

# **Berücksichtigung elektrischer Lastspitzen in der ereignisdiskreten Simulation eines Materialflusssysteme**

## ***Consideration of Electrical Demand Peaks in the Discrete Event Simulation of a Material Handling System***

Karsten Turek, Armin Siegel, Thorsten Schmidt, TU Dresden, Dresden (Germany),  
karsten.turek@tu-dresden.de, armin.siegel@tu-dresden.de,  
thorsten.schmidt@tu-dresden.de

**Abstract:** In addition to minimizing the requirement of electrical energy, reducing power peaks on the demand side poses a challenge. This paper describes the determination of intralogistics components power curve in a discrete event material flow simulation. Two approaches for modelling the power demand during simulation are presented and compared. Subsequently, a method for quantifying power peaks is developed and applied in a simulation study of a high-bay warehouse. Furthermore, a start delay heuristic as a control approach for reduction of power peaks is introduced and investigated its effect on the transport performance.

## **1 Einführung**

Die Betrachtung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz fand in den letzten zwei Jahrzehnten Eingang in die Planung, Gestaltung und Steuerung technischer Systeme und Prozesse. Neben den monetären Aspekten der Energieeinsparung tragen aufgrund gesetzlicher Auflagen verstärkte Bestrebungen der Industrie zum Umwelt- und Klimaschutz zu dieser Entwicklung bei. Dementsprechend wurden seit Mitte der 2000er Jahre auch in der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen die Energie- und Umweltaspekte stärker betrachtet, wie Wenzel et al. (2018) in ihrer Publikationsanalyse belegen. Die Simulation als etabliertes Werkzeug zur Analyse und Bewertung wurde mit verschiedenen Ansätzen und Methoden um diese neuen Aspekte erweitert.

In deutlich untergeordneter Beachtung stehen der Zeitverlauf des Leistungsbedarfs und die Analyse der elektrischen Lastspitzen. Eine verstärkte Betrachtung dieser Systemgröße ist durch folgende Aspekte motiviert.

Regenerative Energiequellen, wie Wind und Sonne, liefern technologiebedingt ein volatiles Energieangebot. Die asynchronen Schwankungen von Energieangebot und -nachfrage müssen aufwendig ausgeglichen werden. Netzbetreiber sind daher

bestrebt, die Verbraucherseite zu Lastverschiebung und Lastglättung zu animieren. Durch den Einsatz von Energiespeichern kann eine Kompensation kurzzeitiger Spitzenbelastung erreicht werden. Die Planung dafür geeigneter Speichersysteme erfordert Kenntnisse über die auftretenden Leistungsspitzen im Verbrauchersystem. Eine weitere Motivation ergibt sich aus der Dimensionierung der elektrischen Versorgungssysteme (z. B. Transformatoren, Schutzschalter), die sich nach den regulär auftretenden maximalen Belastungen im elektrischen Teilnetz richtet (vgl. Kiefer 2006). Fehlende Methoden zur Prognose der Belastungsspitzen führen deshalb in Praxis zu einer sehr großzügigen Auslegung der Versorgungssysteme. Diese Überdimensionierung bindet unnötig Ressourcen (Hahn-Woernle 2018).

In diesem Beitrag wird die Analyse des elektrischen Leistungsbedarfs von Materialflusssystemen im Rahmen einer ereignisdiskreten Simulation betrachtet. Die Integration in die Materialflusssimulation erfolgt mit dem Ziel, die elektrischen Leistungsspitzen im Systembetrieb zu bestimmen und zu beeinflussen.

## 2 Wissenschaftliche Einordnung

Die Betrachtung energiebezogener Aspekte in der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen berührt die folgenden zwei Themenkreise:

1. die Abbildung energetischer Zusammenhänge in Modellen,
2. die Einbindung energetischer Modelle in die ereignisdiskrete Simulation.

In der Intralogistik ist die elektrische Energie der entscheidende Energieträger, deshalb betrachtet dieser Beitrag ausschließlich diese Energieform.

