

Evaluation von Simulationsmodellen zur Prognose des Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit empirisch erhobenen Messdaten

Evaluation of simulation models for forecasting the energy demand of stacker cranes with empirically collected data

Meike Braun
Kai Furmans

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Der Einsatz energieeffizienter Systeme hat bei der Entwicklung, Planung und Realisierung von Projekten einen immer steigenden Einfluss. Zur Prognose des Energiebedarfs automatisierter, intralogistischer Systeme stehen derzeit verschiedene Ansätze zur Verfügung. In diesem Artikel wird deshalb die Evaluation von Berechnungsmethoden mit empirischen Messdaten am Beispiel des Regalbediengeräts beschrieben und analysiert. Abschließend werden anhand der Analyseergebnisse des Evaluationsprozesses verschiedene Thesen aufgestellt und untersucht.

[Schlüsselwörter: Evaluation, Simulationsmodell, Messdaten, Regalbediengerät]

The use of energy efficient systems has nowadays an increasing impact in the development, planning and implementation phase of projects. To forecast the energy demand of automated intralogistics systems, different approaches are currently available. In this article, the evaluation of calculation methods is described and analyzed based on empirical data using the example of stacker cranes. Finally, different research theories based on the analytical results of the evaluation process are developed and investigated.

[Keywords: Evaluation, simulation model, empirical measurement data, stacker crane]

1 EINLEITUNG

Energieeffiziente Systeme nehmen in der heutigen Zeit einen immer größer werdenden Stellenwert ein. So werden z.B. neu entwickelte Produkte in Marketingkampagnen im Vergleich zu Vorgänger- oder Konkurrenzprodukten immer häufiger mit verbesserter oder steigender Energieeffizienz beworben. Die Berechnung und Angaben dieser Marketingwerte sind heutzutage aber individuell für bestimmte Einzelfälle erstellt. Damit können die ange-

gebenen Vergleiche teilweise zu irreführenden Aussagen führen.

Zur Vorhersage des Energiebedarfs verschiedener automatisierter, intralogistischer Systeme bei der Planung, Realisierung, oder im Betrieb existieren bereits verschiedene Ansätze. Die Berechnung des Energiebedarfs lässt sich grundsätzlich aus den bekannten mathematischen und physikalischen Zusammenhängen herleiten. Dabei treffen eine Vielzahl von zeit- und zufallsabhängigen Systemgrößen, sowie stark vernetzte Wirkzusammenhänge aufeinander.

In diesem Beitrag werden zuerst verschiedene Berechnungsmethoden vorgestellt und erläutert. Da jedes Modell eine Vereinfachung der Realität darstellt, ist es zur hinreichend genauen Prognose des Energiebedarfs damit unbedingt erforderlich die Ergebnisse von abstrahierten Modellen mit real erhobenen Messdaten zu vergleichen. Deshalb muss nach der Erstellung von Systemmodellen der Gültigkeitsbereich und die Güte der Modelle in einer umfangreichen Evaluation untersucht werden. Eine allgemeine, standardisierte Vorgehensweise zur Evaluation von Systemmodellen mit Hilfe von empirisch erhobenen Messdaten wurden bereits in [Bra14] vorgestellt. Die Ermittlung und Vorgehensweise der Energie- und Leistungsmessdaten war Bestandteil in [Bra15]. Mit diesem Beitrag wird letztendlich die Evaluation der Systemmodelle mit den Messdaten durchgeführt und die Leitfragestellung beantwortet:

„Wie genau kann der Energiebedarf von automatisierten Regalbediengeräten mit Hilfe von verschiedenen Quantifizierungsmethoden prognostiziert werden?“

Ausgehend von den Analyseergebnissen des Evaluationsprozesses werden abschließend verschiedene Thesen untersucht und mögliche Begründungen diskutiert.

2 BERECHNUNGSMETHODEN ZUR ERMITTLUNG DES ENERGIEBEDARFS VON REGALBEDIENGERÄTEN

Der Energiebedarf von Regalbediengeräten kann über verschiedene Methoden quantifiziert werden, die von einer einfachen groben Abschätzung bis hin zu detaillierten parameterbasierten Schwingungs-Simulationsmodellen reichen. Interessant sind dabei verschiedene Fragen, z.B. kann mit einer geringen Anzahl an Parametereingabewerten ein hinreichend genaues Ergebnis erzielt werden, oder wie stark verbessert sich die Genauigkeit des Ergebnisses, wenn weitere Parameter zur Beschreibung des Gesamtsystems hinzugefügt werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden in [Bra16] deshalb drei Methoden untersucht, die in Abbildung 1 dargestellt sind:

- Die statische Quantifizierung, die auf Basis einer Bewegung des RBGs mit konstanter Geschwindigkeit die mechanischen Energien bilanziert und mit Hilfe eines Gesamtwirkungsgrads in elektrische Energien umrechnet.
- In Methode 2 werden ausgehend einer konstant beschleunigten Bewegung des RBGs unter Berücksichtigung von Fahr-, Roll- und Luftwiderständen die mechanischen Energien bilanziert und mit Hilfe eines Gesamtwirkungsgrads in elektrische Energien umrechnet.
- Methode 3 beinhaltet die Ermittlung des Energiebedarfs in Form eines Simulationsmodells, das auf Grundlage der Modellierung des Antriebsstrangs in die Übertragungsglieder Fahr- bzw. Hub-Senk-Prozess, Getriebe, Motor und Leistungselektronik aufgeteilt ist. Die Bewegung des RBGs kann dabei über eine konstant beschleunigte Bewegung sowie einer 7-Phasen-Fahrt in der Variante „konstanter Ruck“ sowie in der Variante „konstante Ruckzeit“ abgebildet werden.

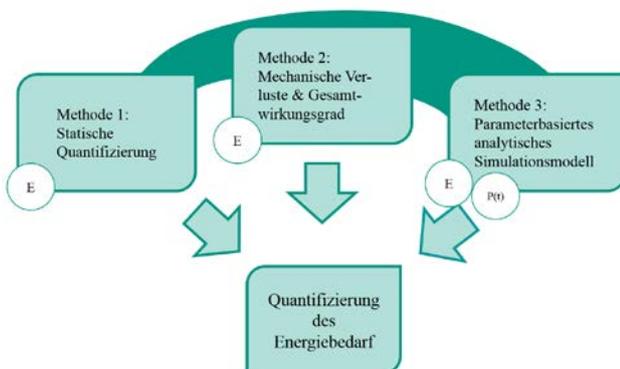


Abbildung 1. Illustration der Quantifizierungsvarianten des Energiebedarfs mit steigendem Detaillierungsgrad [Bra16]

Während mit Methode 1 und 2 ausschließlich der Energiebedarf quantifiziert werden kann, sind die Ausgabegrößen des Simulationsmodells sowohl die Darstellung einer Leistungsbilanz über der Zeit als auch die Ermittlung des Energiebedarfs. Der Energiebedarf kann dabei als Anfahrt einzelner Lagerfächer angegeben werden sowie als mittlerer Energiebedarf (Mittelwert des Energiebedarfs der Fachanfahrten aller Lagerfächer einer Lagergasse).

Jedes Modell stellt eine Vereinfachung der Realität dar und basiert auf verschiedensten Modellannahmen. So gelten für die Methoden u.a. folgende Abstraktionen:

- Es wird ein Regalbediengerät, in einer Regalgasse mit einfachtiefen, homogenen Lagerplätzen betrachtet, deren Zugriff nur von der Stirnseite erfolgt
- Aufträge stehen als Inputgrößen an der Systemgrenze ohne Wartezeiten, in endlicher, aber nicht weiter quantifizierter Anzahl bereit.
- Das Regalbediengerät kann parallele Bewegungen (Fahr- und Hubbewegungen) ausführen.
- Das Regalbediengerät kann Lagerfächer synchron erreichen, d.h. Fahr- und Hubantrieb erreichen zeitgleich das jeweilige Lagerfach.

Die vollständige Auflistung der Annahmen ist in [Bra16] zu finden. Die bei der Verwendung aller Annahmen entstandenen Fehler müssen durch die Durchführung der Evaluation untersucht werden um so die Prognosefähigkeit der Modellierungsmethode angeben zu können. Dafür müssen Messdaten empirisch an charakteristischen Regalbediengeräten erhoben und statistisch aufbereitet werden.

3 ERHEBUNG VON MESSDATEN

Die Erhebung dieser Messdaten erfolgte nach der Vorgehensweise in Anlehnung an [Bra14]. Die Methode beinhaltet nach der Beschreibung der Systemgrenze, die Definition der Kenn-, Eingangs-, Ausgangs- und Messgrößen sowie deren Abhängigkeiten. Danach kann ein Versuchsplan erstellt werden. Die Vorbereitung der Messungen setzte sich zusammen aus der Auswahl des geeigneten RBGs, die Wahl des Messgeräts, des Messprinzips, des Messszenarios und der Anzahl an gleichartigen Wiederholungen. Hierzu wurde in [Bra15] gezeigt, unter welchen Voraussetzungen reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden können. Nach der Durchführung können die Messwerte ausgewertet und statistisch analysiert, interpretiert und bewertet werden.

