

Validierung intralogistischer Systemmodelle anhand gemessener Kenngrößen

Validation of intralogistic system models by means of
measured system key performance indicators

Meike Braun*
Jochen Kramer**
Kai Furmans*

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

***Forschungszentrum Informatik (FZI); Forschungsbereich Embedded Systems and Sensors Engineering (ESS)*

Die konsequente Anwendung von einer Validierungsmethoden ist eine wichtige Grundlage zur Angabe der Genauigkeit von Simulationsmodellen. Im nachfolgenden Beitrag wird eine Vorgehensweise zur Validierung von Simulationsmodellen vorgestellt und auf ein am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) entwickeltes Modell zur Quantifizierung des Energiebedarfs und der Spielzeit von Regalbediengeräten angewandt und analysiert.

[Validierung von Simulationsmodellen, Quantifizierung Energiebedarf, Regalbediengerät, statistische Versuchsplanung und Analyse]

The consistent application of validation methods is necessary for the evaluation of the accuracy of simulation models. In this article a method of validation will be applied to the simulation model for quantification of energy demand of AS/RS which are developed at Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL). Afterwards the results will be analyzed and evaluated.

[Validation of simulation models, quantification of the energy demand, AS/RS, statistical plans of experiment and analysis]

1 EINLEITUNG

Die Simulation ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Analyse komplexer Systeme. Vor allem bei Untersuchungen von Materialflusssystemen wird sie bei fehlenden analytischen Berechnungsverfahren oder unwirtschaftlichen Experimenten an realen Systemen angewandt. Nach VDI Richtlinie 3633 wird die Simulation als ein „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“, bezeichnet [VDI96]. Neben der Verifikation der Simulationsmodelle, d.h. die Überprüfung der Implementierung des Modells nach konzeptioneller Richtigkeit, muss eine Validierung erfolgen, die einen Abgleich zwischen Realität und Modell im Hinblick auf die Untersuchungsziele

genau genug ermöglicht [Rab08]. Doch wie lässt sich auf dem Gebiet der Fördertechnik herausfinden, was dem „genau genug“ entspricht?

2 MOTIVATION FÜR DIE KONSEQUENTE ANWENDUNG DER VALIDIERUNGSMETHODE

Neben der Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen und dem Bestreben nach immer ökologischeren und nachhaltigeren Zielen ist die Quantifizierung des Energiebedarfs für viele Firmen unterschiedlichster Branchen immer wichtiger. Damit Vorhersagemodelle nicht nur auf technisch richtige Art und Weise den Energiebedarf berechnen, sondern auch „genau genug“ angeben, ist es umso entscheidender in konsequenter Form eine Methode zur Validierung anzuwenden.

Im Rahmen von Forschungsarbeiten am IFL wurde nach der Erstellung der Simulationsmodelle zur Quantifizierung des Energiebedarfs von verschiedenen Fördermitteln besonderer Wert auf die Validierung gelegt. Validierung, die als „kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten System hinreichend genau wiedergeben“ verstanden wird [Rab08], lässt Interpretationsfreiraum, was unter „hinreichend genau“ zu verstehen ist. Dabei können für verschiedene Themengebiete und Untersuchungsziele unterschiedliche Genauigkeiten zulässig sein. [Rab08]

Bei der Validierung der Quantifizierungsmethoden wie z.B. des Energiebedarfs von Regalbediengeräten unter Nutzung gemessener Kenngrößen ist bisher noch keine einheitliche Vorgehensweise verwendet worden. Zwar werden viele der bestehenden Energiebedarfsmodelle, z.B. der TU München [Gün11] oder der TU Dresden [Sie13], als „validiert“ und „genau genug“ bezeichnet, jedoch lassen sich keine Angaben zur statistischen Analyse finden. Im Rahmen des Projektes „Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers“ der Universität Stuttgart konnte ein erster Ansatz gefunden werden, in dem eine Varianz- und

Regressionsanalyse zum Treffen von Aussagen über die Signifikanz von Parametern sowie der Aufbau neuronaler Netze zur Prognose des Energiebedarfs in Abhängigkeit von Einflussgrößen angewandt wurde [Hop13]. Damit lassen sich Energiebedarfsmodelle weder bewerten noch miteinander oder mit gemessenen Kenngrößen vergleichen wegen der fehlenden Angaben in Bezug auf die einheitliche Ermittlung dieser Kenngrößen. Deshalb muss auf Basis bestehender Methoden eine einheitliche Vorgehensweise zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse festgelegt und anschließend einheitlich angewandt werden.

Im Stand der Technik der Versuchsplanung (vgl. auch „Design of Experiments“) wird folgende grundlegende Vorgehensweise für derartige Anwendungsfälle beschrieben: Zuerst soll ein Umfeld zur Bewertung mit einem geeigneten Projektteam geschaffen und organisiert werden. Danach können Ziele definiert, Einflussgrößen festgelegt und ein Versuchsplan erstellt werden. Nach Durchführung des Versuchsplans erfolgt die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse [Hof11]. In Anlehnung daran wurde am IFL diese Validierungsmethode auf die Quantifizierung des Energiebedarfs von Simulationsmodellen angepasst und angewandt, sodass ein Abgleich und damit eine Bewertung der Simulationsmodelle oder Quantifizierungsmethoden untereinander und mit Kenngrößen gemessener Systeme erfolgen kann.

3 VORSTELLUNG DER VORGEHENSWEISE ZUR VALIDIERUNG ANHAND GEMESSENER KENNGRÖßEN

Grundsätzlich kann es bei der Validierung nie zu einer vollständigen Übereinstimmung zwischen System- und Modelldaten kommen, da durch die Systemdatenerfassung und durch die Abstraktion beim Modellaufbau immer Ungenauigkeiten entstehen. Die Herausforderung liegt darin, die große Anzahl an möglichen Parametern auf eine überschaubare Zahl zu reduzieren, jedoch weiterhin eine hohe Aussagekraft in Bezug auf Richtigkeit und Genauigkeit zu erreichen. Genauigkeit ist dabei die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung von Ermittlungsergebnissen an den Bezugswert. Richtigkeit ist dagegen die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung des Erwartungswertes der Ermittlungsergebnisse an den Bezugswert [DIN87].

