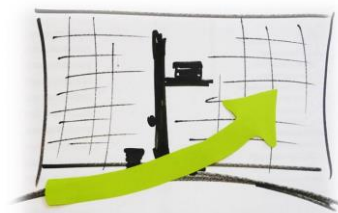


Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Energiebedarfsberechnung von Regalbediengeräten

von

Dipl.-Ing. Meike Sophie Anna Braun



Kontaktdaten:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Gotthard-Franz-Str. 8
76131 Karlsruhe
Tel: 0721 / 608 48638
Fax: 0721 / 608 48629
E-Mail: Meike.Braun@kit.edu

für die Ausschreibung der Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg

„Wie geht Klimaschutz morgen?“

Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Energiebedarfsberechnung von Regalbediengeräten

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 und meist noch nicht mit Hilfe eines einheitlichen, standardisierten Vorgehens ermittelt. Damit können die angegebenen Vergleiche teilweise zu irreführenden Aussagen führen. Auch bei ersten Analysen und Gesprächen mit Industrieunternehmen wurde deutlich, dass zur Ermittlung und Vorhersage des Energiebedarfs von automatisierten Anlagen kaum bis gar keine Erfahrungen existent sind. Damit wird deutlich, dass in diesem Themenfeld noch deutlicher Forschungsbedarf besteht.

Dieser Beitrag stellt ein Auszug aus der Dissertation „Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Energiebedarfsberechnung von Regalbediengeräten“ dar. Nach einer kurzen Motivation, dem Ziel der Arbeit und der Beschreibung des Umfelds werden kurz die erarbeiteten Prognosemodelle angerissen. Anschließend wird knapp die Evaluation auf Korrektheit und Gültigkeit der Modelle sowie mögliche Handlungsempfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Regalbediengeräten aufgezeigt. Ein Resümee und mögliche Anwendungsfelder der Arbeit schließen diesen Beitrag.

Einleitung, Motivation und Ziel der Arbeit

Die Verteilung von Waren findet in allen Branchen und Bereichen des täglichen Lebens statt. Eine Möglichkeit die produzierten Waren auf dem Absatzmarkt zur richtigen Zeit am richtigen Ort zu positionieren, kann mit Hilfe eines Verteilzentrums, eines sogenannten Distributionszentrums, erfolgen. Ein Distributionszentrum umfasst viele Prozesse, u.a. den Lager- und Kommissioniervorgang. Dieser Prozess ist in fast jedem Distributionszentrum unabhängig der Branche zu finden, obgleich er einer der teuersten und arbeitsintensivsten Prozesse darstellt. Unter Lagern und Kommissionieren werden im Allgemeinen die Einlagerung, die Lagerung, die Entnahme von Waren sowie die Entsorgung von Ladungsträgern oder Verpackungsmaterial verstanden. Ein leistungsfähiges Distributionszentrum ermöglicht damit einem handelnden oder produzierenden Unternehmen seine Wettbewerbsstellung zu sichern und ihm einen Konkurrenzvorsprung einzubringen.

Heutige Unternehmen stehen vor allem im Spannungsfeld aus steigenden Energie- und Rohstoffpreisen, der aktuell geführten Klimadebatte und verschärften umweltpolitischen Reglementierungen. Diese ökonomischen Aspekte stehen dabei sehr häufig im Gegensatz zu ökologischen Standpunkten. Der Wettbewerb heutiger Unternehmen umfasst aber neben den ökonomischen Faktoren auch vermehrt ökologische Handlungsfelder. Da Energieeinsparungen i.d.R. sowohl die Kosten senken als auch Nachhaltigkeit von natürlichen Ressourcen bieten, stellen sie inzwischen bei den Unternehmenszielen einen bedeutenden Faktor dar. Zur

Vorhersage der Energiekosten, und damit des Energiebedarfs, existieren bereits verschiedene Ansätze. Die Berechnung des Energiebedarfs lässt sich grundsätzlich aus den bekannten physikalischen und elektrotechnischen Zusammenhängen herleiten. Weiterhin gewinnen die Energievorhersagen zunehmend an Bedeutung, da sowohl europäische Regularien zur Bestimmung des Energiebedarfs von automatisierten Anlagen entstehen, als auch durch derartige Prognosetools mögliche Varianten bestehender Systeme untersucht und verbessert werden können. Mit Hilfe der aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Energie und somit auch direkte Kosten, Schad-, Betriebs- und Rohstoffe in den Anlagen reduzieren.

