

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19324 BR

## Thema

Statistische Prognose elektrischer Lastbedarfe in Intralogistiksystemen

## Berichtszeitraum

01.02.2017 - 31.12.2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

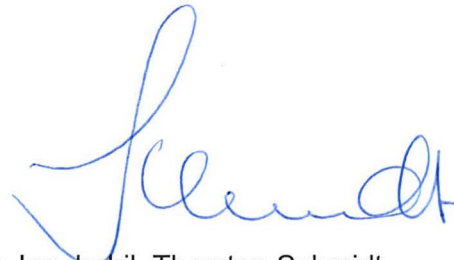
Technische Universität Dresden

Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme

Professur für Technische Logistik

Dresden, 17.1.2020

Ort, Datum



Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Hinweis: Bei der projektausführenden Forschungseinrichtung kam es zwischenzeitlich zu Verzögerungen bei der Besetzung der zugehörigen Stelle. Eine kostenneutrale Verlängerung des Forschungsvorhabens wurde beantragt und vom Fördermittelgeber stattgegeben. Der neue Bewilligungszeitraum wurde auf 01.02.2017 bis 31.12.2019 festgelegt.

## 1. Kurzfassung der Ergebnisse (Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen.)

Das durchgeführte Forschungsvorhaben verfolgte zwei Ziele:

- (a) eine Erhöhung der Planungssicherheit bei der Auslegung elektrischer Versorgungssysteme für Materialflusssysteme,
- (b) eine Bewertung des Potentials für eine Reduzierung der Lastspitzen durch eine Steuerung zur Leistungsaufnahmeverteilung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein neues Verfahren entwickelt, das eine Abschätzung der Lastspitzen von Materialflusssystemen in der Planungsphase ermöglicht. Ausgewiesene Lastspitzen entstehen insbesondere durch gleichzeitig stattfindende Transportstarts. Ausgehend von dieser Überlegung wurde ein Kalkulationsmodell für die Überlagerung von Anfahrvorgängen der RBG in einem Hochregallager erarbeitet.

Eine Simulationsumgebung wurde aufgebaut, mit der die Experimente zur Validierung und Bewertung der Kalkulationsansätze durchgeführt wurden. Die Modellierung der Stückgut-Transporte in der Simulation wurde um die zugehörigen Antriebseinheiten mit zugeordneten Leistungskennwerten der Stetig-Förderer erweitert.

Die Experimentierumgebung wurde mit einer im Projekt neu entwickelten Schnittstelle ausgestattet, die eine Integration kontinuierlicher Berechnungsmodelle der Fahrtrajektorien und der zugehörigen Leistungsaufnahme der RBG in die Materialflusssimulation ermöglicht. Diese Variante erlaubt eine detaillierte Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Leistungsbedarfs in Abhängigkeit von der Transportlast und damit eine Identifikation der Leistungsspitzen im Rahmen einer Materialflusssimulation.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Vorgehensweise zur Verringerung der Lastspitzen eines Lagersystems durch Steuerungseingriff entwickelt. Die Wirkung dieser steuerungstechnischen Maßnahmen auf eine Reduzierung der Lastspitzen und gleichzeitig auf die Transportleistung im System wurde mit der entwickelten Experimentierumgebung untersucht. Es konnte in Experimenten gezeigt werden, dass eine Begrenzung der elektrischen Lastspitzen kaum Einbußen in der Transportleistung eines Hochregallagers verursacht. Darüber hinaus wurde ein Softwaretool entwickelt, mit dem die leistungsmindernde Auswirkung der Lastspitzenbegrenzung auf die Transportleistung bereits in der Planungsphase abgeschätzt werden kann. Das Softwaretool wurde in der Standardsoftware Excel implementiert und erfordert in der Anwendung keine spezifischen Softwarekenntnisse.

## 2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

### Einführung

Der elektrische Leistungsbedarf eines Materialflusssystemes ist abhängig von den installierten Antriebskomponenten der Fördermittel und dem aktuellen Transportaufkommen. Die Lastbedarfe der Einzelverbraucher überlagern sich. Im Falle ungünstiger Überlagerung können erhebliche elektrische Lastspitzen auftreten. Die Dimensionierung der Komponenten des elektrischen Versorgungssystems muss auf die möglichen Lastspitzen ausgerichtet sein, um eine schädigende Überlastung zu vermeiden.

Im Status quo der Planungspraxis erfolgt eine pauschale Berechnung mit einem grob geschätzten Gleichzeitigkeitsfaktor zur Verrechnung der Gesamtleistung der installierten Verbraucher (vgl. Kiefer 2006). Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist ein erfahrungsbasierter Schätzwert. Die Abschätzung der auftretenden Lastspitzen in Abhängigkeit von der spezifischen Struktur und Systemlast in einem Materialflusssystem beschreibt das Ziel dieses Forschungsprojekts.

### AP1 Planungsrichtlinien und Kostenmodelle

Im Arbeitspaket 1 wurden industrielle Kostenmodelle für die Energieentnahme recherchiert.

Die Grundsätze der Preisgestaltung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und die Prinzipien der Netznutzung ergeben sich aus gesetzlichen Vorgaben durch die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV), die Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV), und die Niederspannungsanschlussverordnung (NAV). Die Festlegung der konkreten Preise erfolgt durch das örtliche Versorgungsunternehmen.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Netznutzungsentgelte des Letztverbrauchers (Netznutzer) gegenüber dem Netzbetreiber im Niederspannungsnetz teilt sich entsprechend der jährlichen Energieentnahme in zwei Kategorien auf.

Letztverbraucher mit einer jährlichen Entnahme von bis zu 100.000 Kilowattstunden werden entsprechend ihres typischen Abnahmeprofiles in standardisierte Lastprofile eingeordnet. Die Abrechnung erfolgt auf der Basis von pauschalem Grundpreis und Arbeitspreis (Verbrauchspreis) in Cent pro Kilowattstunde.

Bei einem jährlichen Verbrauch über 100.000 Kilowattstunden spielt darüber hinaus die Netzbeanspruchung durch Spitzenlasten eine wesentliche Rolle. Beim Netznutzer erfolgt zusätzlich eine registrierende Lastgangmessung im Viertelstundenraster. Der im Abrechnungszeitraum höchste Leistungsmittelwert pro Viertelstunde bestimmt die Jahreshöchstleistung. Das Jahresleistungsentgelt ist das Produkt aus dem jeweiligen Jahresleistungspreis in Euro pro Kilowatt und der Jahreshöchstleistung in Kilowatt. Das Arbeitsentgelt ist das Produkt aus dem jeweiligen Arbeitspreis und der insgesamt entnommenen elektrischen Arbeit in Kilowattstunden. Das Netzentgelt besteht dann aus der Summe von Leistungsentgelt und Arbeitsentgelt.

Weitere Entgeltabstufungen erfolgen auf Basis der sogenannten Jahresbenutzungsdauer (der Quotient aus Jahresarbeit und Jahreshöchstleistung, Schwellwert bei 2500 Stunden pro Jahr) sowie der Spannungsebene der Entnahmestelle des Stromkunden. Zusätzlich entstehen pauschale Entgelte für Messstellenbetrieb, Messung und Abrechnung.

## AP 2 Last- und Brachzeitenkalkulation

Bei der Energiebetrachtung von Materialflusstechnik finden Regalbediengeräte (RBG) eine besondere Beachtung. Diese Geräte weisen aufgrund ihrer Bau- und Betriebsweise einen hohen Energiebedarf auf. RBG bedienen horizontal und vertikal nebeneinander angeordnete Lagerplätze in einer Lagergasse. Komplette industrielle Lagersysteme bestehen typischerweise aus mehreren Gassen mit gleichzeitig arbeitenden RBG.

Die Antriebe von Fahrwerk und Hubwerk eines RBG arbeiten gleichzeitig. Der elektrische Leistungsbedarf addiert sich. Dadurch entsteht beim Anfahren zumeist eine ausgeprägte Leistungsspitze. Die zeitliche Überlagerung der Anfahrvorgänge mehrerer RBG im Lagersystem verursacht dann signifikante Systemleistungsspitzen, die in ihrer Höhe deutlich über dem durchschnittlichen Leistungsverlauf liegen.