Die am IFL angewandte Validierungsmethode gliedert sich in 5 Schritte (siehe Abbildung 1):

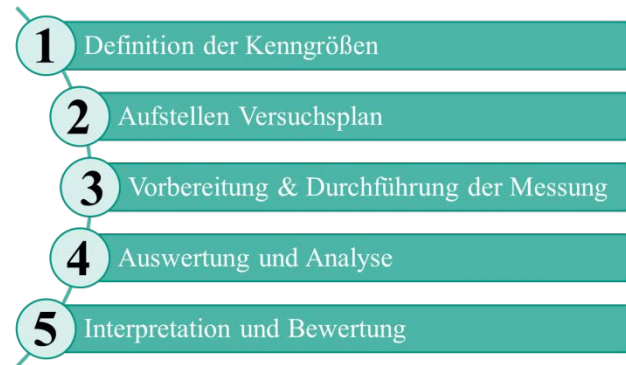


Abbildung 1. Darstellung der Vorgehensweise

Bevor eine Untersuchung gemessener Kenngrößen erfolgen kann, müssen Eingangs- und Ausgangsgrößen, Mess- und Zielgrößen sowie deren Abhängigkeiten jeweils für das Modell oder Systemmodell und das in Realität zu untersuchende System definiert werden. Danach kann ein Versuchsplan ermittelt und aufgestellt werden. Nach der Vorbereitung der Messung der Zielgrößen wird die Vorgehensweise am realen System festgelegt und alle nötigen Wechselwirkungen untersucht. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass das Ziel bzw. die Messungen zur Ermittlung der Zielgrößen immer im Fokus der Betrachtungen liegen. Nach der Durchführung der Versuche laut Versuchsplan erfolgt die Auswertung der Messergebnisse, die Analyse, die Interpretation und abschließend die Bewertung der Ergebnisse.

4 SIMULATIONSMODELL: QUANTIFIZIERUNG DES ENERGIEBEDARFS VON REGALBEDIENGERÄTEN

Am IFL wurden verschiedene Alternativen zur Quantifizierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten entwickelt. Im hier vorgestellten Beitrag soll speziell das parameterbasierte Simulationsmodell betrachtet und analysiert werden. Grundlage des Energiebedarfsmodells sind die physikalischen Zusammenhänge der Fahr-, Hub- bzw. Senkbewegung und der Bewegung des Lastaufnahmemittels. Eine weitere Detaillierung der Bewegungsachsen ist hinsichtlich des mechanischen Prozesses möglich sowie die Aufteilung in die Übertragungsglieder Getriebe, Motor und Leistungselektronik. Dabei ist das Modell nicht auf eine Geräteklasse beschränkt, sondern kann individuell den verschiedenen RBGs in heutigen Materialflusssystemen angepasst werden [Sch13].

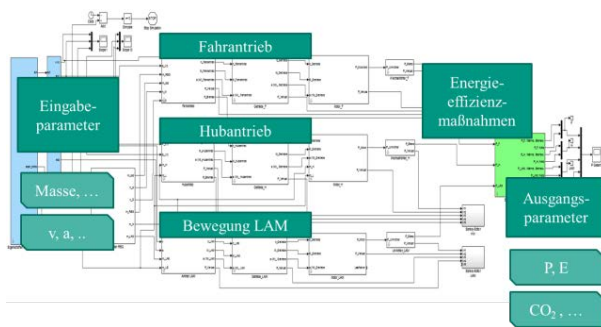


Abbildung 2. Simulationsmodell zur Berechnung des Energiebedarfs eines Regalbediengeräts

Die Grundlage des Simulationsmodells ist die Betrachtung des Prozesses „Ermittlung des Energiebedarfs des Ein- und Auslagervorgangs eines Regalbediengeräts“. Ein Prozess im Allgemeinen ist „die Gesamtheit aufeinander einwirkender Vorgänge in einem System, durch den Materie, Energie und/oder Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird.“ [SuS14]. In diesem Fall werden durch die Bewegung des Regalbediengeräts Leistung und damit Energie benötigt, die auf ihre Genauigkeit hin untersucht werden soll. Die nun schematisch vorgestellte Methode zur Validierung von Simulationsmodellen kann auf weitere verschiedene allgemeine Prozesse angewandt werden. Die ausführliche Berechnung der einzelnen Methoden in den jeweiligen Phasen ist derzeit Bestandteil von Forschungsarbeiten am IFL.

5 DEFINITION KENNGRÖßEN

Zur Beschreibung der wichtigsten Validierungs- und Systemgrößen werden vorab verschiedene Grundbegriffe allgemein definiert:

Allgemein repräsentieren Größen Eigenschaften eines Vorgangs oder Körpers, die einer qualitativen Identifizierung und einer quantitativen Bestimmung zugänglich sind [DIN83]. Zustandsgrößen bzw. innere Größen sind diejenigen zeitveränderlichen Größen eines Systems, mit deren Kenntnis zu einem bestimmten Zeitpunkt das weitere Systemverhalten bei gegebenen Eingangsgrößen eindeutig bestimmbar ist. Sie wirken nur im Inneren des Systems. Die Systemparameter sind Kenngößen, deren Werte das Verhalten des Systems prinzipiell beschreiben [SuS14].

Jedes System wird durch Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben. Unter Eingangsgroßen versteht man Größen, die auf ein System einwirken, ohne dass sie selbst vom System beeinflusst werden, während unter Ausgangsgroßen Größen verstanden werden, die vom betrachteten System beeinflusst werden und es als Wirkung nach außen verlassen [SuS14].

Grundsätzlich beschreibt eine Wirkung die Einflussnahme einer oder mehrerer Eingangsgrößen auf eine Aus-

gangsgröße durch den Prozess eines Systems. Dabei gibt die Wirkungsrichtung die Richtung der Einflussnahme einer Wirkung an, nämlich von der Ursache zu ihrer Auswirkung hin, an [SuS14].

Zielgrößen stellen quantitative oder qualitative Größen dar. Sie charakterisieren die Abhängigkeit zwischen den Versuchsparametern, werden aber einzeln ausgewertet und analysiert. Sie beschreiben dabei das Ergebnis eines Versuchs und können Messwerte sein, aber auch Größen, die aus einem oder mehreren Messwerten errechnet werden. Grundsätzlich können mehrere Zielgrößen zu einer abgeleiteten oder globalen Zielgröße zusammengefasst werden [Sch97].

Einflussgrößen sind Größen die die Versuchsergebnisse und damit die Zielgröße beeinflussen können. Sie können weiter unterteilt werden in Steuer- und Störgrößen. Steuergrößen sind Einflussgrößen, deren Wert für das Produkt bzw. den Prozess auf einen bestimmten Wert eingestellt und dort gehalten werden kann, Störgrößen dagegen sind Einflussgrößen deren Wert für das Produkt bzw. den Prozess nicht vorgegeben werden können. Aus der Vielzahl an Einflussgrößen werden für den Versuch die vermuteten wesentlichen Einflussgrößen ermittelt und ausgewählt. Die für den Versuch ausgewählten Größen sind Faktoren. Die Werte der Faktoren werden als Faktorstufen bezeichnet, wobei quantitative von qualitativen Faktoren unterschieden werden können [Kle13].