Bei der Quantifizierung des Energiebedarfs treffen eine Vielzahl von zeit- und zufallsabhängigen Systemgrößen, sowie stark vernetzte Wirkzusammenhänge aufeinander. Deshalb können verschiedene Berechnungsalternativen zur Abschätzung angewandt werden. Im ersten Teil der Dissertation werden verschiedene Alternativen nach dem Prinzip „Vom Groben zum Feinen“ zur Berechnung des Energiebedarfs hergeleitet und implementiert. Jedes Modell ist dabei nur so gut, wie es für seinen definierten Geltungsbereich gültige und richtige Ergebnisse liefert. Deshalb muss nach der Erstellung von Systemmodellen der Gültigkeitsbereich und die Güte der Modelle untersucht werden. Eine allgemeine, standardisierte Vorgehensweise zur Evaluation von Systemmodellen mit Hilfe von empirisch erhobenen Messdaten konnte bisher nicht gefunden werden. Deshalb wird in dieser Arbeit eine Methode entwickelt und vorgestellt mit dem Ziel, aufgestellte Modelle, welche hier als Energieprognose für Anlagen dienen, anhand realer Kenngrößen zu evaluieren. Das Potential zur Senkung des Energiebedarfs soll abschließend in Form ausgewählter strategischer und technischer Energieeffizienzmaßnahmen untersucht werden. Ziel dieser Arbeit ist neben dem Aufzeigen von Möglichkeiten zur Bestimmung des Energiebedarfs die Angabe, wie die Genauigkeit mit Hilfe empirischer Versuche ermittelt werden kann. Damit ergibt sich die Leitfragestellung der Arbeit zu:

Wie genau kann der Energiebedarf von automatisierten Regalbediengeräten anhand von verschiedenen Quantifizierungsalternativen prognostiziert werden?

Automatisches Hochregallager

Das Herzstück des Lager- und Kommissioniervorgangs ist in vielen Distributionszentren das Hochregallager, worin das am häufigsten eingesetzte Fördermittel das Regalbediengerät (kurz: RBG) ist. Ein regalabhängiges Regalförderzeug ist dadurch gekennzeichnet, dass es mit dem Regal eine funktionsmäßige Einheit bildet und für Ein- und Auslagerungsvorgänge von Lagergütern in einer Regalanlage gedacht ist. Die weit verbreitete Variante eines Regalbediengeräts besteht aus einem bodenverfahrenden vollautomatischen Einmast-Regalbediengerät ohne Bedienpersonal mit geregelter Antrieb. Die Bestandteile können differenziert werden in Tragwerk, das aus den Untergruppen Mast, Fahrwerk und Hubwagen besteht, in Fahrwerk, in Hubwerk und in das Lastaufnahmemittel (kurz: LAM). Der Hubwagen bewegt sich in vertikale Richtung am Mast entlang (y-Richtung), während das Fahrwerk in horizontaler Richtung auf Schienen (x-Richtung) fährt. Der Fahr- und der Hubantrieb sowie der Antrieb des LAM dienen der Ausführung der Bewegung in die drei Raumrichtungen. Die Aufgabe