### 2.1 Leistungsbedarf von RBG

In der Energiebetrachtung von Materialflusstechnik finden Regalbediengeräte (RBG) eine besondere Beachtung. Diese Geräte weisen aufgrund ihrer Bau- und Betriebsweise einen hohen Energiebedarf pro Transport als auch ausgeprägte Leistungsspitzen im Anfahren auf. RBG bedienen horizontal und vertikal nebeneinander angeordnete Lagerplätze in einer Lagergasse. Die Antriebe von Fahrwerk (horizontale Bewegung) und Hubwerk (vertikale Bewegung) arbeiten gleichzeitig. Komplette industrielle Lagersysteme bestehen typischerweise aus mehreren Gassen mit gleichzeitig arbeitenden RBG.

Mehrere Arbeiten, wie Siegel et al. (2013), Ertl (2016) als auch Braun (2016), untersuchen die Einflussfaktoren auf den Energiebedarf von RBG. Der Schwerpunkt in diesen Arbeiten liegt auf der Entwicklung und Validierung parametrischer Berechnungsmodelle für den Energiebedarf. Diese Arbeiten haben das Ziel, bei unterschiedlichen Systemkonfigurationen den Energiebedarf eines Lagersystems zu bestimmen bzw. die energiegünstigste Fahrtrajektorie für einen Lasttransport vorab in der Fahrsteuerung auszuwählen. Neben der Bestimmung des Energiebedarfs erlauben die Modelle dieser Art auch die Identifikation der Leistungsspitzen.

Hahn-Woernle (2018) betrachtet, aufbauend auf der Arbeit von Ertl (2016), die Begrenzung des Systemleistungsbedarfs durch Startverschiebung bei einzelnen Transportaufträgen. In der Arbeit werden Lagersysteme für Paletten und für Kleinbehälter als Simulationsmodell in Matlab/Simulink abgebildet. Die Stärken des Modells liegen in der detaillierten Abbildung des Leistungsbedarfs und der Bewegungsgleichungen. Der Ansatz der Arbeit ist auf Lagersysteme begrenzt, die

Verbindung mit weiterer Fördertechnik nicht vorgesehen, und ist daher für eine Simulation des Zusammenspiels beliebiger Intralogistikelemente nicht geeignet.

Windmann et al. (2018) formulieren die energieeffiziente Ansteuerung von elektrischen Antrieben in der Fördertechnik als Optimierungsproblem. Die Methode basiert auf genauen Modellen zum Leistungsbedarf der elektrischen Antriebe. Weiterhin wird die gemeinsame Optimierung von zwei Förderer-Antrieben in einem gemeinsamen Zwischenkreis untersucht, um damit Lastspitzen und Rückspeisungen in das Versorgungsnetz zu reduzieren. Die Ausweitung auf mehrere Antriebe und auf weitere Fördertechnik wird im Fazit als weiteres Forschungsgebiet benannt.

Cardenas et al. (2009) untersuchen die Reduzierung des Leistungsmaximums durch eine Verschiebung der Startzeiten der Antriebe für zwei RBG. Der Leistungsbedarf eines Antriebs wird durch 5 Leistungspunkte angenähert. Ein genetischer Algorithmus bestimmt optimale Startzeitpunkte. Eine weiterführende Analyse im Rahmen einer Materialflusssimulation erfolgt nicht.

## 2.2 Energiesimulation

Die Abbildung der energetischen Zusammenhänge von Anlagen und Prozessen kann hinsichtlich ihrer Komplexität unterschieden werden in eine Modellierung durch

- a. konstante Leistungsbedarfe in diskreten Zeitabschnitten, zugeordnet zu Anlagenzuständen oder Prozessabschnitten,
- b. kontinuierlich veränderliche Leistungsbedarfe, aus physikalischen Modellen oder Messreihen abgeleitet.