In diesem AP wurde eine Vorgehensweise zur Kalkulation der Leistungsspitzen neu erarbeitet, die auf der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für eine Überlagerung der Anfahrvorgänge mit Hilfe eines stochastischen Modells basiert. Der im Projektantrag geplante Ansatz, die Leistungsspitzen über eine Modellierung der Last- und Brachzeiten zu bestimmen, wurde abgewandelt in eine Betrachtung von Anfahrvorgängen innerhalb der Systembetriebszeit. Der neue Ansatz ermöglicht eine präzisere Kalkulation der Leistungsspitzen.

Die so ermittelte Wahrscheinlichkeit gibt Aussage darüber, dass sich *ein* RBG innerhalb der Systembetriebszeit im Anfahrvorgang befindet. Sie wird anschließend verknüpft mit den Wahrscheinlichkeitswerten der anderen RBG des Lagersystems. Ein im Projekt erarbeitetes Kalkulationsmodell liefert schließlich die Wahrscheinlichkeitswerte dafür, dass sich mehrere RBG gleichzeitig im Anfahrvorgang befinden, und ermöglicht damit eine Abschätzung der Leistungsspitzen im System. Eine detaillierte Erklärung der Vorgehensweise und des Kalkulationsmodells erfolgt in den Ausführungen zu AP 4.

Der Ansatz vereinfacht den Anfahrvorgang dahingehend, dass mit einem konstanten maximalen Leistungsbedarf während der gesamten Anfahrzeit kalkuliert wird. Durch diese Annahme liefert das Kalkulationsmodell eine Abschätzung der Obergrenze für das Auftreten von Leistungsspitzen.

## AP 3 Integration von Leistungskennwerten

In diesem Arbeitspaket wurden Modelle und Kennwerte für die Leistungsaufnahme verschiedener Fördertechnikelemente analysiert und für eine Integration in die Experimentierumgebung (siehe Ausführungen AP 5) aufbereitet. Verschiedene Ansätze zur Abbildung der energetischen Zusammenhänge und zu ihrer Verknüpfung mit einer Materialflusssimulation innerhalb einer Experimentierumgebung wurden im AP analysiert.

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, die aus physikalischen Modellen oder Messreihen abgeleitet wurden.

Die Modellierung mit phasenweise konstanten Leistungsbedarfen erlaubt eine einfache Einbindung in die ereignisdiskrete Simulation, da die Abschnittswechsel häufig mit Ereignissen

in der Simulation abgebildet werden können. Die Variante a) findet deshalb breite Anwendung in Simulationsstudien, wie Roemer und Strassburger (2016) in ihrem Überblick bestätigen. Für eine Kalkulation des Energiebedarfs bietet diese Variante eine ausreichende Genauigkeit, aber nicht in jedem Fall für eine Analyse der Leistungsspitzen.

Die Modellierung mit kontinuierlich veränderlichen Leistungsbedarfen ermöglicht eine höhere Genauigkeit in der Abbildung elektrischer Leistungsspitzen, verursacht aber auch einen höheren Aufwand in der Implementierung und Validierung.

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

- a) Simulation mit einer nachgelagerten Energiebetrachtung mit externem Tool,
- b) Kopplung der Simulation mit einer parallelen Energiebetrachtung in einem externen Tool (Peter und Wenzel 2015),
- c) Integration der Energiebetrachtung und der Simulation in einer einheitlichen Applikation (Stoldt et al. 2016).

Die nachgelagerte Energiebetrachtung ist für eine statische Systemanalyse ausreichend, erlaubt aber keine dynamische Beeinflussung des Simulationsablaufs. Diese Vorgehensweise kann demnach keine Strategien zur Lastspitzenreduzierung abbilden und wurde nicht weiter betrachtet.

Die Kombination verschiedener Tools im Rahmen der Vorgehensweise b) bietet Vorteile durch die Nutzung von Software aus problemspezifischen Modellierungsdomänen. Eine dynamische Wechselwirkung ist möglich. Der zusätzliche Aufwand für die Kopplung der Tools und einer Synchronisation im Simulationsablauf wirkt jedoch deutlich zum Nachteil dieser Variante.

Die Integration der Energiebetrachtung und der Simulation in einer einheitlichen Applikation kann die Nachteile der vorigen Varianten vermeiden. In diesem Forschungsprojekt wurde deshalb eine Umsetzung der Vorgehensweise c) ausgewählt.

Es wurde eine Kombination einer Abbildung der energetischen Zusammenhänge sowohl als abschnittsweise konstante Leistungsbedarfe als auch mit kontinuierlich veränderlichen Leistungsbedarfen umgesetzt. Eine detaillierte Erklärung der Umsetzung der gewählten Vorgehensweise erfolgt in den Ausführungen zu AP 5.

#### Modellierung und Kennwerte für Rollen- und Kettenförderer

Es erwies sich als zielführend, bei der Abbildung der energetischen Zusammenhänge zwischen Stetigförderern und den Regalbediengeräten zu unterscheiden, da die Leistungsspitzen bei RBG deutlich ausgeprägter und individueller im Verlauf sind als bei Stetigförderern.

Ausgangspunkt der verwendeten Modelle und Kennwerte für Rollen- und Kettenförderer war eine Literaturrecherche zur Energiebedarfsbestimmung von Stückgut-Stetigfördertechnik. Die Parameter des elektrischen Leistungsbedarfs beruhen im Wesentlichen auf den Arbeiten von Habenicht (2018), Hohnsbein (2010) und Lottersberger (2016).

Die Berechnungsmodelle und Leistungskennwerte wurden auf der zweiten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses mit den Mitgliedern diskutiert und validiert. Vorschläge für Modifikationen wurden aufgenommen und umgesetzt.

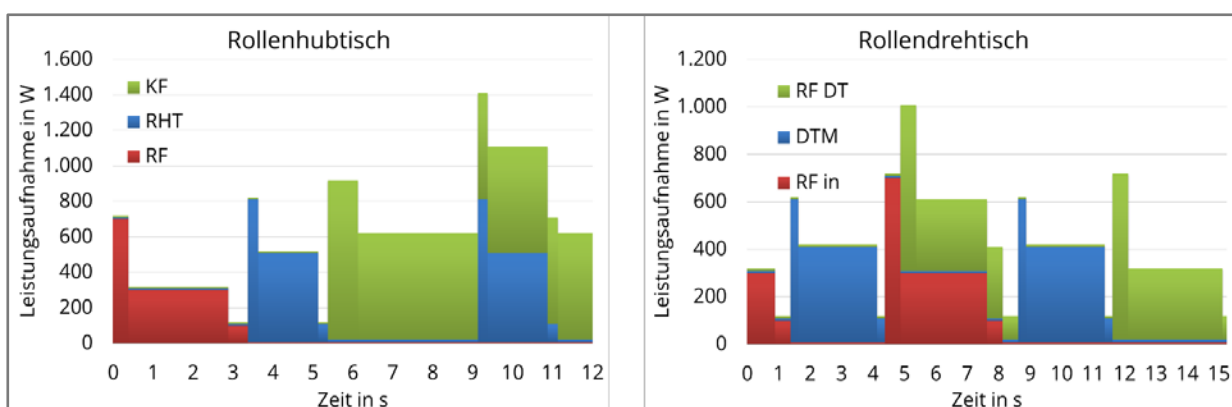
Für Stückgut-Stetigfördertechnik wurde eine Modellierung mit phasenweise konstanten Leistungsbedarfen erarbeitet und im Simulationsmodell umgesetzt. Der Modellierungsansatz für die Leistungsaufnahme der Rollenförderer (RF) und Kettenförderer (KF) unterteilt den Transportvorgang in Bewegungszustände, die mit jeweils konstantem Leistungsbedarf der Antriebe hinterlegt werden. Im Einzelnen wird in der Gesamtaktivität unterschieden in Stillstand, Anfahren, Transport, Leerlauf und Bremsen des Förderers. Rollenförderer und Kettenförderer sind im Modell mit einem Nachlauf versehen. Der Antrieb des Förderers läuft eine kurze Zeit im Leerlauf nach, um häufiges Ein- und Ausschalten bei kurz aufeinander folgenden Paletten zu vermindern. Beim Hubtisch greifen Rollenförderer und Kettenförderer ineinander, um den Richtungswechsel zu ermöglichen. Die Palette wird durch einen weiteren Motor kurz gehoben oder abgesenkt. Beim Rollen-Drehtisch setzt ein weiterer Antrieb die Drehung des Rollenförderers um.