des Masts ist die Übernahme des Biegemoments des exzentrisch angreifenden Lastgewichts und die Gewährleistung der Führung des Hubwagens mittels Führungsrollen bei den Hub- und Senkbewegungen. Die Abstützung des Mastkopfes in z-Richtung erfolgt mit Hilfe seitlicher Führungsrollen an den Führungsschienen. Trotz Abstützungen kann es zu Spiel und damit zu Schwingungen kommen, welche ebenfalls einen erkennbaren Einfluss auf den Energiebedarf haben. Das Fahrwerk (hauptsächlich Laufräder und Antrieb) stellt den Rahmen dar, an dem der Mast befestigt ist. Auf dem Hubwagen befindet sich das LAM, das die Aufgabe hat Ladeeinheiten aufzunehmen oder abzugeben.

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Hochregallage (links) mit jeweils 4 Regalbediengeräten und einer Detaildarstellung des meist eingesetzten Einmast-Regalbediengeräts (rechts)

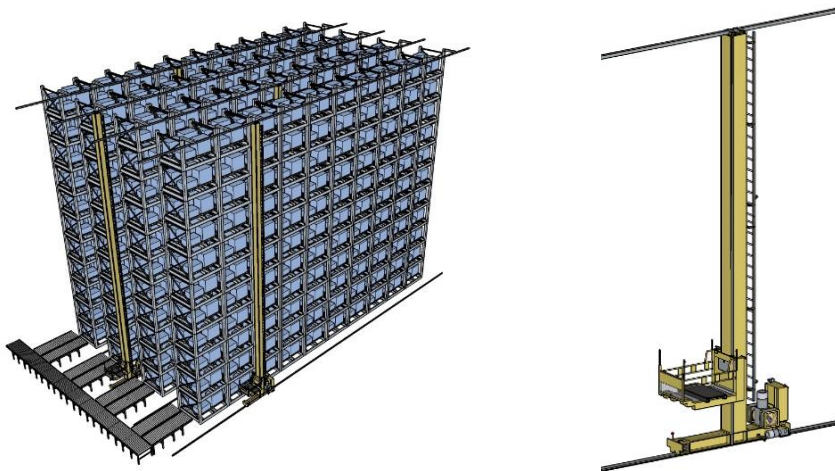


Abbildung 1: links: Hochregallager mit 4 Lagergassen, rechts: Detaildarstellung eines RBGS

Grundlagen der Energiebedarfsberechnung am Regalbediengerät und die Varianten der Quantifizierung des Energiebedarfs

Der Energiebedarf eines RBGS setzt sich aus den einzelnen Anteilen der Bewegungsabläufe der jeweiligen Bauteile und der zu transportierenden Masse zusammen. Je nach der Bewegungsart, z.B. in Form einer beschleunigten Bewegung, dem Bewegungsverlauf, z.B. der Kombination aus x- und y-Bewegung, und der Ausführung der Übertragungsglieder des Antriebsstrangs, z.B. Trägheitsmomente und Wirkungsgrade von Getriebe, elektrischen Motoren oder Frequenzumformern, können verschiedene Situation eingestellt und berechnet werden. Die physikalischen und elektrotechnischen Grundlagen der Energiebedarfsberechnung wurden als Basis für drei Möglichkeiten der Quantifizierung angepasst. Die einfachste Form der Abschätzung stellt eine statische Bilanz der Energiebedarfe über potentielle und kinetische Energien für die Fächer eines Lagers dar. Wird ebenfalls die beschleunigte Bewegung des Regalbediengeräts berücksichtigt, kann eine rein mechanische Betrachtung durchgeführt werden. Es muss dabei zwischen Voll- und Leerfahrt (d.h. mit / ohne Ladegut) unterschieden werden. Die mechanischen Verluste sind im Detail, die restlichen Verbraucher des Antriebsstrangs über einen Gesamtwirkungsgrad abgebildet. Die detaillierteste Betrachtung ist ein deterministisches, parametrierbares Simulationsmodell, das neben allen Reibungsverlusten auch ein Zwei-Massen-Schwingungsmodell enthält, um damit weitere Energieverluste quantifizieren zu können. Alle Quantifizierungsalternativen sind dabei nicht auf eine Geräteklasse beschränken, sondern

können individuell angepasst werden. Neben heutigen Produkten können die implementierten Modelle für Neuprojekte oder Retrofit-Projekte eingesetzt und verwendet werden.