Die Modellierung mit phasenweise konstanten Leistungsbedarfen erlaubt eine einfache Einbindung in die ereignisdiskrete Simulation, wenn die Abschnittswchsel durch Ereignisse in der Simulation abgebildet werden können. Die Variante a) findet deshalb häufige Anwendung in Simulationsstudien, wie Roemer und Strassburger (2016) in ihrem Überblick bestätigen. Für eine Kalkulation des Energiebedarfs im Rahmen einer Simulationsstudie bietet nach Römer et al. (2018) diese Variante eine ausreichende Genauigkeit, jedoch nicht für eine Analyse der Leistungsspitzen.

Die Verwendung kontinuierlich veränderlicher Leistungsbedarfe im Modell bietet höhere Genauigkeit in der Abbildung elektrischer Leistungsspitzen, verursacht aber auch höheren Aufwand in der Modellerstellung und Validierung.

Die Anwendung der Variante b) erfordert eine Verknüpfung der ereignisorientierten Simulation mit der zeitkontinuierlichen Abbildung des Leistungsbedarfs. Dafür bieten sich drei grundsätzliche Vorgehensweisen an (vgl. Herrmann et al. 2011):

1. Simulation mit einer nachgelagerten Energiebetrachtung mit externem Tool,
2. Dynamische Kopplung der Simulation mit einer parallelen Energiebetrachtung in einem externen Tool (Peter und Wenzel 2015),
3. Integration der Energiebetrachtung und der Simulation in einer einheitlichen Applikation (Stoldt et al. 2016; Schmidt und Pawletta 2014).

Die nachgelagerte Energiebetrachtung ist für eine statische Systemanalyse ausreichend, erlaubt aber keine dynamische Beeinflussung des Simulationsablaufs, kann demnach keine Strategien zur Lastspitzenreduzierung abbilden.

Die Kombination verschiedener Tools bietet einen Vorteil durch die Nutzung problemspezifischer Modellierungsdomänen. Eine dynamische Wechselwirkung ist

möglich. Der zusätzliche Aufwand für die Kopplung der Tools und einer Synchronisation im Simulationsablauf wirkt zum Nachteil dieser Variante.

Die Integration der Energiebetrachtung und der Simulation in einer einheitlichen Applikation umgeht die Nachteile der vorigen Varianten, wobei Garwood et al. (2016, S. 903) in ihrer Auswertung hervorheben, dass die Verknüpfung eine erhebliche Herausforderung darstellt. In diesem Beitrag wird eine Variante für diese integrative Vorgehensweise beschrieben.

### 3 Simulationsmodell

Das im Beitrag verwendete Simulationsmodell bildet ein Paletten-Hochregallager ab und wurde mit dem Simulationssystem AutoMod erstellt. Einlagerung und Auslagerung der Paletten in das Lager erfolgen unabhängig voneinander. Eine mittlere Anzahl Paletten pro Stunde wird als Zielwert pro Lagergasse vorgegeben. Das Lagerfach wird gleichverteilt zufällig aus den Fächern einer Gasse gewählt. Eine Fachbelegung wird nicht berücksichtigt.

Die RBG besitzen eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 3,0 m/s bei einer Beschleunigung von 0,5 m/s<sup>2</sup> und eine maximale Hubgeschwindigkeit von 1,0 m/s bei einer Beschleunigung von 1,0 m/s<sup>2</sup>.

#### 3.1 Zustandsbasiertes Leistungsmodell Regalbediengerät

Das Simulationsmodell der RBG wurde um zustandsbasierte, konstante Leistungsbedarfe nach 2.2 Variante a) erweitert. In einer Konfigurationsdatei werden definierten Bewegungszuständen konstante Leistungsbedarfe zugeordnet (Tabelle 1).