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die gewählten Kennwerte.

**Tabelle 1:** Leistungskennwerte Stückgut-Stetigförderer

Antrieb	Zeit in Sekunden			Leistung in Watt			
	Anfahren	Bremsen	Nachlauf Heben Drehen	Anfahren	Transport	Bremsen	Leerlauf
Rollenförderer	0,50	0,50	2,0	700	300	100	200
Kettenförderer	0,50	0,25	1,0	900	600	150	300
Hubtisch	0,25	0,25	1,5	800	500	100	500
Drehtisch	0,25	0,25	2,5	600	400	100	400

Für eine ergänzende Erklärung der Umsetzung wird für einen Hubtisch und einen Drehtisch die Überlagerung der modellierten Leistungsaufnahmen in nachfolgender Abbildung 1 gezeigt.



**Abbildung 1:** Leistungsaufnahme Rollenhubtisch und Rollendrehtisch (Legende zur Abbildung 1: KF – Kettenförderer, RF – Rollenförderer, RHT – Rollenhubtisch, RF DT – Rollenförderer Drehtisch, DTM – Drehmotor, RF in – einfahrender Rollenförderer)

Das linke Diagramm zeigt den Leistungsverlauf bei der Fahrt von einem Rollenförderer über den Hubtisch zum Kettenförderer. Der Hubtisch fährt wieder in Ausgangsposition, nachdem die

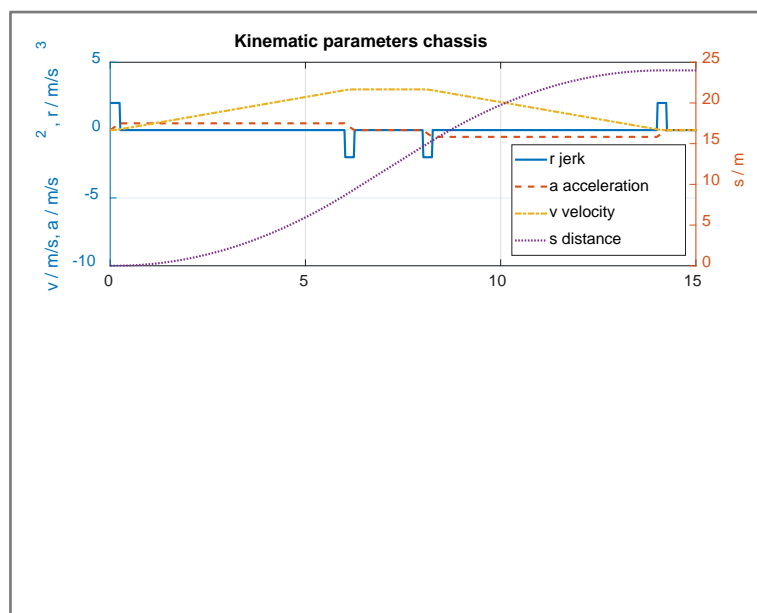
Palette ihn verlassen hat. Das rechte Diagramm zeigt eine Fahrt von einem Rollenförderer über einen Rollendrehtisch. Der Rollendrehtisch dreht sich zum einfahrenden Rollenförderer hin, dann fährt die Palette auf den Drehtisch. Die Palette wird gedreht und verlässt den Drehtisch.

Der Leistungsbedarf der Fördertechnikkomponente insgesamt ergibt sich aus der Überlagerung der Bedarfe der gleichzeitig arbeitenden Antriebe.

### Modellierung und Kennwerte für Regalbediengeräte

Dem zuvor beschriebenen Ansatz mit konstanten Leistungsbedarfen wurde für Regalbediengeräte die Abbildungsvariante b) mit kontinuierlich veränderlichen Leistungsbedarfen hinzugefügt. Diese Variante erlaubt eine detaillierte Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Leistungsbedarfs der RBG und damit der Leistungsspitzen

Für Regalbediengeräte wird ein kinematisches Bewegungsmodell für das Fahrwerk und das Hubwerk verwendet. Durch die Einbeziehung eines konstanten Rucks in die Bewegungsgleichungen entsteht ein 7-phasiges Bewegungsmodell mit den weiteren Bewegungsgrößen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg. Aus dem zeitlichen Verlauf der Bewegungsgrößen wird unter Berücksichtigung der bewegten Massen die notwendige mechanische Leistung bestimmt. Der Leistungsbedarf des Lastaufnahmemittels ist erheblich geringer und wurde deshalb vereinfacht mit konstanten Leistungswerten abgebildet.



**Abbildung 2:** Leistungsaufnahme Regalbediengerät (RBG)

In die weitere Kalkulation des Leistungsbedarfs fließen mechanischen Verluste (z. B. der Fahrwiderstand der Rad-Schiene-Kombination) und elektrische Verluste (z. B. im Frequenzumrichter) ein. Aus der Überlagerung der Bewegung von Fahrwerk und Hubwerk und der Hinzunahme einer Grundverlustleistung ergibt sich der Leistungsbedarf für den kompletten Bewegungsablauf. Dieses physikalische Modell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs wird ausführlich in der Projektveröffentlichung von Siegel et al. (2018) beschrieben. Das physikalische Modell wurde über eine Leistungsmessung an einem realen RBG bei einem Industriepartner kalibriert und validiert.

## AP 4 Berechnungsmethode für Gesamtsysteme

In einem Intralogistiksystem werden zahlreiche Transportaufträge unabhängig voneinander gleichzeitig bzw. kurzzeitig versetzt gestartet. Transportstarts und Transportbewegungen der Fördertechnik finden gleichzeitig statt. Die Leistungsbedarfe der zugehörigen Antriebe überlagern sich. Ausgeprägte Lastspitzen entstehen insbesondere durch gleichzeitig stattfindende Transportstarts.

Ausgehend von dieser Überlegung wurde ein Kalkulationsmodell für die Überlagerung von Anfahrvorgängen der RBG in einem Hochregallager erarbeitet, um auf diesem Weg die maximal auftretenden elektrischen Leistungsspitzen abschätzen zu können (vgl. AP 2). Die Anzahl der Anfahrvorgänge ergibt sich dabei aus der Anzahl der Transportaufträge pro RBG einschließlich der notwendigen Leerfahrten.

Ein Paletten-Hochregallager mit (wahlweise) 4 bzw. 8 Gassen, 10 Lagerebenen und 75 Fächern je Ebene und einer Lagervorzone mit Ein- und Auslagerbahnen wurde als Beispielsystem ausgewählt. 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>. Die nachfolgenden Ausführungen referenzieren bei Nennung konkreter Werte auf dieses Beispielsystem. Die Vorgehensweise ist jedoch für äquivalent aufgebaute Systeme gleichfalls gültig.

Folgende Vereinfachungen bzw. Vereinbarungen wurden innerhalb des Ansatzes getroffen:

- Die Transportfahrten finden voneinander unabhängig und gleichverteilt über den gesamten Zeitraum statt.
- Die RBG im System besitzen identische technische Parameter und führen die gleiche Anzahl Transportaufträge aus.
- Die Zeitdauer des Anfahrvorgangs  $t$  wird vereinfachend über das Verhältnis von Sollgeschwindigkeit  $v$  und Beschleunigung  $a$  des RBG kalkuliert.
- Der E/A-Punkt für die Übergabe/Übernahme der Paletten befindet sich in der untersten Lagerebene und unmittelbar vor dem Lager.
- Es werden nur die Fahrten berücksichtigt, bei denen durch gleichzeitiges Anfahren und Heben eine hohe Leistungsspitze im Start entsteht.

