

Reproduzierbarkeit empirischer Erhebungen von Messdaten unter Anwendung statistischer Implikationen

Repeatability of empirical surveys of measured data using statistical implications

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 Wahrung der Reproduzierbarkeit empirisch erhobener Messdaten fordert eine konsequente Anwendung einer einheitlichen und standardisierten Methode. Am IFL des KIT wurde deshalb eine Prozessbeschreibung entworfen, die speziell für die Messung von Fördermitteln der Intralogistik angewandt werden kann. Neben der Vorbereitung und Durchführung der Messungen müssen die erhobenen Daten anschließend statistisch ausgewertet und interpretiert werden. Die Methode wird in diesem Beitrag vorgestellt und am Beispiel von Leistungs- und Energiemessungen angewandt.

[Schlüsselwörter: Evaluation, Statistik, Leistung, Energiebedarf, Regalbediengerät]

Ensuring reproducibility of empirical measurement data needs a consequent utilization of homogeneous and standardized methods. For that an integrative process description was formulated by IFL at KIT which is specially designed for measurements of material handling equipment in intralogistics systems. Beside preparation and performing of the measurements the resulting data have to be statistically analyzed and interpreted. The mentioned method is in the focus of this paper and will be shown on an example of power and energy measurements.

[Keywords: Evaluation, reproducibility, statistics, energy, AS/RS]

1 EINLEITUNG

Die Erfassung physikalischer Größen sowohl im Labor als auch im Industrieumfeld erfolgt meist in Form von Messungen ohne Anwendung geeigneter Messtechniken. Besonders im Fachbereich Fördertechnik kommen Messungen mit unterschiedlichem Fokus zum Einsatz. Gängige Praxis ist jedoch meistens eine kleine, begrenzte Menge an Messwiederholungen durchzuführen und mit Hilfe deren Mittelwerte weitere Schritte zu analysieren. Dabei stellt sich allerdings die Frage, wie reproduzierbar diese

Messdaten erhoben wurden und wie belastbar die Messergebnisse z.B. zur Validierung von Systemmodellen weiterverwendet werden können.

Am IFL des KIT wurde in diesem Zusammenhang eine Vielzahl von Messungen und Analysen unterschiedlicher Fördersysteme durchgeführt. Ähnlich der Aussage „[...] Es ist ein Irrtum zu glauben, in den empirischen Wissenschaften könnte eine, über die Wahrscheinlichkeit hinausreichende Wahrheit erzielt werden“ [Ver94] konnte mit Hilfe dieser Untersuchungen gezeigt werden, dass Messungen, die unter exakt gleichen Voraussetzungen (Messgerät, Transportweg, Parametrierung (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung, Lastmasse)) am selben Fördersystem auch nach zahlreichen Wiederholungen deutlich in ihren Werten streuen. Auch Messungen an baugleichen Geräten mit gleichwertigem Umfeld und Rahmenbedingungen unter Beachtung identischer Vorgehensweise zeigten deutliche Unterschiede. Im Rahmen dieser Experimente und Analysen entstand am IFL eine detaillierte Prozessbeschreibung, welche die einzelnen Schritte der allgemeinen Vorgehensweise zur Durchführung derartiger Messungen in besagtem Kontext verdeutlicht. Bestandteile der Methode wurden bereits in [Bra14] im Detail erläutert. Dieser Beitrag soll sich vor allem um die Angabe und Berechnung der Messwiederholungen und um die Auswertung und Analyse der Messdaten befassen. Als Beispiel dieses Beitrags dienen Leistungs- bzw. Energiebedarfsmessungen von automatisierten Regalbediengeräten.