Zur „Validierung von Simulationsmodellen anhand gemessener Kenngrößen“ müssen in einem ersten Schritt alle Einflussparameter gesammelt und aufgelistet werden. Anschließend erfolgt die Zuteilung der Größen zu verschiedenen Gruppen, z.B. in die der Zielgrößen, der Einflussgrößen und der für den Versuchsplan relevanten Faktoren.

Zielgrößen zur Validierung müssen quantifizierbare Größen sein, die sich aus Messwerten errechnen lassen und mehr Informationen besitzen als „gut“ oder „schlecht“. Ebenfalls ist wichtig auf Vollständigkeit und Verschiedenheit der Ergebnisse zu achten [Kle13]. Im oben beschriebenen Zusammenhang zur Validierung des Energiebedarfs-Simulationsmodells wurden folgende Zielgrößen identifiziert:

- Zeitlicher Gesamtleistungsverlauf $P(t)$, sowie die dazugehörigen Leistungsverläufe der Subsysteme
- Energiebedarf
- Spielzeit
- Bewegungsverlauf des Regalbediengeräts

Als Messgrößen für den Leistungsverlauf und den Energiebedarf können Strom- und Spannungsgrößen angegeben werden. Sie lassen sich in die Größe Wirkleis-

tung umrechnen (siehe 7.1). Für den Energiebedarf wird das Integral der Leistung über der betrachteten Zeit verwendet. Die Spielzeit ergibt sich aus der Fahrzeit und der Summation der jeweiligen Tot- und Lastübergabezeiten. Für den Bewegungsablauf des RBGs kann mit Hilfe von Beschleunigungs- und Bewegungssensoren die parallel ablaufende Fahrt in Fahr- und Hubrichtung nachgebildet und mit der Bewegung im Simulationsmodell verglichen werden. Die Bestimmung des Fahrweges kann mit einem Messband erfolgen.

Einflussgrößen sind alle Größen, die für den Prozessablauf notwendig sind und ausgehend einer Ursache eine Wirkung erzielen [Kle13]. Im Fall des RBG-Simulationsmodells können folgende Parameter definiert werden:

- Wohin fährt das RBG? Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung
- Wie sieht die Bewegung aus? Darstellung der Fahr- / Hub- / Senkbewegung im Fahrprofil bzw. der Bahnkurve
- Was wird bewegt? Masse RBG und Last
- Wie sieht das RBG aus? Geometrieabmessungen, Dämpfungen und Steifigkeiten der Materialien und Formen, Auswahl der Prozessgrößen und Übertragungsglieder für die Bewegungsachsen
- Wie sind die Dimensionen des Lagers? Lagerabmessungen

Damit lassen sich die Faktoren als Grundlage des Versuchsplans festlegen. Unabhängige Parameter im Fall des Energiebedarfsmodells sind:

- Weg s ; Geschwindigkeit v ; Beschleunigung a
- Fahrprofil der x-, y- und z-Richtung
- Massen des RBGs und der Last
- Geometrien
- Dämpfungen und Steifigkeiten
- Lagerabmessungen
- Wirkungsgrade für die Prozesse und Übertragungsglieder

Die Abhängigkeiten können in folgender Abbildung dargestellt werden:

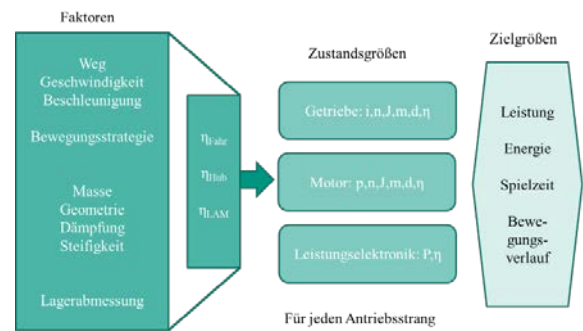


Abbildung 3. Darstellung der Faktoren zur Bestimmung der Zielgrößen

Zur Bestimmung der Massen und der Geometrien sowie der Dämpfungen und der Steifigkeiten des untersuchten Regalbediengeräts müssen umfassende Erprobungen beim Hersteller oder Zulieferer sowie beim Anwender erfolgen. Dabei können z.B. Ausschwingversuche zur Messung der Dämpfung und Steifigkeit eines RBG-Mastes durchgeführt und damit auch die Unsicherheiten angegeben werden. Die Dimensionen des Lagers können mit Hilfe eines kalibrierten Messbandes nachgemessen und mit Toleranzen versehen werden. Die Bestimmung der Wirkungsgrade des Getriebes, des Motors und der Leistungselektronik können auf eigenen Prüfständen losgelöst der Bewegung des Regalbediengeräts betrachtet werden, da die Parameter zur Beschreibung der Übertragungsglieder unabhängig von denen des Regalbediengerätes sind. Die Wirkungsgrade werden letztendlich beeinflusst durch Parameter wie Drehzahl oder Drehmoment, die eine Umrechnung der translatorischen in rotatorische Bewegungen darstellen. Diese Wirkungsgrade werden für Motoren und Getriebe ebenfalls von den Herstellern mit Toleranzbereichen versehen und können so Anwendung finden (siehe Abbildung 4).

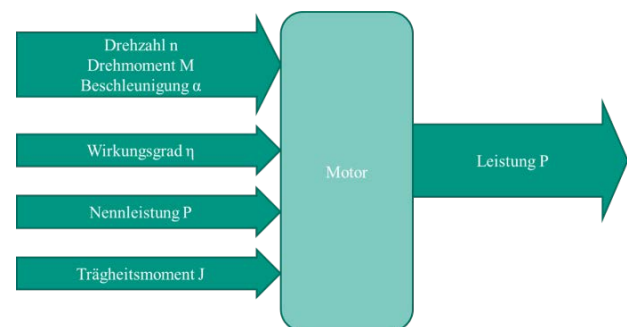


Abbildung 4. Einfluss- und Ausgabegrößen Subsystem Motor

Die Faktorstufen werden nach Auswahl der Versuchsstrategie erst im Schritt zur Vorbereitung der Messung festgelegt, da hier die repräsentativen Bewegungen und die Messtechnik ausgewählt werden.

Im Rahmen der Aufstellung der Versuche sollen nun die Faktoren den Versuchsergebnissen gegenübergestellt und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse untersucht bzw. der Einfluss ermittelt werden. Dabei kann zwischen

Haupteffekten und Wechselwirkungseffekten unterschieden werden. Unter *Haupteffekten* wird der Einfluss einer einzigen Variable bei Variation über alle Stufen des Faktors auf die Zielgröße verstanden. Mit dem Begriff *Wechselwirkungseffekt* wird eine Veränderung der Zielgröße bei gleichzeitiger Variation mehrere Faktoren bezeichnet. Anders als bei Haupteffekten können Wechselwirkungseffekte nur dann auftreten, wenn zwei oder mehrere Parameter zugleich ihre Stufenhöhe verändern [Gun04].

