Erhöhung von 6 auf 7 Pufferplätzen die gleiche Ausbringungsmenge fertigt und dabei ca. 4 % weniger Energie verbraucht. Die beste gefundene Lösung mit dem genetischen Algorithmus ist in der letzten Zeile aufgeführt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass mit der vorgestellten Methodik die auf Energieaspekte angepassten, engpasstheoretischen Ansätze sinnvoll in der Materialflusssimulation eingesetzt werden können, um Fertigungssysteme planen und optimieren zu können. Am Praxisbeispiel wird aufgezeigt, dass mit den neuen Regeln zur energieorientierten Engpassidentifizierung Einsparpotenziale gefunden werden können. Dies hat jedoch Konsequenzen auf die Dimensionierung von Entkopplungspuffern.

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen sind weitere Untersuchungen zur energieorientierten Identifizierung von Engpässen angestrebt. Zum einen gibt es noch weitere, bisher nicht betrachtete Methoden zur Identifizierung von Engpässen. Diese sollten auf ihre Tauglichkeit zum Einsatz in der beschriebenen Methodik analysiert werden. Zum anderen bietet sich die Vorgehensweise nicht nur für die Untersuchung von starr verketteten Fertigungssystemen an, sondern kann auch auf andere Systeme wie z. B. flexible Fertigungssysteme mit Verzweigungen oder Rückläufen im Fertigungsprozess angewendet werden.

## Literaturverzeichnis

- Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele - Eine Basis für Industrie 4.0. Berlin: Springer 2017 (im Druck).
- Goldratt, E.M.: What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented? Croton-on-Hudson, N.Y: North River Press 1990.
- Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel: Kassel Univ. Press 2007.
- Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244-249.
- Kohl, J.: Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. Dissertation, 2016.
- Kuo, C.-T.; Lim, J.-T.; Meerkov, S.M.: Bottlenecks in serial production lines: A system-theoretic approach. *Mathematical Problems in Engineering* (1996) 3, S. 233-276.
- Liebl, C.; Popp, R.; Zäh, F.: Energieflexibilität von Produktionsanlagen. *wt Werkstatttechnik Online* 105 (2015) 3, S. 136-140.
- Lorentzen, K.A.: Systematische Variabilitätsreduktion zur kontinuierlichen Verbesserung von Fließlinien. Aachen: Shaker 2012.
- Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.
- Pöge, C.; Mayer, C.: Quo vadis Ablaufsimulation - Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn: W.V. Westfalia Druck GmbH 2013, S. 11-20.
- Roser, C.; Lorentzen, K.; Deuse, J.: Reliable shop floor bottleneck detection for flow lines through process and inventory observations. *Logistics Research* 8 (2015) 1, S. 443.
- Schacht, M.: Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung. Aachen: Shaker 2014.
- Seewaldt, M.; Nagel, J.; Bracht, U.; Geckler, D.: Energy-oriented material flow simulation as a contribution to automotive industry 4.0 (accepted 25.06.2017). Erscheint in: *Simulation News Europe* 27 (2017) 2.
- Thiede, S.: *Energy efficiency in manufacturing systems*. Berlin: Springer 2012.
- Wenzel, S.; Junge, M.; Pöge, C.; Spieckermann, S.: Energieeffizienz in der Automobilindustrie - Ganzheitliche simulationsgestützte Planung und Bewertung. *Productivity Management* 18 (2013) 4, S. 21-24.
- Wolff, D.; Kulus, D.; Nagel, J.: Simulationsgestützte Bewertung von Energiesparstrategien. *ZWF* 108 (2013) 3, S. 103-108.