2 STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG

Die Analyse bestehender Literatur und Forschungsberichte zeigt, dass zur Auswahl der geeigneten Messtechnik oder zum Umgang mit Messunsicherheiten sowie zur statistischen Auswertung von Messdaten bereits zahlreiche Veröffentlichungen, z.B. [JCG08], und Standards, wie die DIN 53804-1 [DIN02], existieren. Zur Bestimmung der geeigneten Anzahl an Wiederholungen oder ei-

ne Definition von geeigneten Messszenarien konnten allerdings nur sehr spärlich Publikationen gefunden werden (z.B. [Gün11] oder [Hop12]). Die Einbindung aller Bestandteile in eine Methode zur reproduzierbaren Ermittlung von Messungen realer Systeme wurde bisher in keiner der Forschungsarbeiten aufgeführt. Diese Lücke soll mit den Arbeiten des IFL geschlossen werden.

Ziel der am IFL durchgeführten Messungen bei Steigtig- und Unstetigförderern ist die Evaluation der bestehenden deterministischen Systemmodelle. Auch bei der Analyse des Stands der Forschung zu den bereits existierenden Quantifizierungsmethoden des Energiebedarfs konnten keine ausreichenden Angaben zur Ermittlung oder Vorbereitung der Vergleichsmessungen gefunden werden. In die Prozessbeschreibung wurden bestehende Ergebnisse aufgenommen und integriert. Fehlende Schritte wurden durch die bereits in einer Vielzahl an durchgeführten Messungen und als nötig empfundene Schritte integriert. Damit folgt aus der Methode [Bra14] und den hier beschriebenen Sachverhalten ein Erkenntnisgewinn.

3 METHODE IM DETAIL

Die Methode zur Erhebung von empirischen Messdaten beinhaltet folgende Teilschritte (in Anlehnung an [Bra14])

- Beschreibung der Systemgrenzen und zu treffende Annahmen
- Definitionsphase der Kenngrößen
- Vorbereitung der Messung
 - Definition der Messtechnik
 - Definition der Messszenarien
 - Definition der Anzahl an Wiederholungen
 - Durchführung der Messung
- Auswertung und Analyse der Messdaten
- Interpretation und Bewertung der Messdaten

Ausgehend der Zielstellung muss das zu messende und zu untersuchende System damit die gleichen Systemgrenzen beinhalten, die bereits in den Simulationsmodellen als Annahmen angegeben wurden. Bei der Definition der Kenngrößen ist darauf zu achten, dass Eingangsgrößen sowie Ausgangsgrößen klar voneinander abgegrenzt werden. Ausgangsgrößen können weiter untergliedert werden in Ziel- und Messgrößen. Zielgrößen könne dabei entweder selbst Messgrößen sein, z.B. kinematische Pa-

rameter wie Geschwindigkeit oder Beschleunigung, oder über Messgrößen berechnet werden. Im Fall von Leistungs- und Energiebedarfsbetrachtungen werden momentane Strom- und Spannungswerte in einer sehr hohen Abtastrate aufgezeichnet und anschließend zur Momentanleistung berechnet. Ausgehend dieser Leistung kann bei Betrachtung eines Zeitintervalls der benötigte Energiebedarf als Integral der Leistung kalkuliert werden. Die Vorbereitung der Messung beinhaltet im Detail drei Teile. Neben der Auswahl der geeigneten Technik muss ein Messszenario definiert werden, das in einer bestimmten Anzahl an Wiederholungen sowie mit variierten Parametrierung durchgeführt werden soll. Bei den Messungen des IFLs wurde netzseitig mit Hilfe von Strom- und Spannungswandlern die jeweiligen Momentanwerte aufgenommen und weiterverarbeitet. Als Messgerät steht dem IFL u.a. das System CA.8335 QualistarPlus der Firma Chauvin Arnoux bereit, das mit einer Abtastrate von 3,3kHz bei einer Messungenauigkeit von 1% arbeitet. Als Messszenario werden Einzelfahrten zu zuvor definierten Fächern für eine ausgewählte Parametrierung durchgeführt und analysiert. Weitere variierende Parameter, z.B. Masse oder Geschwindigkeiten, werden nicht weiter betrachtet. Auf die Angaben zur Anzahl der durchzuführenden Wiederholungen und die anschließende Auswertung der Rohdaten soll nun im Detail eingegangen werden.