6 AUFSTELLUNG DES VERSUCHSPLANS

Nach Definition der Zielgrößen und der Faktoren muss ein geeigneter Versuchsplan festgelegt werden. Hauptaufgabe des Versuchsplans ist das geplante Realisieren von Wiederholungen der Messungen. Grund dafür ist die Informationsbeschaffung zum Treffen von Aussagen über die Versuchsstreuung und den Versuchsfehler. Dabei sollte auf eine Zufallsreihenfolge, auf die Symmetrie der Versuchspunkte und auf die Nutzung eines gesamten einheitlichen Versuchsraums geachtet werden [Kle13]. Grundsätzlich enthält ein Versuchsplan eine Liste aller Einzelversuche mit den jeweiligen Kombinationen der Versuchsparameter, die in Verbindung mit der Gesamtheit der Versuchseinheiten das Versuchsobjekt und den Versuchsraum beschreiben. Versuchsparameter können auch Störgrößen sein. Sie werden allerdings meistens nicht in den Versuchsplan aufgenommen und sollen an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden [Kle13]. Nach VDI 3633 ist ein Experimentplan (Versuchsplan) im Sinne eines Simulationsmodells ein „systematischer Plan zur Ausführung einer Menge von Simulationsläufen mit unterschiedlichen Anfangszuständen und Parametereinstellungen zur effizienten Untersuchung des Modellverhaltens“ [VDI96]. Zur Aufstellung des Versuchsplans sind folgende Fragen zu klären [VDI07]:

- Was (Funktion, Genauigkeit usw.) ist zu testen?
- Welche Ausgangssituation ist hierfür erforderlich?
- Welche Eingaben (Daten und Signale) sind notwendig?
- Welche Ergebnisse sind zu erwarten?

Das Aufstellen von Versuchsplänen kann mit mehreren Methoden erfolgen. An dieser Stelle sollen zwei Methoden vorgestellt werden, die für die Validierung der Energiebedarfsmodelle Anwendung finden könnten [Kle13]:

- Der faktorielle Versuchsplan
- Screening Versuchspläne - Der teilfaktorielle Versuchsplan

Bei faktoriellen Versuchsplänen [VDI07] erfolgt eine Variation aller Einflussgrößen in allen Kombinationen.

Dabei wird die Auswirkung auf eine oder mehrere Zielgrößen untersucht. Dieser Versuchsplan bildet die Grundlage der statistischen Versuchsplanung. Ihr Aufbau beruht auf einfachen strukturierten Algorithmen, die aufgrund symmetrischer und überschaubarer Versuchsanordnungen leicht zu entwickeln sind. Dabei werden mehrere Faktoren gleichzeitig gegeneinander variiert und die Mittelwerte über die Einstellungen gebildet, wodurch der Effekt berechnet werden kann. Ein Haupteffekt ist die Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße. Eine Wechselwirkung zwischen Faktoren liegt vor, wenn der Einfluss des einen Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors abhängig ist. Damit lassen sich Schlussfolgerungen auf die Versuchsergebnisse und auf den Prozess übertragen. Den Vorteilen dieser Methode, d.h. der einfache Aufbau und die Analyse aller Effekte steht der Nachteil gegenüber, dass bei größer werdender Anzahl der Versuchsparameter die Anzahl der Versuche exponentiell ansteigt. Daher werden Vollfaktorversuche nur bis zu einer Anzahl von fünf Faktoren in der Praxis angewandt [Kle13] [Gun04] [Hof11].

Bei einer größeren Anzahl an Faktoren besteht außerdem die Möglichkeit Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen zu vernachlässigen. Allgemein sind Wechselwirkungen physikalisch schwer zu deuten bzw. ohne Bedeutung, da ihre Effekte meist im Bereich der Streuung der Versuchsergebnisse liegen [Sch97]. Im Vergleich zur faktoriellen Versuchsplanung können mit der teilfaktoriellen Versuchsplanung Parameterkombinationen eingespart werden. Dem Einsparpotential an Versuchsparametern stehen allerdings unscharfe Ergebnisse gegenüber. Mit Hilfe der teilfaktoriellen Versuchsplanung kann ebenfalls eine umfassende Analyse der Parameter erfolgen und die Effekte mit Hilfe der Mittelwerte berechnet werden [Kle13] [Gun04] [Hof11].

Für jede neue Untersuchung allerdings muss der Versuchsplan neu aufgestellt werden, da es pauschal nicht die am besten geeignete Methode gibt, sondern jeweils für den Anwendungsfall angepasst werden muss. [Gun04]

Im gegebenen Anwendungsfall ist die Validierung anhand realer Kenngrößen in Anlehnung an [Sie10] gegeben, da:

- mehr als ein Faktor berücksichtigt wird.
- die Faktoren unabhängig voneinander sind.
- keine vorherigen Untersuchungen existieren und keine Faktoren bekannt sind.
- Störgrößen nicht berücksichtigt werden.

Die Anwendung verschiedener Versuchspläne zur Validierung von Simulationsmodellen wird derzeit am IFL untersucht.

7 VORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG DER ZIELGRÖßEN

Die Vorbereitung der Zielgrößen-Messung beinhaltet verschiedene Elemente. So muss die erforderliche Messtechnik ausgewählt und kalibriert sowie die Faktorstufen festgelegt werden.

7.1 BESCHREIBUNG DER MESSTECHNIK

Im Allgemeinen hat Messtechnik die Aufgabe „ein-dimensionale Messgrößen und mehrdimensionale Messvektoren technischer Prozesse aufzunehmen, die erhaltenen Messsignale umzuformen und umzusetzen (Messwernerfassung) sowie die erhaltenen Messwerte so zu verarbeiten (Messwertverarbeitung), dass das gewünschte Messergebnis (die Zielgröße) gewonnen wird.“ [Trä14].

Zur Bestimmung der Zielgrößen können verschiedene Messprinzipien angewandt werden. So wurde zur Aufzeichnung des Bewegungsverlaufs ein Messsystem mit Inertialsensorik entwickelt, welches die Bewegung des Regalbediengeräts in alle drei Raumrichtungen erfassen und aufzeichnen kann. Dieses Messsystem wird derzeit für Untersuchungen am IFL eingesetzt und evaluiert.

Die Leistungsmessung basiert auf den Messgrößen Strom und Spannung, die zur Ermittlung der Scheinleistung dienen. Anhand des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung wird aus der Scheinleistung die Wirkleistung errechnet. Die Messung der Spannungen und Ströme erfolgt mit einem Messsystem von Chauvin Arnoux C.A. 8335 (Qualistar+). Dieses verwendet zur Messung der Phasenströme Zangenstromwandler, welche induktiv die Ströme in Spannungen wandeln [CHA14]. Sowohl die gewandelten Ströme, als auch die Spannungen werden gefiltert, analog-digital gewandelt, zeitlich diskretisiert und digital im Messgerät erfasst. Die während der Messung aufgezeichneten Messdaten werden zuerst intern zwischengespeichert und anschließend per USB auf den PC übertragen. Mit Hilfe der Software "Power Analyser Transfer" (PAT) lassen sich die Messdaten als Microsoft Excel-Tabelle darstellen und aus Strom- und Spannungswerten die Schein- und Wirkleistung errechnen.