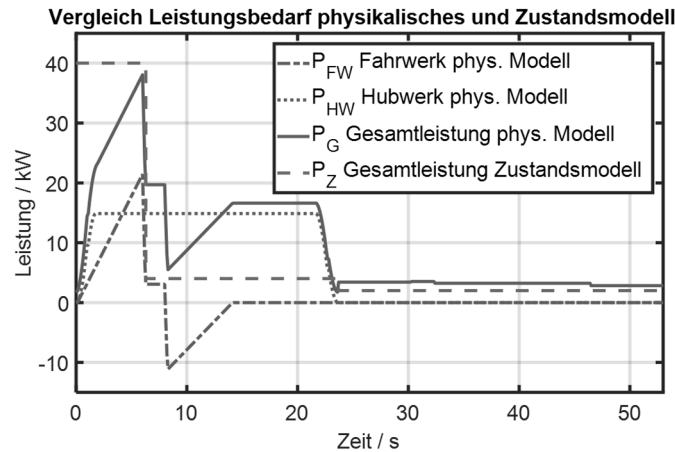
*Tabelle 1: Leistungsbedarfe der Bewegungszustände des RBG*

Status	Leistung in kW	Zeitdauer
Stillstand	1,0	--
Lastaufnahme	2,0	30 s
Anfahren Fahrwerk	24,0	(max.) 6 s
Fahrt Fahrwerk	4,0	--
Heben Hubwerk	16,0	(max.) 6 s
Senken Hubwerk	-12,0	(max.) 6 s

Das Ende der Anfahrphase des RBG bei einem Transportvorgang ist im Simulationssystem AutoMod nicht mit einem auswertbaren Ereignis hinterlegt. Auf die Kalkulation der spezifischen Anfahrdauer für jede Fahrt wurde zur Vereinfachung der Modellierung verzichtet. Die Dauer der Anfahrphase wird mit konstant 6 Sekunden abgebildet, abgeleitet aus Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrwerks (vgl. Abb. 1). Der Leistungsbedarf des Hubwerks richtet sich nach der Bewegungsrichtung und wird ebenfalls mit dieser Zeitdauer kalkuliert.

### 3.2 Physikalisches Leistungsmodell Regalbediengerät

Dem zuvor beschriebenen Ansatz mit konstanten Leistungsbedarfen wird die Variante b) aus Abschnitt 2.2 mit kontinuierlich veränderlichen Leistungsbedarfen gegenübergestellt. Diese Variante erlaubt eine detaillierte Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Leistungsbedarfs der RBG und damit der Leistungsspitzen (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Vergleich Zustandsmodell und physikalisches Modell

Das physikalische Modell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs wurde bereits ausführlich u. a. in Siegel et al. (2018) beschrieben und ist mit den Ansätzen in Ertl (2016) als auch Braun (2016) vergleichbar. Für RBG wurde ein kinematisches Bewegungsmodell für das Fahrwerk und das Hubwerk aufgestellt. Durch die Einbeziehung eines konstanten Rucks in die Bewegungsgleichungen entsteht ein 7-phasiges Bewegungsmodell. Die Zeitverläufe der weiteren Bewegungsgrößen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg ergeben sich dementsprechend durch Integration. Aus dem Verlauf der Bewegungsgrößen wird unter Berücksichtigung der bewegten Masse die notwendige mechanische Leistung bestimmt.

In die weitere Kalkulation fließen die mechanischen Verluste, z. B. der Fahrwiderstand der Rad-Schiene-Kombination, und die elektrischen Verluste, z. B. im Frequenzumrichter, der Energieübertragung ein. Aus der Überlagerung der Bewegung und einer elektrischen Grundverlustleistung ergibt sich der Leistungsbedarf für den kompletten Bewegungsablauf. Der Leistungsbedarf des Lastaufnahmemittels ist erheblich geringer und wurde deshalb vereinfacht mit phasenweise konstanten Leistungswerten abgebildet. Das physikalische Modell wurde über eine Leistungsmessung an einem realen RBG kalibriert und validiert. Unterschiedliche RBG erfordern spezifisch zu bestimmende Parametersätze.