4 ANZAHL DER MESSUNGEN

Nachdem das Szenario (Was soll wann angefahren werden?) und die Messtechnik (Wie wird aufgezeichnet?) bestimmt wurden, muss die Anzahl der Wiederholungen, d.h. die Anzahl an wiederholten Durchführungen derselben Tätigkeit bei gleichen Bedingungen, identifiziert werden. Zufällige Fehler oder Einflüsse der Umgebung sollen mit der wiederholten Anfahrt reduziert bzw. ausgeschlossen werden. Mit den reproduzierbar ermittelten Ergebnissen kann eine Gesamtgenauigkeit für Messszenario und Messsystem angegeben und weiter zur Evaluation sowie zur Bestimmung des Geltungsbereichs von Systemmodellen verwendet werden.

Bei der Durchführung von Messungen fiel der in Abbildung 1 dargestellte Sachverhalt auf. Oben in der Abbildung ist eine Messung, unten 4 gleichartige Messungen aufgeführt. Bei Betrachtung der Leistungsspitze (peak) ist erkennbar, dass das Maximum im Wert streut. Nicht jede Messung gleicht dabei der anderen. Auch bei der Analyse der sich aus den Leistungsaufzeichnungen ergebenden Energiebedarfe (Abbildung 2) wird deutlich, dass Wiederholungen des gleichen Szenarios beim gleichen Geräte bei gleichen Bedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

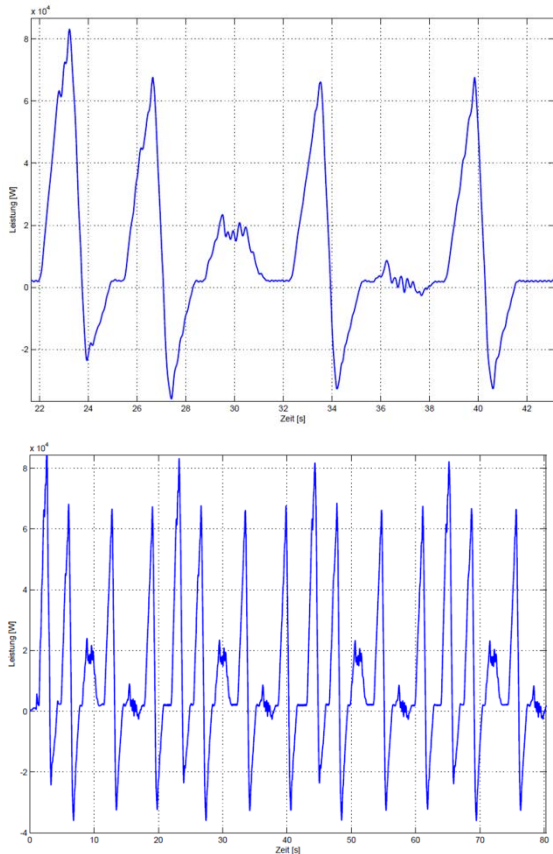


Abbildung 1. Messung des Leistungsverlaufs eines RBGs mit oben: 1maliger und unten: 4maliger Wiederholung für die

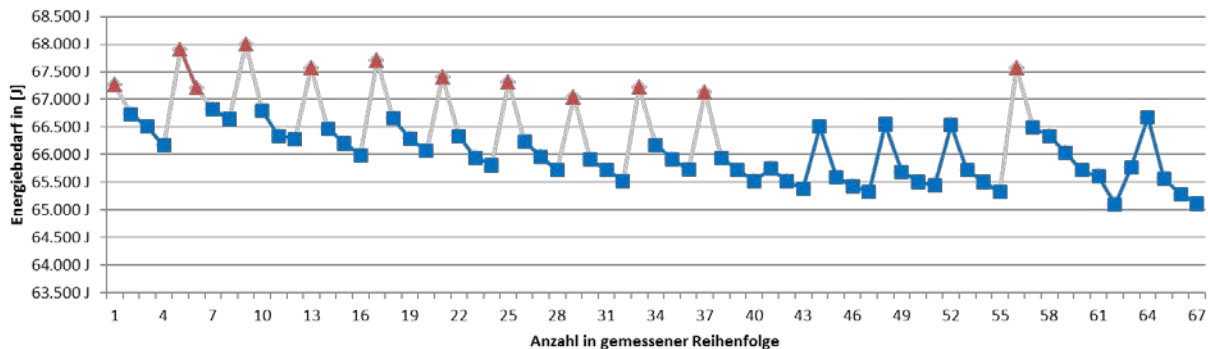


Abbildung 2. Energiebedarfe für ein RBG für Fach (1,1) zu (29,8) in der gemessenen Reihenfolge