Für die Auswertung und Analyse der Messdaten empfiehlt sich eine möglichst hohe Abtastrate festzulegen. Dabei wird vorgeschlagen alle 10ms einen neuen Mess-

wert für alle gewünschten Größen zu ermitteln und aufzuzeichnen [Bra15]. Meistens muss aufgrund begrenzt einstellbarer Möglichkeiten am Messgerät jedoch mit einer höheren Abtastrate gemessen werden. Nach der Aufzeichnung muss das gemessene Signal mit Messfiltern bearbeitet werden, da Messungenauigkeiten durch Messrauschen oder andere physikalische Auffälligkeiten, wie z.B. Temperaturschwankungen, entstehen. Abbildung 2 zeigt ein ungefiltertes und ein gefiltertes Messsignal zur Verdeutlichung der Thematik.

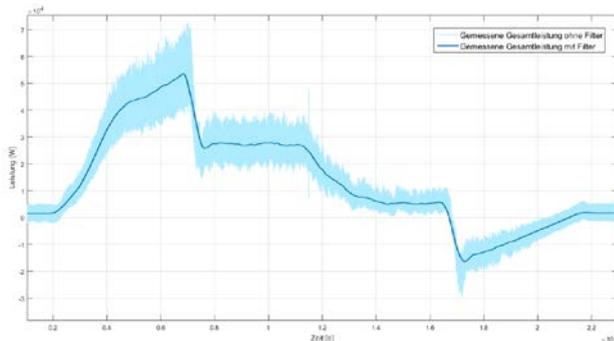


Abbildung 2. Auswertung der Messung ohne und mit Filter des RBGs der Fahrt von (3/1) zu (17/11).

Anhand dieser Vorgehensweise wurden fünf Regalbediengeräte untersucht und der Leistungsverlauf über der Zeit für verschiedene Fahrten gemessen. Insgesamt standen damit 31 Lagerfachfahrten mit durchschnittlich 83 identischen Wiederholungen zur Analyse zur Verfügung, die ausführlich in [Bra16] beschrieben sind.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Leistungsverlauf von RBG Nr. 3, das mit einer Rückspeiseeinheit und Zwischenkreiskopplung ausgestattet ist, bei einer Fahrt von (3/1) zu (17/11) zu (3/1), d.h. einer Diagonalfahrt des RBGs mit parallelem Einsatz des Fahr- und Hubantriebs.

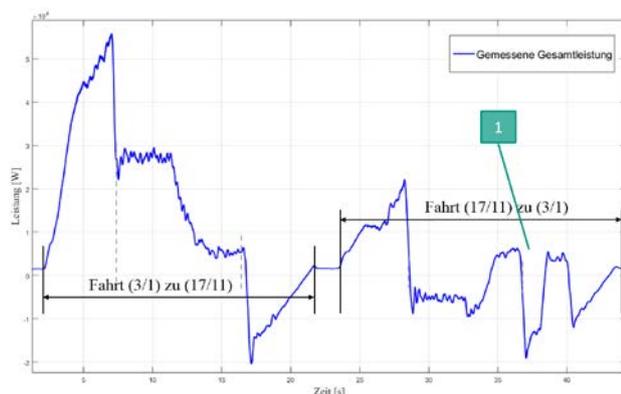


Abbildung 3. Fahrt von (3/1) zu (17/11) zu (3/1) von RBG Nr.3 mit dominierenden Fahranteilen in gestrichelten Linien

Die Hinfahrt ist dabei dominiert in drei Bereiche:

- Beschleunigung:
Die Beschleunigungsphase ist gekennzeichnet durch zwei Steigungen. Die erste Steigung zeigt

beide Antriebe in der Beschleunigung, während danach der Hubantrieb bereits in die Konstantfahrt übergeht und der Fahrtrieb sich immer noch in der Beschleunigung befindet.

- Konstantfahrt:
Zu Beginn sind beide Antriebe in der Konstantfahrt bis der Hubantrieb abbremst und das RBG seine Zielposition in y-Richtung erreicht hat. Danach befindet sich nur noch der Fahrtrieb in der Konstantfahrt.
- Abbremsen:
Beim Abbremsen ist ausschließlich der Fahrtrieb zu sehen.