Die Gleichungen des Energie-Bewegungs-Modells wurden in Matlab implementiert und anschließend in eine DLL (Dynamic Link Library) überführt. Die Berechnungs-DLL wurde über die C-Schnittstelle des Simulationssystems AutoMod in das Simulationsmodell des Materialflusssystemes integriert.

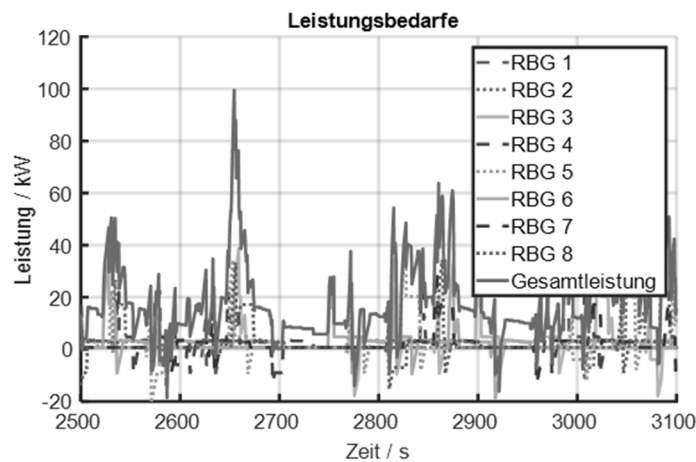
Zusätzlich zur Leistungskalkulation wurde ein Steuerungsansatz zur Verringerung der Leistungsspitzen des Lagersystems implementiert. Da der größte Leistungsbedarf eines RBG im Anfahrvorgang entsteht und die Systemleistungsspitzen durch die zeitliche Überlagerung mehrerer Anfahrvorgänge verursacht werden, können Startverschiebungen der RBG die Leistungsspitzen im Lagersystem reduzieren.

Der zusätzliche Leistungsbedarf einer neuen Fahrt wird zunächst zum aktuell berechneten Systembedarf hinzugerechnet. Bei einer Überschreitung des parametrisierten Maximums von 50 kW wird der Startzeitpunkt der neuen Fahrt im Sekundenraster bis zu einer vorgegebenen maximalen Verzögerung verschoben. Das Leistungsmaximum in jeder Verschiebung wird berechnet. Die Startverschiebung mit dem minimalen Leistungsmaximum wird an das Simulationsmodell übermittelt.

Zu Beginn des Simulationsexperiments wird die Berechnungs-DLL mit den technischen Parametern der RBG initialisiert. Während des Experiments kommuniziert das Simulationsmodell Startzeit, Startort und Zielort der Fahrt über einen Funktionsaufruf an die Berechnungs-DLL. Die Bewegungstrajektorie des RBG wird bestimmt und der zugehörige Leistungsverlauf wird berechnet.

### 3.3 Kalkulationsmodell Leistungsspitzen

Der Leistungsbedarf eines elektrischen Antriebs steigt beim Anfahrvorgang in kurzer Zeit bis zu einem Maximum kurz vor dem Ende der Beschleunigungsphase (vgl. Abb. 1). Aus der Überlagerung der Bewegungen der RBG im Lagersystem entsteht ein stark schwankender Leistungsverlauf mit einer Vielzahl unterschiedlicher lokaler Maxima, wie in Abbildung 2 illustriert.



**Abbildung 2:** Leistungsbedarfe 8 RBG nach physikalischem Modell

Für die Einordnung lokaler Maxima als relevante Leistungsspitzen wird die Auslösecharakteristik eines Leitungsschutzschalters vom Typ *K* verwendet. Leitungsschutzschalter verhindern bei elektrischer Überlastung eine weitere Schädigung der Anlagen durch Leitungsunterbrechung. Standardisierte Kennlinien definieren die Auslösewerte als die maximal zulässige Stromstärke *I* mit Dauer *T* in