Werden nun statt einem Gerät beispielweise drei baugleiche Geräte für das gleiche Messzenario und in der gleichen Umgebung betrachtet ergibt sich die Darstellung in Abbildung 3. Dabei wird deutlich, dass auch bei Fördermitteln, die als „baugleich“ des Herstellers benannt werden kleine Unterschiede sowohl in der Mechanik, als auch bei der Einstellung und Inbetriebnahme auftreten. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in der sich darauf aufbauenden Energiebedarfsberechnungen wieder.

Abbildung 3 zeigt den Leistungsverlauf für die Fachfahrt von (1,1) zu (21,25) und zu (1,1), d.h. eine Hub- und

Kombinationsfahrten: (1,1) zu (17,15) zu (1,1) zu (1,15), zu (17,15) zu (17,1) zu (1,1)

Abbildung 2 zeigt weiterhin für die Fahrt zum Fach (17,15) einen interessanten Sachverhalt. Es ist erkennbar, dass quasi zwei verschiedene Höhen an Energiebedarfen erhoben wurden. Die eine Höhe liegt bis zu ungefähr 66.700J, während die andere Höhe ab ca. 67.100J beginnt. Es ist erkennbar, dass bei mehrmaligem Hinfahren zum Fach lediglich die erste Fahrt nach dem Stillstand des Geräts den erhöhten Wert liefert und mit zunehmender Zeit des Spiels abnimmt. Bei den Messungen wurde jeweils nach 4 Wiederholungen eine kurze Pause eingelegt, in der der Antrieb abkühlen konnte. Das Gerät wurde jeweils aus dem Stillstand und Kaltzustand nach Lüften der Bremse bewegt. Eine mögliche Begründung für den sichtbaren Sachverhalt ist, dass durch die Erwärmung des Geräts mit zunehmender Zeit ein besserer Betriebspunkt erzielt werden kann und damit bessere Wirkungsgrade für die Fahrt erzielt werden können. Damit sinkt mit zunehmender Fahrzeit der Energiebedarf.

Senkbewegung in Kombination mit einer Fahrbewegung. Betrachtet man den Leistungsverlauf der Hinfahrt sieht man im Beschleunigungsteil der Fahrt zwei verschiedene Steigungen, die auf zwei unterschiedliche Beschleunigungen hindeuten. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass im ersten Teil beide Antriebe beschleunigen, danach der Hubantrieb bereits in die Konstantfahrt übergeht, während der Fahrvorgang noch beschleunigt. Im dargestellten Konstantbereich sind beide Antriebe in der Konstantfahrt. Der Abbremsvorgang der Hinfahrt ist wieder gekennzeichnet durch eine Überlagerung von Hub- und Fahrtrieb. Während der Fahrtrieb bereits bremst (d.h. in die-

sem Fall einen negativen Leistungsverlauf hat), fährt der Hubantrieb noch in der Konstantfahrt und erst danach erfolgt eine Kombination der beiden Kurven.