Die Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass sich ein RBG im Anfahrvorgang befindet, ergibt sich bei bekannter Anzahl Fahrten  $m$  innerhalb eines Zeitraums  $T$  aus Formel 1.

$$p = \frac{m \cdot t}{T} \text{ mit } t = \frac{v}{a} \quad (1)$$

Da die RBG identisch sind, besitzt die Wahrscheinlichkeit  $p$  für alle Geräte im System den gleichen Wert. Ausgehend von der Überlegung, dass ein RBG sich immer entweder im Anfahrvorgang oder in einem alternativen Zustand befindet, kann die Wahrscheinlichkeit der Gleichzeitigkeit der Anfahrvorgänge einer bestimmten Anzahl Geräte  $k$  innerhalb einer Gesamtzahl Geräte  $n$  im System über die Anwendung des Binomialkoeffizienten bestimmt werden. Dieser Ansatz wurde abgeleitet aus Thies (2013).

$$p_k = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \text{ wobei } \binom{n}{k} = \frac{n!}{(k! \cdot (n-k)!)} \quad (2)$$



Die ermittelte Wahrscheinlichkeit  $p_k$  entspricht als statistischer Wert dem Zeitanteil innerhalb des betrachteten Zeitraums, in dem sich  $k$  von  $n$  Geräten gleichzeitig im Anfahrvorgang befinden. Dieser Wert ist der Ausgangspunkt für die Kalkulation der zu erwartenden elektrischen Leistungsspitzen. Aufgrund der oben genannten Vereinfachungen und Vereinbarungen liefert der ermittelte Wert daher eine Abschätzung der Obergrenze für das Auftreten von Leistungsspitzen. Die tatsächlichen Werte liegen in Zeitdauer und Leistungshöhe darunter.

Eine detaillierte Erklärung der Validierung dieses Kalkulationsansatzes mit einem Simulationsmodell in der Experimentierumgebung erfolgt in den Ausführungen zu AP 7.

## AP 5 Experimentierumgebung zur Validierung und Bewertung

Im Forschungsprojekt wurde eine Experimentierumgebung mit einem ereignisdiskreten Simulationssystem (AutoMod) aufgebaut, um eine Validierung und Bewertung der Kalkulationsansätze durchführen zu können. Die Leistungsbedarfsmodelle aus Arbeitspaket 3 wurden in ein Simulationsmodell integriert.

Die modellinterne Transportabbildung in der Simulation wurde um die Identifikation der Bewegungszustände und die zugehörigen Antriebsaktivitäten der Stetig-Förderer erweitert. Die Parametrierbarkeit der Leistungskennwerte der Bewegungszustände ermöglicht die Abbildung einer breiten Palette von Fördertechnik. Die Erfassung der dynamischen Zustandswechsel im Guttransport während des Simulationslaufs liefert eine fortlaufende Kalkulation der Leistungswerte und der Lastspitzen.

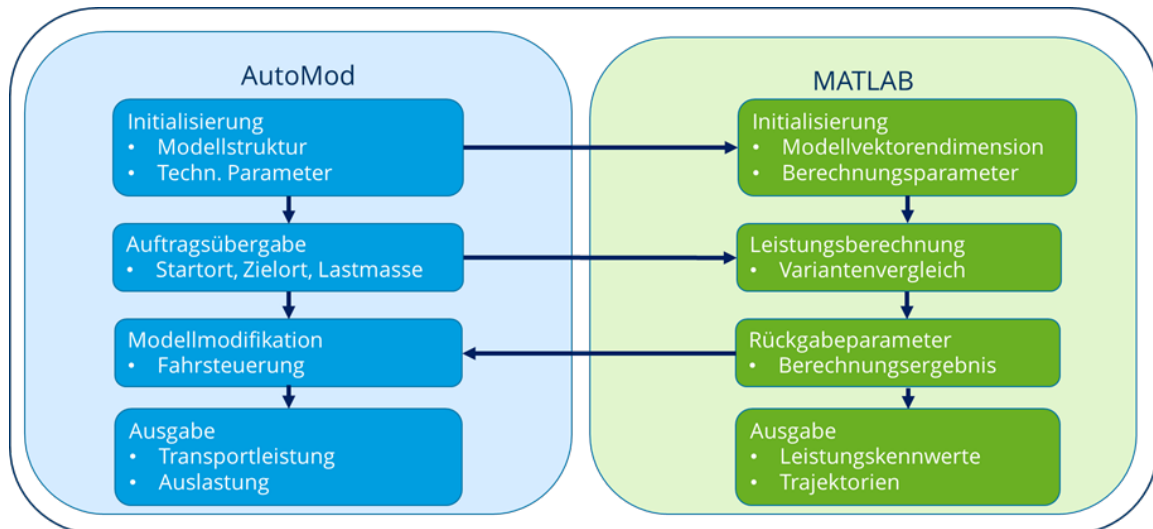
### Diskret-kontinuierliche Simulationsinfrastruktur

Für die ereignisdiskrete Materialflusssimulation wird der Simulator AutoMod genutzt. Der Anwender kann mit diesem Simulator mit hoher Detailgenauigkeit Materialflusssysteme in Produktion und Logistik beschreiben.

Die Software Matlab wird für die kontinuierlichen Berechnungsmodelle der Fahrtrajektorien und der zugehörigen Leistungsaufnahme der RBG verwendet. Die Berechnung des Leistungsbedarfs im Zeitverlauf basiert auf einem Bewegungsmodell und einem Modell zur Berücksichtigung von mechanischen und elektrischen Leistungsverlusten (siehe Modellierung und Kennwerte für Regalbediengeräte).

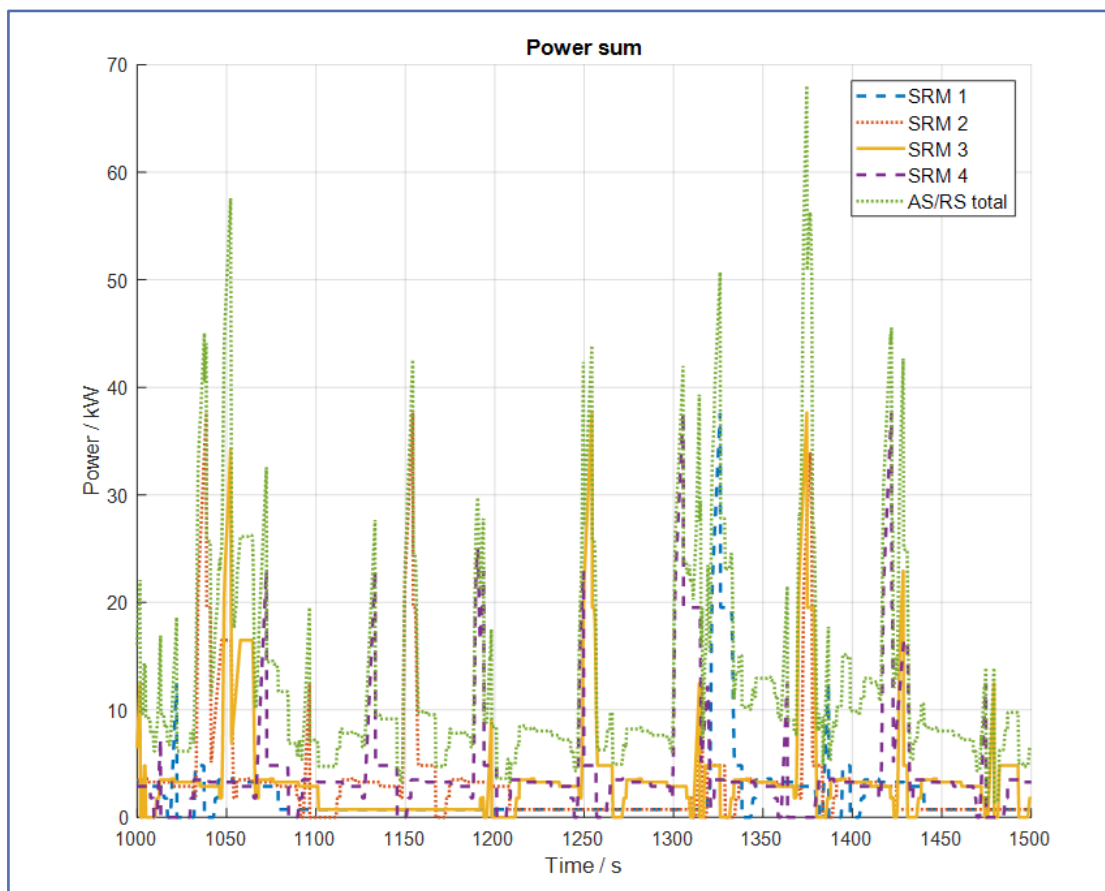
Das in Matlab erstellte Modell wird in eine DLL überführt. Diese Berechnungs-DLL wird mit Hilfe eines Kopplungsmoduls, das mit einer im Projekt neu entwickelten Schnittstelle ausgestattet ist, mit einem Simulationsmodell in der Simulationsumgebung AutoMod verbunden.