Relation zum Bemessungsstrom  $I_0$ . Der Kennlinienverlauf wurde den Darstellungen der Literatur ABB (2011) entnommen, ausgemessen und durch die Funktion in Gleichung 1 approximiert, wobei  $m = 0,476$  und  $n = 0,446$  bestimmt wurden. Elektrische Leistung und Stromstärke können über die konstante Netzspannung von 400 V ineinander umgerechnet werden.

$$T = e^{-\frac{1}{m} \ln\left(\ln\frac{I}{I_0}\right) + \frac{n}{m}}, \text{ mit } T \text{ in s} \quad (1)$$

Die im Simulationsexperiment bestimmten Leistungswerte werden mit dieser Kennlinien-Funktion verglichen. Übersteigen zeitlich aufeinander folgende Leistungswerte und die zugehörige Zeitspanne die zulässige Auslösekennlinie, so wird dieser Abschnitt als relevante Leistungsspitze ausgewiesen. Mit einem Auswerteverfahren werden Anzahl und kumulierte Dauer der Überschreitungen der Kennlinien-Funktion für das Simulationsexperiment ermittelt.

## 4 Experimente und Ergebnisse

Für die in Tabelle 2 dargestellten Experimente (Exp.) wurde ein Simulationsmodell eines Paletten-Hochregallagers mit 8 Gassen, 10 Ebenen und 75 Fächern je Ebene verwendet. Die Experimente wurden über 10 Stunden mit einer exponentialverteilten Transportlast durchgeführt, die über die Parameter „mittlere Einlagerungen pro Stunde“ und „mittlere Auslagerungen pro Stunde“ vorgegeben wurde. Die maximale Transportlast (Max.) wurde erreicht, indem am Ende eines Transports sofort ein neuer Transportauftrag erstellt wird. Mit dem Algorithmus zur Startverschiebung soll die erreichbare Reduzierung der Leistungsspitzen untersucht werden.

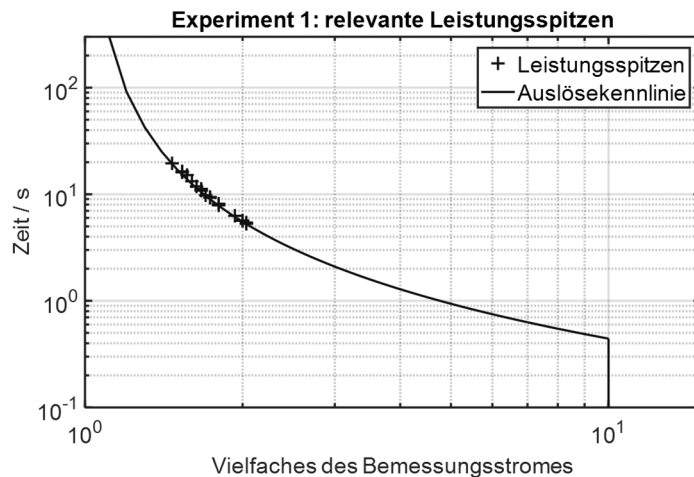
*Tabelle 2: Simulationsexperimente*

Exp.	Ø Einlagerung / Std	Ø Auslagerungen / Std.	Max. Startverzögerung / s
1	80	80	0
2	80	80	12
3	80	80	48
4	Max.	Max.	0
5	Max.	Max.	12
6	Max.	Max.	48

Im Simulationsverlauf wird der Leistungsbedarf des Lagersystems nach den beiden in Abschnitt 3 vorgestellten Varianten berechnet und protokolliert. Gleichzeitig werden die Auslastung der RBG und die Anzahl der Transporte erfasst. Die Transportlast im Experiment 1 entspricht einer Auslastung von ca. 52 %.