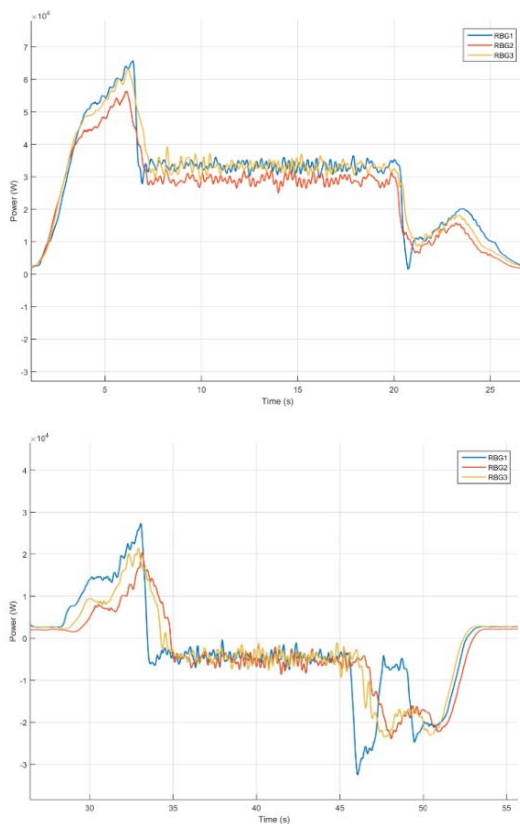


Abbildung 3. Fahrt von (1,1) zu (21,25) zu (1,1) dreier baugleicher RBGs in einem Lager gemessen an einem Tag in kurz aufeinanderliegenden Zeiten vom gleichen Bediener oben: Hin-fahrt, unten: Rückfahrt

Für die Rückfahrt ergibt sich eine ähnliche Betrachtung. Bei der Beschleunigung sind wieder zwei Steigungen erkennbar. Diese deuten erst auf eine gemeinsame beschleunigte Bewegung und danach auf einen ausschließlich fahrbedingten Anteil hin. Der Absolutbetrag ist deutlich kleiner, da bei der Senkbewegung nur Leistung bereitgestellt wird. Die anschließende Konstantfahrt ist ebenfalls gekennzeichnet durch einen deutlich kleineren Absolutbetrag. Beim Abbremsen ergibt sich ein interessanter Sachverhalt, der bei RBG1 zu RBG2 und RBG3 unterschiedlich ist. Es ist bei RBG1 deutlicher erkennbar, dass, wie bei der Hin-fahrt, der Fahrentrieb den Bremsvorgang einleitet. Jedoch scheint nach kurzer Zeit wieder das Konstantniveau erreicht zu werden. Dies könnte auf eine Positionierfahrt vor dem Ein- / Auslagerungspunkt hindeuten. Danach beginnt auch der Senkvorgang mit der Bremsbewegung und beide Antriebe kommen am Ende zum Stillstand. Bei RBG2 und RBG3 wird das Konstantniveau nicht erreicht. Weshalb bei diesen baugleichen Geräten derartige Unterschiede auftreten konnte auch nach Gesprächen mit dem Hersteller nicht im Detail begründet werden.

Ausgehend der vorgestellten Sachverhalte und Mess-ergebnisse, dass eine Messung nicht der anderen gleicht, obwohl gleiche Bedingungen und reproduzierbare Vorgehen gewählt wurden, wird folgende Vorgehensweise zur Bestimmung der geeignetsten Anzahl der Wiederholungen zum Erhalt der Reproduzierbarkeit empfohlen:

In einem ersten Schritt wird ein zu untersuchendes System sowie eine definierte Parametrierung ausgewählt und festgesetzt. In dieser Konstellation werden mind. 60-70 Wiederholungen der gleichen Parameter unter den gleichen Voraussetzungen gemessen. Die anschließende Auswertung zielt vor allem auf die Suche nach Auffälligkeiten (z.B. Analysen der ersten Fachanfahrten). Ausgehend der ermittelten Standardabweichung σ , der Breite des ausgewerteten Konfidenzintervalls L sowie dem t-Faktor in Abhängigkeit des gewünschten Vertrauensbereichs als Tabellengröße kann die geeignete, gerätespezifische Anzahl der Wiederholungen mit Hilfe der Formel

$$n = \left(\frac{2t_{\alpha/2} \sigma}{L} \right)^2 \quad (1)$$

berechnet werden [Mas08]. Bei den Messungen für das RBG aus Abbildung 2 ergaben sich mit dieser Methode für ein Vertrauensbereich $\alpha = 0,05$ etwa 45 Wiederholungen und für $\alpha = 0,25$ etwa 8 Wiederholungen.