Bei der Rückfahrt sind ebenfalls drei dominierende Bereiche erkennbar, die sich jedoch zur Hinfahrt unterscheiden:

- Beschleunigung:
Während der Beschleunigungsphase ist das gleiche Verhalten wie bei der Hinfahrt beobachtbar. Beide Steigungen hängen von den jeweiligen unterschiedlichen Zeitanteilen der Beschleunigungsphase ab.
- Konstantfahrt:
Die Konstantfahrt ist ebenfalls gekennzeichnet durch das frühere Erreichen der y-Position des RBGs, weshalb gegen Ende der Konstantfahrt das Leistungsniveau das Plateau der Konstantfahrt der Hinfahrt erreicht, da ausschließlich der Fahrtrieb im Einsatz ist.
- Abbremsen:
Zu Beginn des Abbremsvorgangs senkt sich das Leistungsniveau wie bei der Hinfahrt auf den minimalen Wert. Danach wird jedoch wieder das Ausgangsniveau während der Konstantfahrt erreicht (Kasten 1). Dabei ist unklar, warum der Antrieb nochmals beschleunigt, da er sich ja bereits im Abbremsvorgang befindet. Der Leistungsverlauf könnte darauf hindeuten, dass eine Positionsfahrt durchgeführt wurde, die mit reduzierter Fahrgeschwindigkeit angesetzt ist. Die gleiche Höhe des Leistungsniveaus lässt jedoch vermuten, dass es keine erhebliche Reduzierung sein muss. Der genaue Sachverhalt bedarf weiterer Forschungsuntersuchungen.

Die Fläche unter der Leistungskurve ist der benötigte Energiebedarf. Die Auswertung der Energiebedarfe aller Leistungsmessungen kann auf unterschiedliche Weise dargestellt werden. In Abbildung 4 sind zwei Möglichkeiten (Punktwolken und Boxplot) gezeigt.

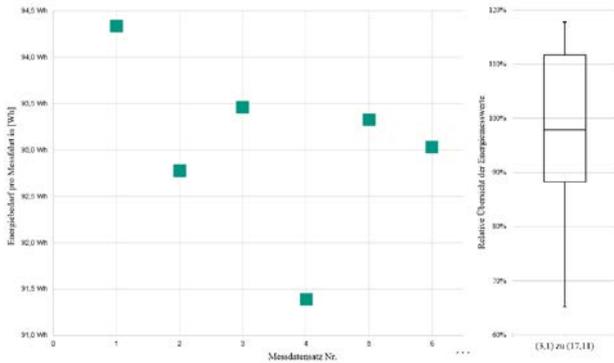


Abbildung 4. Darstellung der Energiewerte links als Punktediagramm und rechts als Boxplot-Diagramm für die Fahrt (3/1) zu (17/11)

Zusammenfassend lassen sich damit Genauigkeiten zwischen 1-5 % mittlerer Abweichung der Messstreuung zum Mittelwert des jeweiligen Messdatensatzes feststellen.

4 EVALUATION DER BERECHNUNGSMETHODEN ANHAND DER EMPIRISCH ERHOBENEN MESSDATEN

Durch die Anwendung von Abstraktionen bei der Modellbildung müssen nun die gemessenen und berechneten Werte miteinander verglichen werden. Dabei ist neben der Verifikation auch eine Validierung der Modelle durchzuführen. Als Evaluation wird die „sach- und fachgerechte“ Bewertung der Modelle gesehen [Hei11]. Die Analyse der Evaluationsergebnisse veranlasst dann entweder zu weiteren Messungen oder einer Veränderung des Modellsystems, woraufhin sich der Kreislauf der Modellierung des veränderten Systems und die erneute Überprüfung schließt.

Die Evaluation der drei Berechnungsmethoden erfolgte für die fünf Regalbediengeräte – ein Regalbediengerät für den Behälter- und vier Regalbediengeräte für den Paletteneinsatz. Drei der Schwerlast-Regalbediengeräte waren baugleiche RBGs, die in einem gemeinsamen Lager eingesetzt werden. [Bra16]