Zum Beginn eines Simulationsexperiments teilt das Modell der Matlab-DLL spezifische Parameter des aktuellen Modells und des Experiments mit. Während des Simulationslaufs kommuniziert das Simulationsmodell die Transportauftragsparameter an die Berechnungs-DLL. Mit den initialisierten Parametern der Geräte wird der Leistungsbedarfsverlauf für jede Fahrt und dadurch für das Gesamtsystem berechnet.



**Abbildung 3:** Strukturschema der Modellkopplung

Die Berechnungs-DLL wurde so entwickelt, dass ein Vergleich verschiedener energetischer Varianten einer Transportfahrt möglich ist. Simulationsexperimente können so wahlweise mit und ohne Lastspitzenreduzierung durchgeführt werden. Die Rückgabe von Werten an das Simulationsmodell ermöglicht eine Beeinflussung des Simulationsablaufs. Das Steuerungsmodul kann eine Startverschiebung an das Simulationsmodell zurückliefern und somit die Transportausführung beeinflussen.



**Abbildung 4:** Leistungsverlauf für Regalbediengeräte (SRM) und Gesamtsystem (AS/RS)

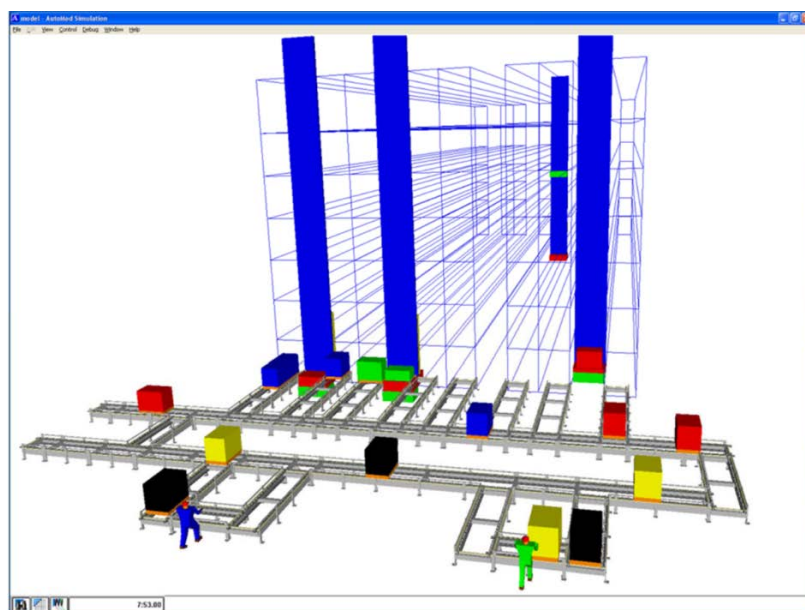
Die Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für mit der Experimentierumgebung ermittelte Leistungsbedarfe des Beispielsystems mit 4 Regalbediengeräten. Der Vergleich mit realen Messwerten ergab eine gute strukturelle Übereinstimmung des Leistungsverlaufs.

Die Experimentierumgebung und erste Simulationsexperimente zur Validierung wurden auf der zweiten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses den Mitgliedern vorgestellt und Vorschläge für Modifikationen wurden aufgenommen.

## AP 6 Kennwerte für Materialflusstrukturen

Das zur Untersuchung verwendete Beispielsystem eines Paletten-Hochregallagers wurde im Simulationssystem AutoMod implementiert. Die Generierung von Einlagerungs- und Auslagerungsaufträgen für die RBG erfolgt unabhängig voneinander. Eine mittlere Anzahl von Paletten pro Stunde und Richtung wird als Zielwert pro Lagergasse vorgegeben. Das Lagerfach wird dabei gleichverteilt zufällig aus allen Fächern einer Gasse gewählt. Vereinfachend wird eine Fachbelegung bei der Fachauswahl nicht berücksichtigt.

Die Vorzone (E/A-Bereich) des Hochregallagers besitzt eine fördertechnische Anbindung an einen Kommissionierbereich (vergleiche Abbildung 5). Ausgelagerte Paletten werden in den Kommissionierbereich transportiert und nach einem Aufenthalt dort zum Teil wieder in das Hochregallager eingelagert. Der Transportbereich ist als Ring gestaltet. Paletten fahren darauf im Kreis, wenn die Einlagerungsbahn der zugeordneten Gasse blockiert ist.



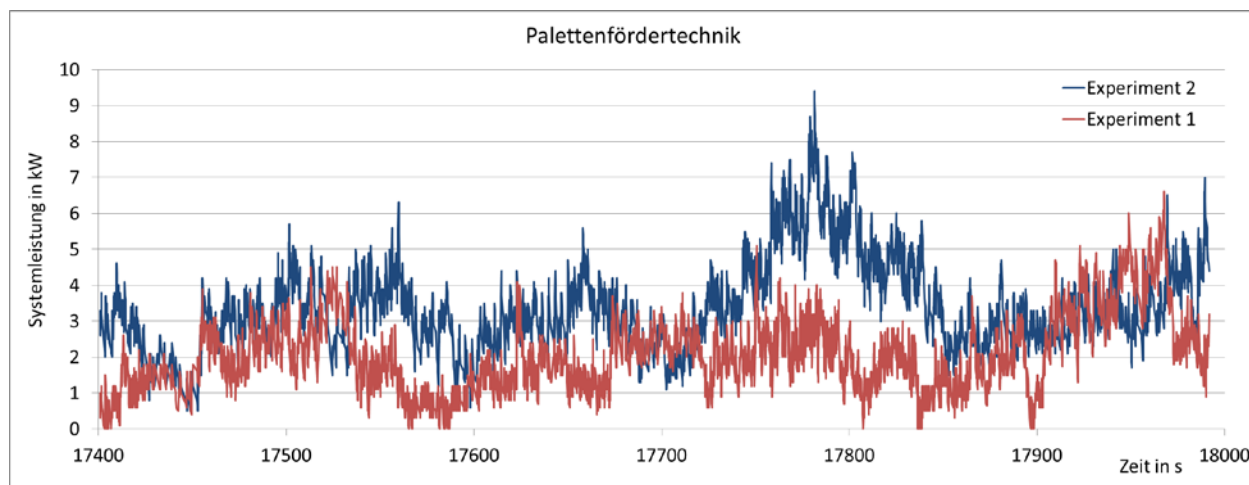
**Abbildung 5:** Beispielsystem mit 4 Gassen

Nachfolgend werden zwei Experimente für die Betrachtung elektrischer Lastspitzen in der Stetigfördertechnik vorgestellt und diskutiert. In den Experimenten wurden die Leistungsbedarfe für Rollen- und Kettenförderer entsprechend der in AP 3 vorgestellten Kennwerte hinterlegt. Für die Summe aller Antriebe der Stetigfördertechnik im Gesamtsystem ergeben sich die Eckwerte von ca. 100 kW installierten Nennleistungen und ca. 37 kW im gleichzeitigen Dauerbetrieb aller Antriebe.