Nachdem alle vorbereitenden Schritte definiert und bestimmt wurden können die verschiedenen Messungen in der jeweiligen Anzahl für reproduzierbare Ergebnisse durchgeführt werden.

5 AUSWERTUNG UND ANALYSE DER MESSUNGEN

Abhängig der erforderlichen Informationen für die anknüpfende Analyse wird die maximal benötigte Abtast-rate der Messung festgelegt. Sollen nun Schwingungen bis z.B. 50Hz betrachtet werden, muss nach dem Nyquist-Theorem eine Abtast-rate von mindestens der doppelten rekonstruierbaren Frequenz, das heißt in diesem Fall 100Hz, gewählt werden. Für die Messtechnik bedeutet dies mindestens alle 10ms muss ein neuer Messwert für alle gewünschten Größen ermittelt und aufgezeichnet werden. Da in der Regel aber (auf Grund begrenzter Einstellmöglichkeiten der Abtast-rate) mit einer deutlich höheren Abtast-rate gemessen wird, um somit keine Informationen während der Messung zu verlieren, ist es für die nachfolgende Analyse erforderlich die aufgezeichneten Größen mit Hilfe eines Tiefpassfilters zu filtern. Weiterhin unterliegt jedes gemessene Signal einem Messrauschen, welches sich auf physikalischen Messungenauigkeiten (Temperaturschwankungen, Hintergrundstrahlung, etc.) begründet. Diesem zufälligen Messfehler kann mit einem Moving-Average-Filter (gleitender Mittelwert) entgegengewirkt werden. Dieser Filtertyp bildet wiederkeh-

rend einen Mittelwert über die n letzten Abtastungen, wobei n eine frei wählbare natürliche Zahl ist. Die Zahl n hängt ab von Abtastrate und den Messungenauigkeiten des Messsystems. Abbildung 4 zeigt ein ungefiltertes Messsignal in Anlehnung an Abbildung 1.

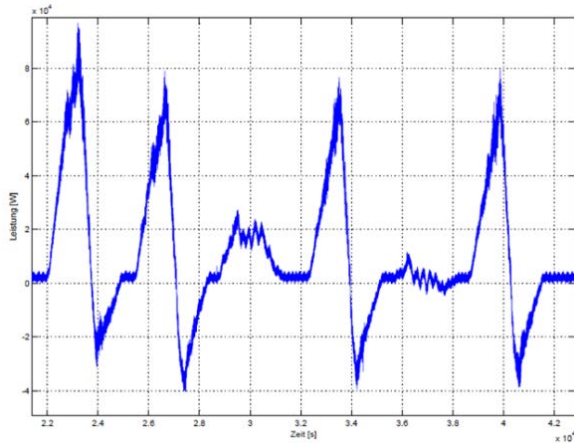


Abbildung 4. Auswertung der Messung ohne Filter des RBGs aus Abbildung 1 der Kombinationsfahrt: (1,1) zu (17,15) zu (1,1) zu (1,15), zu (17,15) zu (17,1) zu (1,1)

Nach der Filterung der Messwerte der Leistungsbeurteilung kann der Energiebedarf kalkuliert werden. Damit sind die Zielgrößen bestimmt. Darauf aufbauend können anschließend mit Hilfe von verschiedensten statistischen Verfahren und Tests diese Werte ausgewertet und analysiert werden. Eine gute Zusammenfassung für kontinuierliche Merkmale liefert DIN 53804-1 [DIN02] mit allen wichtigen und notwendigen Informationen zur ersten Analyse. So können z.B. die Energiedaten nach Ausreißern analysiert, Boxplots zur Visualisierung der ermittelten Werte sowie Histogramme zur Überprüfung der Verteilung erstellt werden. Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein Häufigkeitsdiagramm für den Energiebedarf eines RBGs für Fahrt (1,1) zu (17,15)