7.2 BEWEGUNGSABLAUF

Eine der wichtigen Größen zur Validierung von Simulationsmodellen von Regalbediengeräten ist der Bewegungsablauf, d.h. die Bestimmung des Wegs, wohin das Regalbediengerät fährt. Auf Basis der Normen, wie z.B. der FEM 9.851 [FEM03], können die repräsentativen Lagerfächer eines Lagers berechnet und als Grundlage weiterer Untersuchungen herangezogen werden.

Die Analyse von Messungen des Bewegungsablaufs ergab allerdings im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen zur Anwendung und Anpassung der Validierungsmethodik einen erkennbaren Unterschied.

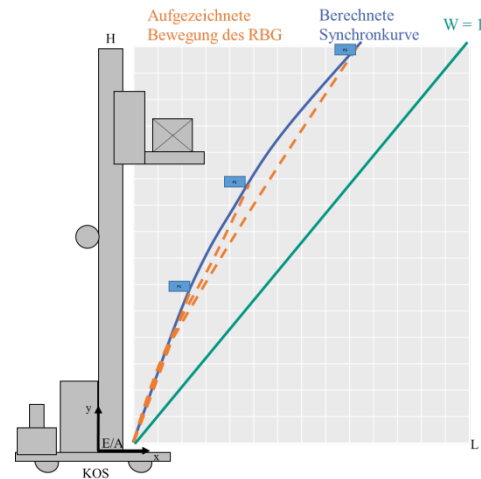


Abbildung 5. Synchronkurve basierend auf der 3-Phasen Bewegung, beispielhafte aufgezeichnete Bewegung des RBG für drei Lagerfächer und Darstellung $w=1$

Abbildung 5 stellt den Verlauf der ermittelten Synchronkurve eines Regalbediengeräts sowie den in der Literatur angegebenen Wandparameter $w=1$ dar. Die Synchronkurve beschreibt dabei Positionen der Lagerfächer, für die die gleiche Zeit in Fahrt- und Hubrichtung benötigt wird. Ebenfalls sind drei Beispiele von Synchronbewegungen des RBG zum Erreichen von Fächern auf der Synchronkurve in der Abbildung aufgezeichnet.

Grundlage für die Definition des Wandparameters ist das Abmessungsverhältnis des Lagers sowie das maximale Geschwindigkeitsverhältnis einer konstant bewegten Fahrt ohne Beschleunigungen [Gud72]. Die Darstellung des Bewegungsablaufes eines Regalbediengeräts gestaltet sich aber vereinfacht in Form einer Beschleunigungsphase, einer Konstantfahrt und endet in einer Verzögerungsphase – eine sogenannte konstant beschleunigten Bewegung oder 3-Phasen Fahrt [Ger10]. Die Annahme eines Wandparameters mit konstanten Geschwindigkeiten über die gesamte Fahrzeit kann damit als Grundlage zur Berechnung der mittleren Spielzeit nur mit Ungenauigkeiten verwendet werden. Bei der Untersuchung der „hinreichenden Genauigkeit“ der Ergebnisse stellt diese Annahme allerdings eine große Vereinfachung dar. Ebenfalls lassen sich in diesem Zusammenhang die Definitionen der repräsentativen Lagerfächer, z.B. der VDI 3561 [VDI73] und FEM 9.851 [FEM03], die für $w=1$ und damit unter den gleichen unzureichenden Annahmen getroffen wurden, nicht weiter zur Validierung verwenden.

Zur Beschreibung der mittleren Spielzeit und der Synchronfahrkurve einer 3-Phasen Fahrt wurde in einem ersten Schritt ein mathematisch-analytisches Modell entwickelt und analysiert. Basis dafür war die Analyse der

Synchronbewegung des Regalbediengeräts. Im Allgemeinen lassen sich zwei grundlegende Fälle unterscheiden:

$$\begin{cases} t_{\text{Grenz},x} > t_{\text{Grenz},y} & \text{Fall A} \\ t_{\text{Grenz},x} < t_{\text{Grenz},y} & \text{Fall B} \end{cases}$$

Dabei bezeichnet die Zeit t_{Grenz} die zeitliche Grenze zwischen der Bewegungsform einer Spitzfahrt, d.h. dem Nicht-Erreichen der maximalen Geschwindigkeiten, und dem der Normalfahrt, d.h. dem zusätzlichen Anteil einer konstanten Geschwindigkeit.

Auf Grundlage der Formeln zur 3-Phasen Fahrt [Ger10] und der Vorgehensweise zur Berechnung der mittleren Spielzeit nach Gudehus [Gud72] ergibt sich damit für den Erwartungswert der mittleren Spielzeit eines Einzelspiels

$$E(t_{\text{Mittel}}) = 2 * \begin{cases} \frac{1}{2H} (E(t_{1,x}) + E(t_{2a,x}) + E(t_{3,x})) \\ + E(t_{1,y}) + E(t_{2a,y}) + E(t_{3,y}) + E(t_{3H}) & t_{\text{Grenz},x} > t_{\text{Grenz},y} \wedge x_3 = L \wedge y_3 < H \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x}) + E(t_{2a,x}) + E(t_{3,x})) \\ + E(t_{1,y}) + E(t_{2a,y}) + E(t_{3,y}) + E(t_{3H}) & t_{\text{Grenz},x} > t_{\text{Grenz},y} \wedge y_3 = H \wedge x_3 < L \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x}) + E(t_{2b,x}) + E(t_{3,x})) \\ + E(t_{1,y}) + E(t_{2b,y}) + E(t_{3,y}) + E(t_{3L}) & t_{\text{Grenz},x} < t_{\text{Grenz},y} \wedge x_3 = L \wedge y_3 < H \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x}) + E(t_{2b,x}) + E(t_{3,x})) \\ + E(t_{1,y}) + E(t_{2b,y}) + E(t_{3,y}) + E(t_{3L}) & t_{\text{Grenz},x} < t_{\text{Grenz},y} \wedge y_3 = H \wedge x_3 < L \end{cases}$$

mit den Summanden für Fall A

$$E(t_{1,x}) = \frac{1}{x_1} * \frac{4}{5} \frac{a_x v_{\text{Max},y}^5}{a_y^4}$$

$$E(t_{1,y}) = \frac{1}{y_1} * \frac{4}{5} \frac{a_x v_{\text{Max},y}^5}{a_y^4}$$