Die Experimente unterscheiden sich in der eingestellten Anzahl von Auslagerungen. Die Paletten werden von den RBG in die Vorzone gebracht, von dort zum Kommissionierbereich

transportiert und nach einem kurzen Aufenthalt wieder zurück zum HRL und wieder eingelagert. Die Bewegungszustände der Antriebe der Rollenförderer und Kettenförderer und die zugehörigen Leistungsbedarfe werden erfasst und ausgewertet.

- Experiment 1 – 40 Paletten/Stunde: ca. 16 Paletten gleichzeitig unterwegs
- Experiment 2 – 80 Paletten/Stunde: ca. 61 Paletten gleichzeitig unterwegs



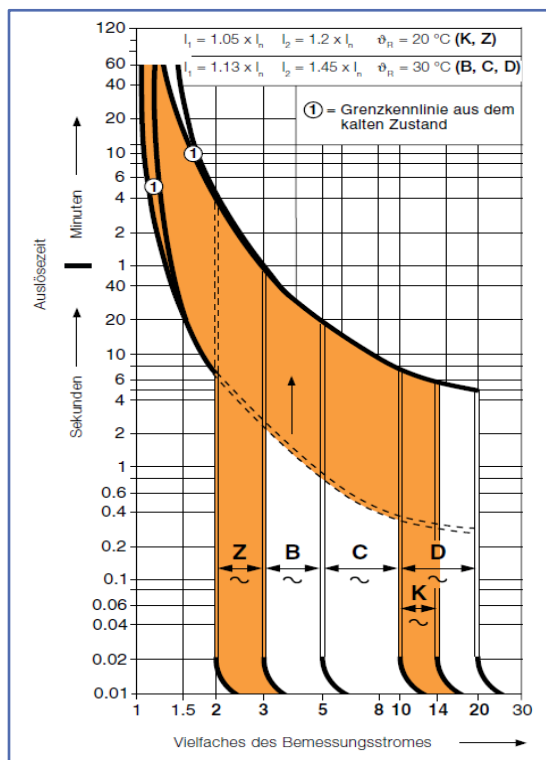
**Abbildung 6:** Vergleich der Systemleistung der Experimente (Ausschnitt)

Die Systemleistung lag in den Experimenten über 10 Stunden zumeist unter den Wert von 10 kW. Das einmalig beobachtete Maximum erreicht den Wert von 11,3 kW. Diese Werte sind erheblich geringer als die Leistungsspitzen der RBG in diesem System.

### Modellierung und Kennwerte für Regalbediengeräte

Die beeinträchtigende Wirkung elektrischer Leistungsspitzen auf die Versorgungsinfrastruktur hängt von ihrer Höhe und ihrer Dauer ab. Idealerweise sollten deshalb beide Faktoren in die Identifikation von Leistungsmaxima als kritische Leistungsspitzen innerhalb eines Systemleistungsverlaufs einfließen.

Für die Einordnung lokaler Maxima als kritische Leistungsspitzen wurde deshalb ein Ansatz unter Bezugnahme auf die Auslösecharakteristik eines Leitungsschutzschalters vom Typ K untersucht. Leitungsschutzschalter verhindern bei elektrischer Überlastung durch eine Leistungsspitze eine weitere Schädigung der Anlagen durch Leistungsunterbrechung. Standardisierte Kennlinien definieren die Auslösewerte in Form einer maximal zulässigen Stromstärke  $I$  mit Dauer  $T$  in Relation zum Bemessungsstrom  $I_0$ . Der Bemessungsstrom orientiert sich an der gewählten Versorgungsinfrastruktur.



**Abbildung 7:** Auslösecharakteristiken Leitungsschutzschalter (ABB 2011)

Der entsprechende Kennlinienverlauf eines Leitungsschutzschalters vom Typ *K* wurde aus grafischen Darstellungen in der Literatur, z. B. ABB (2011), entnommen. Der Werteverlauf wurde 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.

$$T = e^{-\frac{1}{m} \ln(\ln \frac{I}{I_0}) + \frac{n}{m}}, \text{ mit } T \text{ in s} \quad (3)$$

Die in Experimenten bestimmten Leistungsbedarfswerte können mit dieser Kennlinien-Funktion verglichen werden. Übersteigen Leistungswerte und zugehörige Zeitspanne die zulässige Auslösekennlinie, so wird dieser Abschnitt als relevante Leistungsspitze ausgewiesen. Mit einem geeigneten Auswerteverfahren können so die Anzahl kritischer Leistungsspitzen innerhalb des Experiments ermittelt werden.

#### AP 7 Lastspitzenreduzierung durch Steuerungseingriff

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Vorgehensweise zur Begrenzung der Leistungsspitzen eines Lagersystems durch Steuerungseingriff entwickelt. Die Wirkung dieser steuerungstechnischen Maßnahmen auf die Reduzierung der Lastspitzen und gleichzeitig auf die Transportleistung im System wurde in Simulationsexperimenten untersucht. Ein Ansatz zur Abschätzung der Leistungsminderung in der Transportleistung wurde herausgearbeitet, der bereits in der Systemplanungsphase angewendet werden kann.

Der gewählte Steuerungsansatz greift die Überlegung auf, dass die Systemleistungsspitzen durch die Überlagerung mehrerer Anfahrvorgänge verursacht werden. Die Verringerung der Leistungsspitzen kann demnach durch Entzerrung der zeitlichen Überlagerung mit Hilfe geringfügigen Startverschiebungen der Fahrten im Lagersystem erreicht werden.

Das Kalkulationsmodell für Hochregallager (vorgestellt in AP 4) wurde um einen Ansatz zur Abschätzung der erforderlichen zeitlichen Verschiebungen erweitert. Die Methode zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass sich  $k$  von  $n$  Geräten gleichzeitig im Anfahrvorgang befinden, wird als Ausgangspunkt der Kalkulation genommen. Eine maximal zulässige Anzahl gleichzeitiger Anfahrvorgänge im System wird als Parameter gesetzt. Die Begrenzung gleichzeitiger Anfahrvorgänge ist zugleich eine Begrenzung des maximalen Leistungsbedarfs.

Für alle darüber liegenden Fälle wird die notwendige Verschiebungszeit (Shift) kalkuliert. Die dadurch neu entstehenden Überlagerungen werden gleichfalls berücksichtigt und vermieden. Die Summe dieser Verschiebungszeiten wird abschließend ermittelt und in Relation zur Anzahl der Geräte und zur Gesamtzeit gesetzt. Die Ausführung aller Transporte würde sich um diese ermittelte Zeitspanne verlängern. Die voraussichtliche Verringerung der ursprünglichen Systemleistung (Transporte pro Stunde) durch die Anwendung von Startverschiebungen wird dann über den Anteil der zusätzlichen Verschiebungszeit zur Gesamtzeit der Transporte abgeschätzt.

Nachfolgend werden zwei Experimente dazu vorgestellt und verglichen:

- Experiment 1 – maximale Auslastung der RBG, nur Einlagerungen,
- Experiment 2 – maximale Auslastung der RBG, Einlagerungen und Auslagerungen.

Das verwendete Lagersystem besteht aus 8 Gassen mit 10 Ebenen. Für den Modellparameter Anzahl Fahrten werden in der Kalkulation nur die Fahrten berücksichtigt, bei denen durch gleichzeitiges Anfahren und Heben eine hohe Leistungsspitze auftreten kann. In dieser Berechnung wird deshalb mit 45 Prozent aller Fahrten kalkuliert, da bei der Hälfte aller Fahrten und bei Fahrten in Ebene 1 kein Heben erforderlich ist.