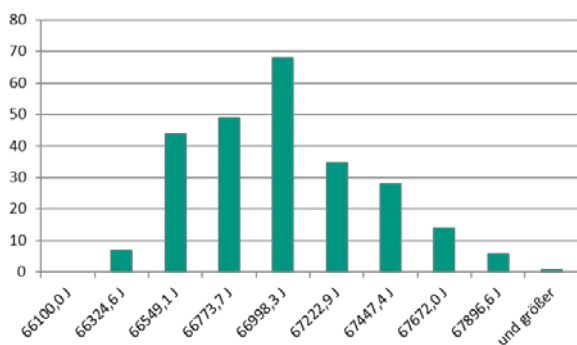


Abbildung 5. Histogramm für Fahrt (1,1) zu (17,15) ohne erste Fahranteile des RBGs aus Abbildung 1

Nach Auswertung und Analyse folgt die Bewertung und Interpretation der Ergebnisse. Für alle Schritte der Methode gilt eine Dokumentationspflicht, damit eine Reproduzierbarkeit gewährleistet ist.

6 ANGABE ZUR GENAUIGKEIT DER MESSUNGEN

Anhand der interpretierten und bewerteten Ergebnisse der statistischen Tests können für die verschiedenen Messszenarien minimale, maximale und mittlere Abweichungen der Energiewerte angegeben werden. Für das in diesem Beitrag betrachtete AKL-RBG aus Abbildung 1 ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 1. Übersicht der Abweichungen für das RBG über alle Messszenarien

	Minimale Abweichung	Maximale Abweichung	Mittlere Abweichung
RBG	1%	16%	3%

Braun, 2015

Das Ziel der Messungen des IFL ist es verschiedene Möglichkeiten der Energiebedarfsquantifizierung zu evaluieren. Auf Grund der Ergebnisse ist erkennbar, dass durch Messungen weitere Ungenauigkeiten entstehen. Zusätzlich dazu muss die Messunsicherheit des Messgeräts noch hinzuaddiert werden, sodass im Mittel mit 4% Unsicherheit gerechnet werden muss. Für die Betrachtung des Geltungsraums dieser Varianten muss damit bereits durch die Messungen diese Unsicherheit berücksichtigt werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde die Prozessbeschreibung zur Erhebung von empirischen Messdaten mit Fokus auf den Teilschritten „Bestimmung der Anzahl an Wiederholungen“ und der „Auswertung und Analyse“ beschrieben. Mit Hilfe dieser einheitlichen Vorgehensweise können Genauigkeiten der jeweiligen Messungen beliebiger Systeme angegeben und zur weiteren Verwendung, z.B. zur Evaluation von Systemmodellen angewandt werden

LITERATUR

- [Bra14] Braun Meike, Kramer Jochen, Furmans Kai: *Validierung intralogistischer Systemmodelle anhand gemessener Kenngrößen*. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2014, München 2014
- [DIN02] DIN 53804-1: *Statistische Auswertung – Teil 1: Kontinuierliche Merkmale* 2002-04, Beuth
- [Gün11] Günthner, W. A.; Schippl, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: *Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil I, Simulationsmodell für Entwicklung und Betrieb von automatischen Regalbediengeräten*. F + H Fördern und Heben (2011), 06, S. S. 276-279, ISSN 0341-2636
- [Hop12] Hoppe Alexander, Wehking Karl-Heinz: *Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers*. Logistics Journal, Vol. 2012, Magdeburg 2012
- [JSG08] JCGM: *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurements*, 100:2008
- [Mas08] Mason, Robert L., Gunst, Richard F., Hess, James L.: *Statistical Design and analysis of Experiments*, 2nd Edition, Wiley-interscience, 2008, ISBN: 978-0471372165
- [Ver94] Laurent Verycken: *Formen der Wirklichkeit – Auf den Spuren der Abstraktion*, Penzberg, 1994

Dipl.-Ing. Meike Braun, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fördertechnik 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 Fördertechnik und Logistiksysteme. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet der Simulation, Messung und Steigerung der Energie- und Gesamteffizienz von fördertechnischen Gesamtsystemen, z.B. an Regalbediengeräten.

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gotthard-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