$$E(t_{2a,x}) = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \left(\frac{2v_{\text{Max},y} v_{\text{Max},x}^4}{a_x^3} - \frac{2v_{\text{Max},y}^5 a_x}{3a_y^4} - \frac{4v_{\text{Max},y}^2 v_{\text{Max},x}^3}{3a_y a_x^2} \right)$$

$$E(t_{2a,y}) = \frac{1}{(y_2 - y_1)} \left(\frac{a_x v_{\text{Max},y}}{16} \left(\frac{2v_{\text{Max},x}}{a_x} - \frac{v_{\text{Max},y}}{a_y} \right)^4 \right)$$

$$E(t_{3,x}) = \frac{1}{(x_3 - x_2)} \left(\frac{v_{\text{Max},y} x_3^3}{3v_{\text{Max},x}^2} - \frac{v_{\text{Max},y}}{3a_x} + \left(\frac{2v_{\text{Max},y}}{a_y} - \frac{v_{\text{Max},y}^2}{v_{\text{Max},x} a_y} \right) \left(\frac{x_3^2}{2} - \frac{v_{\text{Max},x}^4}{2a_x^2} \right) + \left(\frac{v_{\text{Max},x}^2 v_{\text{Max},y}}{a_x^2} - \frac{v_{\text{Max},x} v_{\text{Max},y}^2}{a_x a_y} \right) \left(x_3 - \frac{v_{\text{Max},x}}{a_x} \right) \right)$$

$$E(t_{3,y}) = \frac{1}{(y_3 - y_2)} \left(\frac{v_{\text{Max},x} y_3^3}{3v_{\text{Max},y}^2} - \frac{v_{\text{Max},x}}{3a_y} + \left(\frac{2v_{\text{Max},x} v_{\text{Max},y}}{a_x} - \frac{v_{\text{Max},y}^2}{a_y} \right)^3 + \left(\frac{v_{\text{Max},x}}{a_y} - \frac{v_{\text{Max},x}^3}{2v_{\text{Max},y} a_x} \right) \left(y_3^2 - \left(\frac{2v_{\text{Max},x} v_{\text{Max},y}}{a_x} - \frac{v_{\text{Max},y}^2}{a_y} \right)^2 \right) + \left(\frac{v_{\text{Max},x}^2 v_{\text{Max},y}}{a_x^2} - \frac{v_{\text{Max},x} v_{\text{Max},y}^2}{a_x a_y} \right) \left(y_3 - \left(\frac{2v_{\text{Max},x} v_{\text{Max},y}}{a_x} - \frac{v_{\text{Max},y}^2}{a_y} \right) \right) \right)$$

(Formelerklärung siehe hinten)

Mit Hilfe dieser Formeln lässt sich in Abhängigkeit des Regalbediengeräts und der Dimensionen des jeweiligen Lagers die mittlere Spielzeit auf Basis einer 3-Phasen Fahrt errechnen. Die Auswahl dieser Lagerfächer und damit des Bewegungsablaufs des Regalbediengeräts ist eine wichtige Angabe bei der Anwendung der Validierungsmethode.

7.3 STICHPROBENUMFANG FÜR GENAUIGKEIT DER ERGEBNISSE

Zur Mittelwertbildung und zur Anwendung statistischer Test ist die Anzahl der Messversuche ebenfalls eine wichtige Größe. Der Energiebedarf von Elektrofahrzeugen [DIN97] wird z.B. anhand eines Testzyklus von zwei (für Überlandfahrten) bzw. sieben Testfahrten (für das Stadtgebiet) errechnet. Auch ein Regalbediengerät zeichnet sich durch permanente Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sowie kurze Fahrzeiten mit konstanter Geschwindigkeit aus.

In der VDI 3561 [VDI73] wird die Anzahl der durchzuführenden Testspiele für Einzel- und Doppelspiele jeweils auf fünf festgesetzt und daraus jeweils der Mittelwert gebildet. Damit sind nach der VDI die statistischen Messfehler und unvermeidliche Spielzeitschwankungen weitgehend reduziert [VDI73]. Die festgesetzten Grundlagen der Spielzeitberechnung können allerdings für eine konstant beschleunigte Bewegung aus den oben genannten Gründen nicht direkt übertragen werden.

Die Bestimmung der jeweiligen Anzahl an Versuchen beim RBG beeinflusst die zunehmende genauere Bestimmung des mittleren Wertes. Dabei verkleinert sich das Konfidenzintervall mit zunehmender Versuchsanzahl, d.h. der Messfehler wird kleiner. Dieser Effekt wird vor allem bei kleiner Anzahl an Messversuchen am deutlichsten [Kle13]. Im Rahmen der Forschungsarbeiten erfolgt eine Analyse verschiedener Konfidenzintervalle bei unterschiedlicher Stichprobengröße, um eine Aussage treffen zu können welche Anzahl an Versuchen für den jeweiligen Bewegungsablauf und die jeweilige Anforderung notwendig sind.

Dies wird in folgendem Diagramm dargestellt:

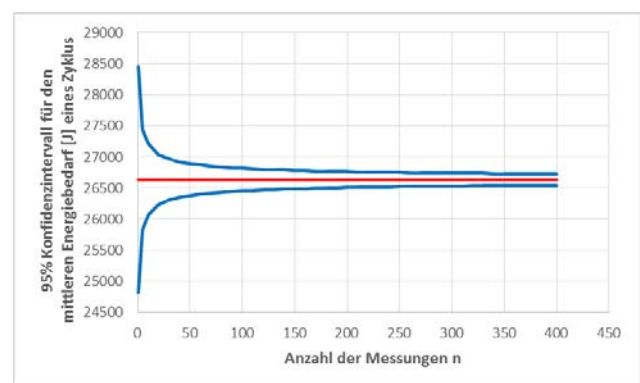


Abbildung 6. Darstellung des mittleren Energiebedarfs für eine Möglichkeit des Energiereferenzzyklus

Die Darstellung in Abbildung 6 für ein Konfidenzintervall von 95% ist die Angabe des mittleren Energiebedarfs in Abhängigkeit der Anzahl an Messungen. Dabei ist erkennbar, dass bei kleinem Stichprobenumfang die das Konfidenzintervall für den Energiebedarf deutlich

größer ist, als z.B. bei 150 Messungen. Die Findung der geeigneten Anzahl an Messungen ist derzeit Untersuchungsgegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

7.4 VORBEREITUNG UND DURCHFÜHRUNG MESSUNG

Nach der Bestimmung des Bewegungsprofils, d.h. wohin fährt das Regalbediengerät, und der Versuchsanzahl, d.h. wie oft wird gemessen, werden die Größen der restlichen Parameter festgelegt. Nach Kalibrierung der Messtechnik können die Versuche durchgeführt werden. Dabei ist auf eine klare Dokumentation sowie das Notieren von Abweichungen und Einflüssen durch Störungen oder Umwelteinflüssen zu achten.