Im Experiment 1 wurden ca. 55 Einlagerungen pro RBG erreicht. Daraus ergeben sich 110 Fahrten, von denen 50 relevant für die Kalkulation sind. Im Experiment 2 wurden ca. 34 Einlagerungen und 34 Auslagerungen pro RBG erreicht. Bei maximaler Auslastung entstehen nur Doppelspiele. Somit ergeben sich 100 Fahrten, von denen 46 relevant für die Kalkulation sind. Die Ergebnisse im Kalkulationsmodell sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Ergebnisse Kalkulationsmodell zur Startverschiebung (Shift)

Experiment	Limit RBG	Shift RBG in s	Durchsatz RBG Paletten h <sup>-1</sup>	Durchsatz RBG rel. %
1	1	125	53,1	97
1	2	13	54,8	99
1	3	1	55,0	100
2	1	95	66,1	97
2	2	10	67,7	99
2	3	1	68,0	100

Die Ergebnisse im Kalkulationsmodell wurden mit Simulationsexperimenten in der Experimentierumgebung validiert und bewertet. Die Tabelle 3 gibt eine Übersicht zu den Eckwerten für den Leistungsbedarf der Antriebe der RBG innerhalb der Experimente.

**Tabelle 3:** Eckwerte der Leistungsbedarfe der RBG Antriebe

RBG Antrieb	Nennleistung P in kW	max. Leistung P in kW
Fahrwerk	17,1	20,0
Hubwerk	26,0	16,0
Lastaufnahme	1,9	2,0

Der Steuerungsansatz zur Startverschiebung wurde in zwei Varianten implementiert. Die erste Implementierung orientiert sich am zuvor geschilderten Ansatz und beschränkt die Anzahl gleichzeitiger Anfahrvorgänge. Eine neue Fahrt wird gegebenenfalls verzögert.

Der zweite Ansatz ermöglicht die Einhaltung eines vorgegebenen Maximums des Leistungsbedarfs. Der zusätzliche Leistungsbedarf einer neuen Fahrt wird zunächst zum aktuell berechneten Systembedarf hinzugerechnet. Bei einer Überschreitung des vorgegebenen Maximums wird der Startzeitpunkt der neuen Fahrt im Sekundenraster verschoben. Das Leistungsmaximum in jeder Verschiebung wird berechnet. Die erforderliche Startverschiebung für die Unterschreitung des Leistungslimits wird an das Simulationsmodell übermittelt.

Die Auswertungen in Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse für beide Steuerungsansätze in beiden Experimenten. Für den zweiten Ansatz wurden Limits von 120 kW und von 140 kW betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Ansatz Leistungsspitzen effektiv begrenzt können bei einer gleichzeitig sehr geringen Transportleistungsminderung.

**Tabelle 4:** Ergebnisse für Simulationsexperiment 1 zur Startverschiebung

Limit	Shift RBG in s	Durchsatz RBG in h <sup>-1</sup>	Durchsatz RBG rel. %	Max. Leistung in kW
1 RBG	106	53,3	97	121
2 RBG	10	54,9	99	146
3 RBG	1	55,1	100	165
kein		55,1	100	178
120 kW	3	55,0	100	119
140 kW	1	55,1	100	139

**Tabelle 5:** Ergebnisse für Simulationsexperiment 2 zur Startverschiebung

Limit	Shift RBG in s	Durchsatz RBG in h <sup>-1</sup>	Durchsatz RBG rel. %	Max. Leistung in kW
1 RBG	96	66,2	97	108
2 RBG	6	67,9	99	128
3 RBG	1	68,1	100	155
kein		68,2	100	160
120 kW	2	68,1	100	119
140 kW	0	68,2	100	139

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente weisen hinsichtlich der Durchsatzveränderung der RBG eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen aus dem Kalkulationsmodell auf. Das Kalkulationsmodell konnte somit durch die Experimente erfolgreich validiert werden.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass selbst im Bereich maximaler Transportanforderungen an das RBG eine Leistungsspitzenbegrenzung erreichbar ist.

## AP 8 Dokumentation und Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum wurden mehrere Fachbeiträge erarbeitet und für eine Teilnahme an Konferenzen eingereicht. Die jeweils positiven Begutachtungen berechtigten zur Präsentation eines Vortrags auf der Konferenz. Die Forschungsergebnisse wurden dort einem Fachpublikum vorgestellt und diskutiert. Der schriftliche Konferenzbeitrag wurde anschließend im Tagungsband veröffentlicht.

Eine zusammenfassende Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachzeitschrift *Technische Logistik – Hebezeuge Fördermittel* wird vorbereitet. Die Einreichung ist in 2020 geplant. Weiterhin ist ein Vortrag auf der Fachtagung Technische Logistik in Dresden in 2020 geplant.

Im Berichtszeitraum fanden zwei Treffen des projektbegleitenden Ausschusses statt. Die Forschungsergebnisse wurden in Präsentationen vorgestellt und mit den Industrievertretern diskutiert. Die Zwischenberichte für 2017 und 2018 sowie dieser Schlussbericht wurden erstellt.

Übersicht der projektbezogenen Veröffentlichungen und Vorträge:

- Siegel, A.; Turek, K.; Michelini, E. und 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.
- Turek, K.; Siegel, A. und Schmidt, T.: Elektrische Lastprognose in der Logistik. In: Tagungsband zum Forum Technische Logistik 2018, Dresden, 2018, S. 171–178.
- Turek, K.; Siegel, A. und Schmidt, T.: Berücksichtigung elektrischer Lastspitzen in der ereignisdiskreten Simulation eines Materialflusssystems. In: Tagungsband, 18. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Chemnitz, 2019, S. 144–152.
- Siegel, A.: Classification of electrical Power Peaks of parallel operating Machines, In: The 2019 European Simulation and Modelling Conference. EUROSIS - ETI, 2019, S. 239–245.

### 3. Verwendung der Zuwendung

Im Berichtszeitraum wurden zur Durchführung der Arbeiten 24 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) eingesetzt.

Für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) wurden keine Ausgaben geplant und keine durchgeführt.

### 4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten leisten einen angemessenen Beitrag zum Forschungsvorhaben der Prognose elektrischer Lastspitzen in Materialflusssystemen. Sie waren in Inhalt und Umfang ein notwendiger Teilschritt zur Erreichung des geplanten Forschungsziels.

Die Ergebnisse des Projektes entsprechen den Erwartungen des Arbeitsplans. Zum Erreichen der Zielstellung wurden Mitarbeiter laut Plan beschäftigt.

### 5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Methode entwickelt, die Planern von Materialflusssystemen eine Abschätzung der elektrischen Leistungsspitzen der Systeme in der Planungsphase ermöglicht. Mit Hilfe eines stochastischen Prognosemodells kann für automatische Hochregallager der Umfang der Überlagerungen von Anfahrvorgängen, die üblicherweise zu



signifikanten Leistungsspitzen führen, kalkuliert werden. Die Umsetzung des Prognosemodells mit der Standardsoftware Excel unterstützt KMU beim Ergebnistransfer, da auf auch in KMU verfügbare Software und Bedienkenntnisse aufgebaut wird.

Die entwickelte Vorgehensweise verwendet systemspezifische Informationen, die üblicherweise bereits in der Planungsphase zur Verfügung stehen: die Struktur des Hochregallagers (Anzahl der Gassen und Größe der Regalfront), die technischen Parameter der eingeplanten Regalbediengeräte und die geplante Transportleistung (Anzahl Ein- und Auslagerungen und Doppelspiele). Die Vorgehensweise geht damit über die derzeitige Planungspraxis hinaus, die mit einer Pauschalierung über einen geschätzten Gleichzeitigkeitsfaktor arbeitet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Vorgehensweise zur Begrenzung der Leistungsspitzen eines Lagersystems entwickelt und die Wirkung auf die Transportleistung im System untersucht. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass die mit einer Transportstartverzögerung zur Vermeidung gleichzeitigen Anfahrens von RBG erreichbaren Reduzierungen der elektrischen Lastspitzen signifikant sind und die damit einhergehenden Einbußen der logistischen Transportleistung dagegen geringfügig bleiben.

Ein Softwaretool wurde entwickelt, mit dem die leistungsmindernde Auswirkung einer wirksamen Lastspitzenbegrenzung auf die Transportleistung im Materialflusssystem bereits in der Planungsphase bestimmt werden kann. Das Softwaretool baut auf dem stochastischen Prognosemodell auf und wurde als Demonstrator in Excel implementiert. Das Werkzeug gibt dem Anwender eine Abschätzung über die erreichbaren Reduzierungen der elektrischen Lastspitzen und ermöglicht dem Anwender eine Abwägung über den Einsatz entsprechender steuerungstechnischer Maßnahmen vor der Systeminstallation.