Analysiert werden die relevanten Spitzen im Leistungsverlauf nach der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Vorgehensweise bei einem Bemessungsstrom von 25 A. Dies entspricht einer Dreiphasenwechselstrom-Leistung von 30 kW. Die Anzahl der Überschreitungen der referenzierten Auslösekennlinie und ihre kumulierte Dauer

werden bestimmt und die Leistungsbedarfe für das Zustandsmodell und das physikalische Modell gegenübergestellt. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der verwendeten Auslösekennlinie und die Lage der Leistungsspitzen des Experiments 1.



**Abbildung 3:** Relevante Leistungsspitzen in Experiment 1

Außerdem wurden Simulationsexperimente gleicher Transportlast mit unterschiedlicher maximaler Startverzögerung durchgeführt. In den Experimenten 2 und 3 sind aufgrund der Auslastungsreserven kaum Auswirkungen der Startverzögerung auf den Durchsatz zu beobachten. In den Experimenten 5 und 6 mit maximaler Transportlast sinkt der Durchsatz auf 91 % bzw. 71 % gegenüber dem Ausgangsexperiment 4. Die vollständige Vermeidung von Leistungsspitzen im physikalischen Modell wird in Experiment 3 und 6 erreicht. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 3:** Simulationsergebnisse für 10 Stunden

Exp.	Ø Durchsatz / Std.	Zustandsmodell		Physikalisches Modell	
		Anzahl Über- schreitungen	kumulierte Dauer / s	Anzahl Über- schreitungen	kumulierte Dauer / s
1	162	140	1106	19	198
2	162	89	813	6	84
3	161	44	338	0	0
4	324	599	4944	147	1639
5	297	358	3246	46	613
6	229	157	1328	0	0

Das Zustandsmodell weist in allen Experimenten einen größeren Umfang identifizierter Leistungsspitzen auf, da der Leistungsbedarf des Anfahrvorgangs mit



konstant 24 kW über 6 Sekunden deutlich über den Werten des physikalischen Modells liegt (vgl. Abb. 1). Die Überlagerung hoher Leistungswerte ist deshalb deutlich wahrscheinlicher. Das Zustandsmodell bietet eine einfache Integration in ein Simulationsmodell, wenn ein detailliertes physikalisches Modell nicht vorhanden ist, liefert aber eine pessimistische Abschätzung der Leistungsspitzen. Die Auswirkung einer Steuerung zur Vermeidung von Leistungsspitzen auf die verbleibende Transportleistung im Materialflusssystem wird damit überschätzt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde die Betrachtung elektrischer Leistungsspitzen im Betrieb von Materialflusssystemen im Rahmen einer Materialflusssimulation dargestellt.

Die Identifikation der Leistungsspitzen basiert auf einer Bestimmung des Leistungsbedarfs der Transportvorgänge und ihrer zeitlichen Überlagerung. Zwei Ansätze für die Modellierung des Leistungsbedarfs im Rahmen der ereignisdiskreten Simulation werden vorgestellt und ihre Integration in das Simulationsmodell eines Hochregallagers wird beschrieben. Zum einen wird der Leistungsbedarf mit konstanten Werten für verschiedene Bewegungszustände des Transportmittels abgebildet. Im zweiten Ansatz erfolgt die Kalkulation des Leistungsbedarfs auf der Basis eines kontinuierlichen physikalischen Modells in einer Berechnungs-DLL, die als zusätzliche Funktion in das Simulationsmodell integriert wurde.

Am Beispiel eines Hochregallagers mit mehreren Regalbediengeräten wurden der Umfang von Leistungsspitzen und der Zusammenhang zur Transportlast untersucht. Der Ansatz zur Einordnung der Relevanz von elektrischen Leistungsspitzen wurde neu entwickelt und basiert auf dem Vergleich mit der Auslösekennlinie eines Leitungsschutzschalters. Im Beitrag wurde ein Algorithmus vorgestellt und erprobt, mit dem eine Verringerung der Leistungsspitzen über eine Startverschiebung der Transportfahrten erreicht wird.