8 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

8.1 VERWERTUNG DER MESSDATEN

Das Auswerten der im Messgerät abgespeicherter Datensätze kann mit Hilfe des dazugehörigen Softwareprogramms als Microsoft Excel Dateien abgespeichert werden. Die Verrechnung der Messgrößen Spannung und Strom für die jeweiligen Zeitabschnitte zur Leistung erfolgt anschließend mit Hilfe der Umgebung von MATLAB, das zur Bearbeitung der umfangreichen Datensätze an dieser Stelle besser geeignet ist. Anhand des Leistungsverlaufs wird daraufhin für die jeweiligen Einzelfahrten oder Gesamtzyklen der Energiebedarf errechnet. Die Messdaten des Bewegungsprofils können direkt in MATLAB eingelesen und darin bearbeitet und gesichert werden. Ausgehend dieser Grundlagen erfolgt daraufhin die statistische Auswertung.

8.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse wird anschließend eine statistische Analyse der Daten durchgeführt. Dazu werden Methoden aus der deskriptiven Statistik verwendet. Dabei werden die Daten und die darin enthaltenen Informationen komprimiert in Tabellen und Schaubildern dargestellt. Das Ziel liegt darin, die wesentlichen Eigenschaften in Bezug auf die aktuellen Fragestellungen veranschaulichen zu können [Bol04].

Die statistische Auswertung der Messdaten kann mit Hilfe verschiedener Tests erfolgen. Je nach zu untersuchender Aussage müssen unterschiedliche Verfahren angewandt werden. Eine pauschale Aussage zur Verwendung von statistischen Verfahren kann an dieser Stelle nicht erfolgen, sondern muss im Einzelfall unterschieden werden. Die Auswertung verschiedener Tests erfolgt derzeit am IFL.

9 INTERPRETATION, BEWERTUNG UND DOKUMENTATION

9.1 INTERPRETATION UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Nach der statistischen Auswertung erfolgt die Aufbereitung der Erkenntnisse zur Bewertung und Interpretation. Dabei soll die Leitfrage beantwortet werden können, wie gut die jeweiligen Quantifizierungsmethoden des Energiebedarfs im Bezug zu realen Systemen sind. Allgemeine Aussagen lassen sich hierzu schwer treffen, da diese im Einzelfall je nach RBG und Lager untersucht werden müssen.

9.2 DOKUMENTATION

Die Vorgehensweise zur Validierung anhand realer Kenngrößen schließt mit der Dokumentation aller erforderlichen Daten und einer Gesamtaussage zur Genauigkeit und Richtigkeit.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Anwendung einer Validierungsmethode ist die Grundlage für die Angabe der Genauigkeit von Simulationsmodellen. Zur Realisierung einer Bewertung und eines Vergleichs verschiedener Simulationsmodelle ist es umso wichtiger dabei auch eine einheitliche Vorgehensweise zu verwenden. Auf Basis bekannter Methoden wurde am IFL eine Methode zur Validierung angepasst und zur Vorhersage des Energiebedarfs von Intralogistiksystemen angewandt. Diese Vorgehensweise kann grundsätzlich in fünf Schritte unterteilt werden. Zuerst werden Kenngrößen wie Einfluss- oder Zielgrößen für den jeweiligen Fall identifiziert. Danach erfolgt die Auswahl eines geeigneten Versuchsplans, in dem alle Zielgrößen hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht werden. Die Vorbereitung der Messung beinhaltet verschiedene Schritte, wie die Auswahl der Messtechnik zur Messung der Zielgrößen. Im Fall der Quantifizierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten müssen zusätzlich der Bewegungsablauf und dessen Häufigkeit bestimmt werden. Hierzu konnten erste Ansätze dargestellt werden. Zuletzt erfolgt eine statistische Analyse mit Hilfe verschiedener Tests sowie die Interpretation, Bewertung und Dokumentation der Validierung.

Zwar konnte mit der Vorgehensweise und der Vorstellung erster Ansätze ein Schritt zur Beantwortung der Fragen „Was ist ein gutes Simulationsmodell?“ und „Was ist hinreichend gut?“ gegeben werden, allerdings erfolgen weiterhin am IFL in diesem Themengebiet umfangreiche Forschungsarbeiten.

11 FORMELZEICHEN

Zeichen	Erklärung
(0/0), (x ₁ /y ₁), (x ₂ /y ₂), (x ₃ /y ₃)	von (0/0)=E/A bis (x ₁ /y ₁) Bewegungen der x- und y-Richtung in Spitzfahrt von (x ₂ /y ₂) bis (x ₃ /y ₃) Bewegungen der x- und y-Richtung in Normalfahrt
t _{Grenz,x} t _{Grenz,y}	Zeitliche Grenze, an der die Bewegung von Spitzfahrt in Normalfahrt übergeht jeweils für x- und y-Richtung
L H	Länge L und Höhe H des betrachteten Lagers
E(t _{Mittel})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit
a _x	Maximale Beschleunigung = Verzögerung in x-Richtung
a _y	Maximale Beschleunigung = Verzögerung in y-Richtung
v _{Max,x}	Maximale Geschwindigkeit in x-Richtung
v _{Max,y}	Maximale Geschwindigkeit in y-Richtung
Fall A Fall B	Unterscheidung zwischen $\begin{cases} t_{Grenz,x} > t_{Grenz,y} & \text{Fall A} \\ t_{Grenz,x} < t_{Grenz,y} & \text{Fall B} \end{cases}$
E(t _{1x}), E(t _{1y})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit für ein halbes Arbeitsspiel zur Erreichung der Fächer im Bereich (0/0) bis (x ₁ /y ₁) jeweils für x- und y-Richtung
E(t _{2ax}), E(t _{2ay})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit für ein halbes Arbeitsspiel zur Erreichung der Fächer im Bereich (x ₁ /y ₁) bis (x ₂ /y ₂) für Fall A jeweils für x- und y-Richtung
E(t _{2bx}), E(t _{2by})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit für ein halbes Arbeitsspiel zur Erreichung der Fächer im Bereich (x ₁ /y ₁) bis (x ₂ /y ₂) für Fall B jeweils für x- und y-Richtung
E(t _{3x}) E(t _{3y})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit für ein halbes Arbeitsspiel zur Erreichung der Fächer im Bereich (x ₂ /y ₂) bis (x ₃ /y ₃) jeweils für x- und y-Richtung
E(t _{3L}) E(t _{3H})	Erwartungswert der mittleren Spielzeit für ein halbes Arbeitsspiel zur Erreichung der restlichen Lagerfächer jedes beliebigen Lagers mit $E(t_{3H}) = \left\{ \frac{1}{(H-y_3)} \int_{y_3}^H L * t(y) dy \quad x_3 = L, y_3 < H \right.$ und $E(t_{3L}) = \left\{ \frac{1}{(L-x_3)} \int_{x_3}^L H * t(x) dx \quad x_3 < L, y_3 = H \right.$

	mit t(x) und t(y) als Zeit-Weg Funktionen.
--	--

Tabelle 1. Formelzeichen

LITERATUR

[Bol04] Bol, Georg: *Deskriptive Statistik: Lehr- und Arbeitsbuch* 6. Überarbeitete Auflage 2004 München Wien Oldenbourg, ISBN 978-3-486-57612-7