Nach ersten Analysen wurde für Methode 3 „Simulationsmodell“ ausschließlich eine Kalibrierung der kinematischen Parameter durchgeführt, da Unstimmigkeiten zwischen Herstellerangaben und realen Daten festgestellt wurden. Für Methode 1 „Statische Quantifizierung“ und Methode 2 „Mechanische Verluste & Gesamtwirkungsgrad“ wurde dagegen variabel einstellbare Parameter nach den Methoden „ex post“ und „ex ante“ kalibriert. Ex post heißt, dass ein nachfolgender Zeitpunkt, und ex ante, dass ein vorhergehender Zeitpunkt auf ein zu beurteilendes Handeln bewertet wird. Bei der ex post Kalibrierung wurden deshalb alle Messdaten verwendet, während bei der ex ante Version nur 40 % zur Einstellung und die restlichen Daten zum Sollwert-Vergleich herangezogen wurden. [Bra16]

Als Evaluations- und damit Vergleichsgrößen dienen der Energiebedarf und der Leistungsverlauf über der Zeit. Abbildung 5 zeigt ein Leistungsdiagramm für die Fahrt (3/1) zu (251/25) von RBG Nr.3 in der Überlagerung des Simulationsmodells und der realen Messung. Der Verlauf beider Kurven ist in den einzelnen Phasen nachvollziehbar.

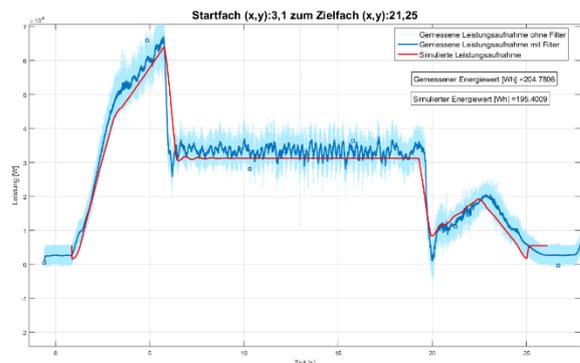


Abbildung 5. Leistungsdiagramm für Fahrt (3/1) zu (21/25) Messung am RBG Nr. 3 und simulierter Verlauf aus Modell 3 in der Bewegungsform 7-Phasen-Fahrt – Variante „Konstanter Ruck“

Nach Analyse aller Messdaten und Untersuchung der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werte können die Genauigkeiten der verschiedenen Prognosemethoden angegeben werden. Zusammenfassend zeigt Tabelle 1 einen Auszug aus den Ergebnissen für den Energiebedarf. Dabei sind die Ergebnisse für Methode 2 ex post „Mechanische Verluste & Gesamtwirkungsgrad“ sowie für Methode 3 „Parameterbasiertes, detailliertes Simulationsmodell“ in der Bewegungsform 7-Phasen-Fahrt – Variante „Konstanter Ruck“ (kurz Methode 3-2) dargestellt:

Tabelle 1. Übersicht zweier Regalbediengeräte und die Genauigkeiten von Methode 2 und Methode 3 in der Variante „Konstanter Ruck“ (kurz Methode 3-2)

| | RBG Nr.2 | RBG Nr.3 | Ø aller RBGs |
|-------------------|----------|-----------|--------------|
| Methode 2 ex post | 15% ± 3% | -12% ± 3% | 30% ± 11% |
| Methode 3-2 | -6% ± 3% | 9% ± 3% | 24% ± 11% |
| Ø aller Methoden | 24% ± 3% | 20% ± 3% | |

Damit konnte in [Bra16] die Leitfrage beantwortet werden, mit welcher Genauigkeit die Bewertungsmethoden bei den durchgeführten Messungen den Energiebedarf von Regalbediengeräten prognostizieren können. Aus den in [Bra16] entwickelten Ergebnissen kann damit zur Energiebedarfsprognose sowohl eine einfachere Abschät-

zungsformel als auch ein detailliertes Simulationsmodell empfohlen werden. Die Auswahl der jeweiligen Methode hängt davon ab, ob bereits die ausreichende Anzahl an Parameterwerte zur Verwendung des Simulationsmodells vorhanden ist oder nicht. Wird in einer Planungsphase hingegen vorab eine erste Abschätzung benötigt, so kann mit der hier vorgestellten Methode 2 eine relativ gute Abschätzung abgegeben werden.

5 THESEN DER ANALYSEERGEBNISSE DES GESAMTPROZESS

Während der Evaluation und der Analyse der Messdatensätze entstanden verschiedene Hypothesen, die nachfolgend genauer untersucht werden sollen. Die Thesen sind dabei in verschiedene Handlungsbereiche geclustert und werden anschließend begründet.

5.1 FAHRTEN DES REGALBEDIENGERÄTS

These 1: Der Energiebedarf von kombinierten Fahr- und Hubbewegungen ist besser prognostizierbar als von kombinierte Fahr- und Senkbewegungen.