Zur Beantwortung der Frage welches Prognosemodell mit welchem Aufwand „gute“ Ergebnisse liefert, müssen die Alternativen einheitlich evaluiert werden.

Evaluation der Quantifizierungsalternativen

Jedes Modell stellt eine Vereinfachung der Realität dar. Zur Vorhersage des Energiebedarfs ist es damit unbedingt erforderlich die Ergebnisse von abstrahierten Modellen mit real erhobenen Messdaten zu vergleichen. Jedes Modell kann beliebig oft auf Richtigkeit überprüft werden. Jedoch führt nur ein falsches Ergebnis bereits zur Ablehnung der Gültigkeit und veranlasst weitere, vollständige und neue Untersuchungen. Aus den Ergebnissen der Literaturanalyse lässt sich zusammenfassen, dass eine umfassende Methodik nicht existiert, die in einer einzigen Vorgehensweise statistische Versuchsplanung und Metrologie kombiniert sowie bei Validierungsvergleichen der Messung und des Modells verschiedene Durchführungsempfehlungen gibt. Für die in dieser Arbeit entwickelte Gesamtmethodik konnten allerdings einzelne, vielseitige Teilaspekte und Ansätze bestehender Literatur berücksichtigt und verbunden werden. Die daraus entstandene Evaluationsmethodik diene der Validierung, Verifikation und Kalibrierung der Quantifizierungsmöglichkeiten.

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

Der Energiebedarf von Fördermitteln in einem Lager kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten beeinflusst werden: Durch die Anpassung der Lagerorganisation bzw. Lagerstrategien, d.h. die Organisation der Lagergüter innerhalb eines Lagers oder die Variation von technischen Parameter des RBGs. Mit Hilfe der evaluierten Simulationsmodelle sind beide Möglichkeiten von bereits existierenden oder sich in Planung befindlicher Anlagen abbildbar und hinsichtlich der Energieeffizienz bewertbar. Neben der Betrachtung einzelner Maßnahmen wie die Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Energierücksperrmöglichkeiten (z.B. elektrische oder mechanische Energie-Zwischenspeicherung oder Netzzurückspeisung) und kombinierter Maßnahmen (z.B. Variation kinematischer Parameter in Kombination mit reduzierter Mastmasse), werden Handlungsempfehlungen zur Auswahl der geeigneten Maßnahmen eines individuellen Systems gegeben.

Resümee und Ausblick

Die diesem Beitrag zu Grunde liegende Dissertation beinhaltet die Erstellung, Evaluation und Analyse verschiedener Möglichkeiten der Energiebedarfsberechnung von Regalbediengeräten. Mit dieser Arbeit konnte die Forschungsfrage beantwortet werden, wie repräsentative, gültige und zuverlässige Prognosemodelle für automatisierte Anlagen erstellt und bewertet sowie daraus Handlungsempfehlungen für einen energieeffizienten Betrieb abgeleitet werden können. Damit trägt die Arbeit auch direkt zum Klimaschutz und Ressourcenüberprüfung bei, da durch die Prognosemodelle der Energiebedarf quantifiziert, die Parameter mit dem größten Einfluss identifiziert und daraus ableitend verschiedene Lösungsmöglichkeiten zur

Energiebedarfsreduktion aufgezeigt werden können. Die Arbeit kann damit auch als Grundlage für zukünftige europäische Normungsarbeit verwendet werden, um so der Industrie eine einheitliche Vorgehensweise z.B. bei Ausschreibungen und Angaben des Energiebedarfs beim Endkunden zu ermöglichen.