[CHA14] Chauvin Arnoux *Messkatalog* 2014

[DIN83] DIN 55350 Teil 23: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik Begriffe der Statistik Beschreibende Statistik* Beuth Verlag Berlin 1983

[DIN87] DIN 55350 Teil 13: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen* Beuth Verlag Berlin 1987

[DIN97] DIN EN 1986-1: *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Meßverfahren für Energieausnutzung - Teil 1: Reine Elektrofahrzeuge* Beuth Verlag Berlin 1997

[FEM03] FEM Richtlinie 9.851: *Regalbediengeräte - Leistungsnachweis für Regalbediengeräte – Spielzeiten* Brüssel 2003

[Ger10] Meschede, Dieter: *Gerthsen Physik* 24. Überarbeitete Auflage Springer Verlag Berlin Heidelberg 2010 ISBN 978-3-642-12893-6

[Gud72] Gudehus, Timm: *Grundlagen der Spielzeitberechnung für automatisierte Gochregalläger* dhf Sonderheft 1972

[Gun04] Gundlach, Carsten: *Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung*, Dissertation Universität Kassel 2004

[Gün11] Günthner, W. A.; Schipplick, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: *Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil II, Simulationsmodell für Entwicklung und Betrieb von automatischen Regalbediengeräten* F + H Fördern und Heben, (2011), 7-8, S. 326-329, ISSN 0341-2636

- [Hof11] Hoffmann, Michael: *Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells für Projekte der statistischen Versuchsplanung*, Dissertation Universität Berlin 2011
- [Hop13] Hoppe, Alexander; Lottersberger, Florian; Wehking, Karl-Heinz; Jodin, Dirk: *Verbesserung der Energieeffizienz von Stetigfördereranlagen durch Energiebedarfsmessung und -minimierung Teil 2: Potentiale der Förderer für Paletten und KLT*, Hebezeuge Fördermittel, Berlin 53 (2013) 3 (S.124-127)
- [Kle13] Kleppmann, Wilhelm: *Versuchsplanung Produkte und Prozesse optimieren* Hanser Verlag 8.überarbeitete Auflage ISBN 978-3-446-43752-4
- [Rab08] Rabe, Markus, Spieckermann, Sven, Wenzel, Sigrid: *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik Vorgehensmodelle und Techniken*, Springer Verlag Berlin 2008 ISBN 978-3-540-35281-5
- [Sie10] Siebertz, Karl van Bebber, David, Hochkirchen, Thomas: *Statistische Versuchsplanung* Springer Verlag Heidelberg 2010 ISBN 978-3-642-05492-1
- [Sie13] Siegel, Armin; Schulz, Robert; Turek, Karsten; Schmidt, Thorsten; Zadek, Hartmut: *Modellierung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten und verschiedener Lagerbetriebsstrategien zur Reduzierung des Energiebedarfs* In: 9. Fachkolloquium Logistik. - Dortmund : Verl. Praxiswissen, S. 91-108, 2013 Kongress: Fachkolloquium Logistik; 9 (Dortmund) : 2013.09.17-18
- [Sch97] Scheffler, Eberhard: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker*. 3. Neu überarbeitete und erweiterte Auflage von „Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung“. Stuttgart: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1997
- [Sch13] Schilling, Timo; Amberger, Matthias; Braun, Meike: *Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik*. Hg. v. Rainer Bruns, Willibald A. Günthner und Kai Furmans. Helmut-Schmidt-Universität - Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (Hamburg-Wandsbek); Technische Universität München - Lehrstuhl für Förderer Materialfluss Logistik (München); Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Förderer und Logistiksysteme (Karlsruhe) 2013
- [SuS14] Signale und Systeme http://www.mt-load.de/mt3/regtech/data/02.2_Signale_und_Systeme.pdf aufgerufen am 28.08.2014
- [Trä14] Tränkler, Hans-Rolf, Fischerauer, Gerhard: *Das Ingenieurwissen: Messtechnik* Springer Vieweg Heidelberg 2014 ISBN 978-3-662-44029-2
- [VDI96] VDI Richtlinie 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen Begriffsdefinition* Beuth Verlag, Berlin 1996
- [VDI73] VDI Richtlinie 3561: *Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen*, Beuth Verlag Berlin 1973
- [VDI07] VDI Richtlinie 3633 Teil 8: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Maschinennahe Simulation* Beuth Verlag, Berlin 2007
-
- Dipl.-Ing. Meike Braun**, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Förderer und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Meike Braun studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von 2006 bis 2011. Seit November 2011 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Förderer und Logistiksysteme. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet der Steigerung der Energie- und Gesamteffizienz von fördererischen Gesamtsystemen, z.B. an Regalbediengeräten.
- Adresse: Institut für Förderer und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gottard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,
Tel.: +49 (0)721/608-48638,
E-Mail: Meike.Braun@kit.edu
- Dipl.-Ing. Jochen Kramer**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Informatik (FZI)
- Jochen Kramer studierte Elektro- und Informationstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Schwerpunkte während seines Studiums waren Systems Engineering und modellbasierter Entwurf von Elektrik-

/Elektronikarchitekturen in Fahrzeugen. Seit Dezember 2012 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich ESS am FZI angestellt. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet fahrzeugübergreifender Energieeffizienz und Optimierungen zur Homogenisierung des Verkehrsflusses.

Adresse: FZI Forschungszentrum Informatik, Haid- und Neu-Str. 10-14, 76131 Karlsruhe,
Tel.: +49 (0)721/9654-164,
E-Mail: Jochen.Kramer@fzi.de

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Professor Dr.-Ing. Kai Furmans war nach seinem Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe von 1988 bis 1996 am Institut für Fördertechnik tätig. Seine Promotion schloss er im April 1992 zum Dr.-Ing. ab. Nach einer Postdoktorandenzeit in den USA arbeitete er zwischen 1996 bis 2003 für die Robert Bosch GmbH. Danach kehrte er ans Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme zurück und ist seit Oktober 2005 Institutsleiter. Schwerpunkte seiner Arbeiten sind Materialflussplanung in Bediensystemnetzwerken

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,
Tel.: +49 (0)721/608-48600,
E-Mail: Kai.Furmans@kit.edu