Die Messszenarien in [Bra16] kombinierten sowohl Fahr- und Hubbewegung als auch Fahr- und Senkbewegungen. Bei der Analyse der Evaluationsergebnisse wurden t-Tests durchgeführt mit der H_0 Hypothese: Der Mittelwert der Berechnungsmethode liegt nicht im Signifikanzniveau des Messdatensatzes. Bei der Analyse dieser Werte wurde festgestellt, dass tendenziell mehr Kombinationen aus Fahr- und Hubbewegung als kombinierte Fahr- und Senkbewegungen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,01$ identifiziert werden konnten. Dies lässt vermuten, dass kombinierte Fahr- und Hubbewegungen damit besser prognostizierbar sind als kombinierte Fahr- und Senkbewegungen.

These 2: Längere Fahr- und Hub-/Senkdistanzen sind besser prognostizierbar als kurze Fahr- und Hub- / Senkdistanzen.

Aus den Ergebnissen des oben beschriebenen t-Tests konnte diese Tendenz bei gleichem Signifikanzniveau von $\alpha=0,01$ identifiziert werden. Eine Begründung ist die bewährte Modellierung von Normalfahrten, d.h. Bewegungen, bei denen die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung erreicht wird, im Gegensatz zur Modellierung sogenannter Spitzfahrten, die einer deutlichen Variation der Werte unterliegen kann.

5.2 MODELLIERUNG UND ANALYSE VON ENERGIEEFFIZIENZMAßNAHMEN

These 3: Die Modellierung von Rückspeiseeinheiten ist mit gängigen Annahmen nicht realisierbar.

Begründet wird diese These auf den Analyseergebnissen der Messdatensätze kombinierter Fahr- und Senkbewegungen bei Regalbediengeräten mit Rückspeiseeinheiten, z.B. von RBG Nr. 3, Kasten 1 in Abbildung 3. Im Abbremsvorgang aller Messszenarien, die eine Senkbewegung beinhalten, führt das RBG keine üblichen Bewegungen durch. Auch nach Diskussion mit RBG-Herstellern und Antriebsherstellern konnte bisher keine qualifizierte Erklärung für das jeweilige Verhalten gefunden werden. Da die Messdatensätze nicht unumstritten interpretiert werden können, ist eine Abstraktion in Form von Modellannahmen nicht möglich. Damit liefern Modellierungen ohne weiteren Forschungsbedarf mit gängigen Annahmen für die Abbremsphase nicht nachvollziehbare und damit nicht realitätsnahe Verläufe.

5.3 VERHALTEN DES ENERGIEBEDARFS UND DER ZEIT PRO MESSREIHE

Unter einer Messreihe wird in diesem Beitrag ein ununterbrochen aufgenommener Messdatensatz eines Messszenarios, z.B. einer Fachanfahrt, an einem RBG ohne zwischenzeitliche Abkühlphasen verstanden.

Die Thesen stützen sich dabei auf den folgenden Sachverhalt, der in Abbildung 6 dargestellt ist:

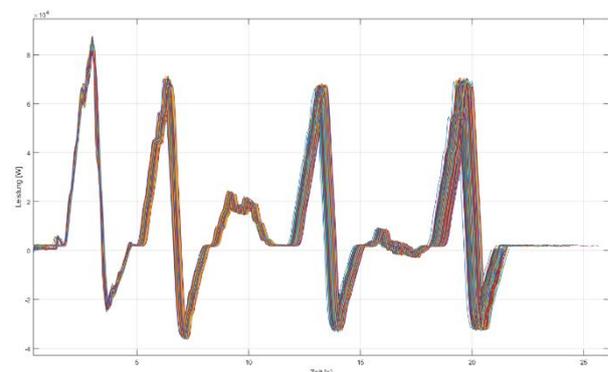


Abbildung 6. Leistungsverlauf des Energie-Evaluations-Referenzmesszyklus am Beispiel RBG Nr.2 für alle 322 reproduzierbaren Messungen. [Bra16]

Der Messzyklus wurde 322-mal reproduzierbar wiederholt. Pro gemessener Messreihe sind dabei durchschnittlich vier gleichartige Messdatensätze, d.h. Fahrten zu den jeweiligen Lagerfächern, durchgeführt worden.

These 4: Bei der Wiederholung gleichartiger Messreihen hat die erste durchgeführte Fahrt des RBGs den größten Energiebedarf.