Eine diskret-kontinuierliche Simulationsinfrastruktur wurde entwickelt, die es dem Anwender ermöglicht, detaillierte Modelle der Leistungsbedarfe fördertechnischer Komponenten, z. B. von Regalbediengeräten, innerhalb einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation zu verwenden. Mit dieser Modellkopplung wurde eine Experimentierumgebung aufgebaut, die deutlich über den Status quo der Materialflusssimulation hinausgeht. Auf eine möglichst einfache Anpassung der üblichen Modellierung wurde im Interesse einer hohen Anwenderakzeptanz geachtet.

Eine derartige Experimentierumgebung wurde im Forschungsprojektes aufgebaut und es wurde gezeigt, dass damit Materialflusssysteme mit anwenderindividueller Struktur und Transportlast sowohl hinsichtlich ihrer logistischen Leistungseigenschaften als auch ihrer elektrischen Leistungsbedarfe und Bedarfsspitzen untersucht werden können. Experimente zur Bestätigung der oben genannten Kalkulationsansätze wurden damit durchgeführt.

## 6. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

*Folgende Transfermaßnahmen wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:*

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde der intensive Kontakt mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses gepflegt. Neben den zentralen Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses lag der Schwerpunkt auf bilateralem Austausch über persönliche Gespräche und fernmündliche Kommunikation. In den Erkenntnistransfer wurden Hersteller und Systemlieferanten von Materialflusstechnik (z. B. MLog Logistics GmbH), Logistikdienstleister aus dem Bereich Planung und Beratung (z. B. Logsol GmbH Dresden, SDZ GmbH Dortmund) sowie Verbandsvertreter (VDMA Fachverband Fördertechnik und Logistik) einbezogen.

Fachthemen wie die Modellierung des Leistungsbedarfs und die verwendeten Kennwerte der Fördertechnik wurden in den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses mit den Mitgliedern diskutiert und validiert. Vorschläge für Modifikationen wurden aufgenommen und umgesetzt. Die im Projekt entwickelte Experimentierumgebung wurde den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses vorgestellt. Die Diskussion über Modellierungsansätze, Modellannahmen und Simulationsergebnisse führte zu einem verbesserten Verständnis der Systemzusammenhänge.

Die Forschungsergebnisse wurden im Berichtszeitraum in mehreren Fachbeiträgen für die Teilnahme an Konferenzen zusammengefasst. Die Forschungsergebnisse wurden dort einem Fachpublikum im Vortrag vorgestellt. Der schriftliche Fachbeitrag wurde anschließend im Tagungsband veröffentlicht.

*Folgende Maßnahmen werden nach dem Berichtszeitraum durchgeführt:*

Die wesentlichen Projektergebnisse wurden im Februar 2020 in einer Abschlusspräsentation im Rahmen einer Veranstaltung der Forschungsvereinigung IFL beim VDMA vorgestellt und mit den Vertretern der Industrieunternehmen diskutiert.

Eine zusammenfassende Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachzeitschrift Technische Logistik wird vorbereitet. Hierbei liegt der Fokus der Darstellung auf einer praxisgerechten Aufarbeitung des Forschungsthemas entsprechend dem Leserkreis der Zeitschrift. Die Einreichung ist bis Juni 2020 geplant.

Weiterhin wird eine Präsentation der Ergebnisse auf der Forum Technische Logistik in Dresden (voraussichtlich) im Juni 2020 angestrebt. In den vergangenen Jahren befand sich ein hoher Anteil an Vertreter von KMU unter den Teilnehmern der Veranstaltung.

Das Forschungsthema wurde in einem Promotionsvorhaben aufgegriffen und weiterentwickelt. Die Forschungsergebnisse fließen in die Ausarbeitung einer Dissertation ein, die voraussichtlich in 2020 eingereicht wird.

Mit einem Logistikdienstleister aus dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden Gespräche über eine Weiterentwicklung des Softwaretools und den Einsatz im Unternehmen durchgeführt. Hier kann sich zukünftig eine weitere Forschungszusammenarbeit entwickeln.

Die folgende Tabelle gibt eine zusammenfassende Übersicht der durchgeführten und der noch geplanten Transfermaßnahmen.

**Tabelle 6:** Transfermaßnahmen

<b>Maßnahme</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Zeitraum</b>
Projektbegleitender Ausschuss	1. Sitzung des PA: Vorstellung Arbeitspakete, Evaluierung Vorgehenskonzept, Aufarbeitung Stand der Technik	22.09.2017
Projektbegleitender Ausschuss	2. Sitzung des PA: Modelle elektr. Leistungsbedarf Fördertechnik und Simulationsergebnisse, Auswertung Messungen, Diskussion Lastspitzen und -begrenzung	27.09.2018
Projektbegleitender Ausschuss	Abschlusspräsentation im Rahmen einer Veranstaltung der Forschungsvereinigung IFL mit Industrievertretern	05.02.2020

<b>Maßnahme</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Zeitraum</b>
Ansprache weiterer Unternehmen	Gewinnung zur Mitarbeit im projektbegleitenden Ausschuss, Problemsensibilisierung und Diskussion	02/2017-09/2019
Internetpräsenz	Darstellung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens auf den Internetseiten der Professur für Technische Logistik Adresse: <a href="https://tu-dresden.de/mw/elastprog">https://tu-dresden.de/mw/elastprog</a>	ab 09/2019
Publikationen	Veröffentlichung in Fachzeitschrift Technische Logistik	<i>geplant</i> 06/2020
Vortrag und Beitrag im Tagungsband	Forum Technische Logistik 2018, Dresden	06/2018
	24. Symposium Simulationstechnik, Hamburg	10/2018
	18. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik, Chemnitz	09/2019
	European Simulation and Modelling Conference	10/2019
Beratung von Unternehmen	Kontakte zu weiteren Unternehmen, insb. bei Fachtagungen und Messeteilnahmen (z.B. auf der LogiMAT 2020)	Fortlaufend im Projekt
	Gemeinsames Projekt zur Weiterentwicklung des Softwaretools	<i>geplant in</i> 2020
Wissenschaftl. Qualifikation	Veröffentlichung im Rahmen Dissertation	<i>geplant in</i> 2020
Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Verbreitung der Erkenntnisse durch Absolventen der TU Dresden	ab 2019
	Aufnahme in die Lehrveranstaltungen der Forschungsstelle Materialflusstechnik und Materialflusssysteme	
	Bearbeitung von Teilaufgaben im Rahmen von studentischen Abschluss- und Seminararbeiten	ab 2018

## Quellen

ABB: Auslöse-Charakteristiken für Sicherungsautomaten im Vergleich. ABB Stotz-Kontakt GmbH 2011.

Habenicht, S.: Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen. Dissertation, Technische Universität München, München, 2018.

Herrmann, C.; Thiede, S.; Kara, S. und Hesselbach, J.: Energy Oriented Simulation of Manufacturing Systems – Concept and Application. CIRP 2011, S. 45–48.

Hohnsbein, T.; Klaus, U. und Kiel, E.: Energieeffiziente Antriebe in der Fördertechnik, SPS/IPC/DRIVES Kongress 2010, Nürnberg, 2010.

Kiefer, G.: VDE 0100 und die Praxis: Wegweiser für Anfänger und Profis, 12. Auflage. Berlin: VDE 2006.

Lottersberger, F.: Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik - Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz. Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 2016.

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. und 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.

Stoldt, J.; Schlegel, A. und Putz, M.: Enhanced Integration of Energy-Related Considerations in Discrete Event Simulation for Manufacturing Applications. Journal of Simulation 2016, S. 113–122.

Thies, K.D.: Elementare Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung, Informationstheorie und stochastische Prozesse mit Warteschlangentheorie für Computernetzwerke: mit einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Leistungsanalyse des Ethernets. Berichte aus der Informationstechnik. Shaker, Aachen, 2. Aufl., 2013.