Weitere Simulationsuntersuchungen sind geplant, um den Zusammenhang von Leistungsspitzen und Transportlast zu quantifizieren und ein Verfahren zur Prognose der Leistungsspitzen für die Systemplanung abzuleiten. In der weiteren Forschungsarbeit soll der Algorithmus zur Verringerung der Leistungsspitzen verbessert und der erreichte Effekt auf die Konsequenzen für die Dimensionierung der elektrischen Versorgungssysteme untersucht werden.

Die Idee der Anwendung elektrischer Energiespeicher zur Reduzierung von Netzlastspitzen motiviert die weitergehende Betrachtung und Beeinflussung des Leistungsbedarfs in Materialflusssystemen.

## Danksagung

Das Forschungsvorhaben wird als IGF-Vorhaben der Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e. V. (FG IFL) über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

- ABB: Auslöse-Charakteristiken für Sicherungsautomaten im Vergleich. ABB Stotz-Kontakt GmbH 2011.
- Braun, M. S. A.: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten, Karlsruher Institut für Technologie: Karlsruhe 2016.
- Cardenas, J. J.; Garcia, A.; Romeral, J. L.; Andrade, F.: A Genetic Algorithm Approach to Optimization of Power Peaks in an Automated Warehouse. In: 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE: Porto 2009, S. 3297–3302.
- Ertl, R.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern, TU München: München 2016.
- Garwood, T. L.; Hughes, B. R.; Oates, M. R.; O'Connor, D.; Hughes, R.: A Review of Energy Simulation Tools for the Manufacturing Sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018, S. 895–911.
- Hahn-Woernle, P.: Reduzierung der Betriebskosten mehrgassiger Lagersysteme mittels elektrischem Lastmanagement, TU München: München 2018.
- Herrmann, C.; Thiede, S.; Kara, S.; Hesselbach, J.: Energy Oriented Simulation of Manufacturing Systems – Concept and Application. *CIRP* 2011, S. 45–48.
- Kiefer, G.: VDE 0100 und die Praxis: Wegweiser für Anfänger und Profis, 12. Auflage. Berlin: VDE 2006.
- Peter, T.; Wenzel, S.: Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilindustrie. In: *Simulation in Production and Logistics 2015*, Gesellschaft für Informatik, Stuttgart: ASIM-Mitteilung, Fraunhofer IRB 2015, S. 535–544.
- Roemer, A. C.; Strassburger, S.: A Review of Literature on Simulation-Based Optimization of the Energy Efficiency in Production. In: *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2016, S. 1416–1427.
- Römer, A.; Rückbrod, M.; Straßburger, S.: Eignung kombinierter Simulation zur Darstellung energetischer Aspekte in der Produktionssimulation. In: *24. Symposium Simulationstechnik*. Hamburg: ARGESIM 2018, S. 73–80.
- Schmidt, A.; Pawletta, T.: Hybride Modellierung fertigungstechnischer Prozessketten mit Energieaspekten in einer ereignisdiskreten Simulationsumgebung. In: *22. Symposium Simulationstechnik*. Berlin: ARGESIM 2014, S. 109–116.
- Siegel, A.; Turek, K.; Michelini, E.; Schmidt, T.: Hybrid Modeling Approach for Prediction of Energy Demand and Power Peaks in Intralogistic Systems. In: *24. Symposium Simulationstechnik*. Hamburg: ARGESIM 2018, S. 81–88.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced Integration of Energy-Related Considerations in Discrete Event Simulation for Manufacturing Applications. *Journal of Simulation* 2016, S. 113–122.
- Wenzel, S.; Peter, T.; Stoldt, J.; Schlegel, A.; Uhlig, T.; Josvai, J.: Considering energy in the simulation of manufacturing systems. In: *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*. Gothenburg, Sweden: IEEE 2018, S. 3275–3286.
- Windmann, S.; Niggemann, O.; Stichweh, H.: Computation of Energy Efficient Driving Speeds in Conveying Systems. at - *Automatisierungstechnik* 2018, S. 308–319.