Der Energiebedarf zum Lüften der Bremse wurde bei allen Fahrten nicht berücksichtigt. Da jedoch die Verbraucher des RBGs ohne Warmlauf bewegt wurden, deutet diese These darauf hin, dass mit steigender Anzahl an Wiederholungen die steigende Betriebstemperatur zu einem effizienteren Betriebspunkt, zu einem effizienteren Wirkungsgrad und damit zu einem niedrigeren Energie-

bedarf führt. Ab einer zu häufigen Wiederholung jedoch führt die steigende Betriebstemperatur aufgrund von Überhitzung erneut zu einem höheren Energiebedarf. In der in [Bra16] durchgeführten Wiederholungsanzahl konnte dieses Phänomen jedoch nicht beobachtet werden und muss daher in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

These 5: Bei Messreihen hat die letzte durchgeführte Fahrt des RBGs die längste Fahrtdauer.

Als kurze Fahrtdauer wird dabei die Spielzeit kleiner als das 25 %-Quantil verstanden. Lange Fahrtdauern sind als Spielzeiten größer als das 75 %-Quantil der gemessenen Spielzeitdatensätze definiert.

Die mit häufigeren Wiederholungen längere Fahrzeit könnte darauf hindeuten, dass durch das Aufschwingen des Systems die maximalen kinematischen Parameterwerte nicht mehr erreicht werden und damit längere Zeiten pro Fahrt benötigt werden. Auch dieser Sachverhalt muss in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

5.4 GÜLTIGKEIT DER BERECHNUNGSMETHODEN

Aufgrund der betrachteten Analysen der Messdatensätze und Evaluationsergebnisse müssen folgende Thesen aufgestellt werden:

These 6: Die Messstreuung muss bei der Angabe der Gültigkeit der Berechnungsmethoden berücksichtigt werden.

Bei [Bra16] liegt die Messstreuung bei 1-5 % und wurde bei den jeweiligen Evaluationen berücksichtigt.

These 7: In der Realität sind heutzutage keine „baugleichen“ Regalbediengeräte zu finden.

In [Bra16] wurden laut Herstellerangaben drei „baugleiche“ Regalbediengeräte untersucht. Beispielhafte Leistungsverläufe der drei Geräte für die aufgezeichnete Messung der Fahrt von (3/1) zu (21/25) zu (3/1) zeigen Abbildung 7 und 8:

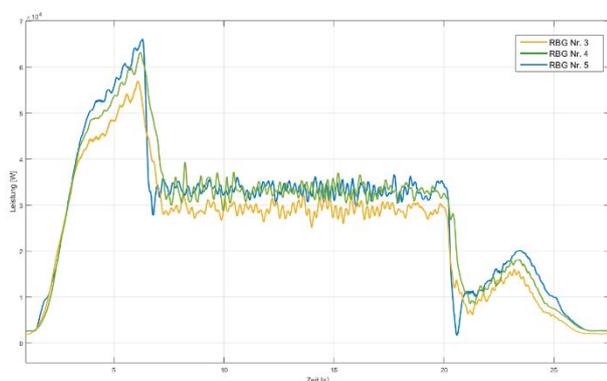


Abbildung 7. Messung der drei als baugleich bezeichneten RBGs für die Fahrt von (3/1) zu (21/25)

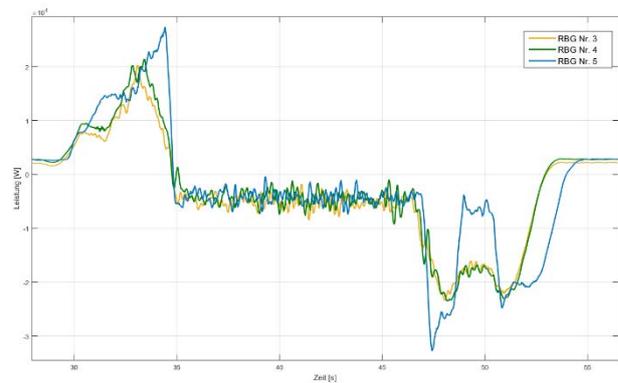


Abbildung 8. Messung der drei als baugleich bezeichneten RBGs für die Fahrt von (21/25) zu (3/1)

Die Unterschiede der drei Regalbediengeräte sind in beiden Diagramme in allen Bewegungsphasen sowohl bei der Hin- als auch bei der Rückfahrt erkennbar. Es gibt bei allen betrachteten Analysen keinen Zusammenhang zwischen kombinierten Fahr- und Hubbewegungen oder kombinierten Fahr- und Senkbewegungen. Weiterhin zeigten Diskussionen mit RBG-Herstellern und Antriebsherstellern an dieser Stelle keine qualifizierten Erkenntnisse. Deutlich zu sehen ist jedoch, dass „baugleiche“ Geräte verschieden hohe Leistungsniveaus und damit unterschiedliche Energiebedarfe benötigen. Begründet wird die These u.a. auch darin, dass heutzutage Regalbediengeräte bei der Montage oder Instandhaltung häufig von unterschiedlichen fachkundigen Personen eingestellt werden und damit jedes Regalbediengerät einem gewissen Streuverhalten unterliegt, z.B. bei der Einstellung der Fahrräder. Solange sich an diesem Zustand nichts ändert, sollte der Begriff „baugleich“ vermieden werden.

Für RBG Nr. 3, Nr. 4 und RBG Nr. 5 sind weitere Forschungsarbeiten, Messungen und Untersuchungen vor Ort geplant zur Klärung der individuellen Steuerungs- und Parameterwerteinstellungen.

These 8: Aussagen zur Gültigkeit der Berechnungsmethoden müssen in Abhängigkeit der durchgeführten Messszenarien und betrachteten realen Systeme relativiert betrachtet werden.

Bei der Analyse u.a. der Leistungsdiagramme „baugleicher“ Regalbediengeräte, verschiedener Lagerfachfahrten und unterschiedlicher Anzahl an reproduzierbaren Messdatensatzwiederholungen wurden jeweils variierende Ergebnisse festgestellt, die alle direkten Einfluss auf die Gültigkeit der jeweiligen Berechnungsmethode haben. Deshalb müssen die Empfehlungen zur Verwendung der Methoden sowie deren Gültigkeitsbereich immer in Bezug auf die Evaluationskenngrößen bezogen werden und dürfen nicht pauschalisiert werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurden zur Prognose des Energiebedarfs von automatisierten Regalbediengeräten verschiedene Quantifizierungsmethoden vorgestellt. Diese beinhalteten drei verschiedene Methoden, die aufbauend auf den Grundlagen der physikalischen, mechanischen, elektrischen und mathematischen Formeln zur Berechnung des Energiebedarfs von einer einfachen Abschätzungsformel bis hin zu einem detaillierten und umfangreichen Simulationsmodell reichen.

Die zur Evaluation der Berechnungsmethoden benötigten empirischen Messdatensätze wurden an fünf Regalbediengeräten sowie von verschiedensten Messszenarien ermittelt, sodass knapp 3.400 Messdatensätze zur Evaluation zur Verfügung standen.

Für die aufgestellten, evaluierten Quantifizierungsmethoden kann sowohl eine einfache Grobabschätzungsformel, als auch eine detaillierte Variante des Simulationsmodells empfohlen werden, die je nach aktueller Situation und Anzahl an vorhandenen, zur Beschreibung benötigter Parameterwerte empfohlen werden.

Abschließend wurden Thesen der Analyseergebnisse des Evaluationsprozesses aufgestellt und untersucht sowie mögliche Begründungen erörtert.

Die Ergebnisse dieses Artikels basieren auf den in [Bra16] analysierten und entwickelten Ergebnissen.

LITERATUR

- [Bra14] Braun Meike, Kramer Jochen, Furmans Kai: *Validierung intralogistischer Systemmodelle anhand gemessener Kenngrößen*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2014, München 2014
- [Bra15] Braun Meike, Kramer Jochen, Furmans Kai: *Reproduzierbarkeit empirischer Erhebungen von Messdaten unter Anwendung statistischer Implikationen*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2015, Duisburg 2015
- [Bra16] Braun Meike: *Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten*. Dissertation (Veröffentlichung geplant in 2016) Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2016
- [Hei11] Heinrich Lutz J., Heinzl Armin, Riedl Rene: *Wirtschaftsinformatik: Einführung und Grundlegung*. 4., überarb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer, 2011 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-642-15425-6

Dipl.-Ing. Meike Braun is working as head of the department of Warehouse and Material Handling Technology, Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Between 2006 and 2011 Meike Braun studied mechanical engineering at KIT. Since November 2011 she works at IFL, in July 2016 she graduated. Her research topics are simulation, measurements, and improvement of overall energy efficiency of material handling systems.

E-Mail: Meike.Braun@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans is the head of Institute for material handling and logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

E-Mail: Kai.Furmans@kit.edu

Address: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Building 50.38, Gotthard-Franz-Str.8, 76131 Karlsruhe, Germany. Tel.: +49 721-608-48638, Fax: +49 721-608-48629