

Spielzeitanalyse von RBGs – Vergleich von Theorie und Realität

Time analysis of stacker cranes - comparing theory with reality

Meike Braun¹
Jochen Kramer²

¹Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

²Forschungszentrum Informatik (FZI)
Forschungsbereich Embedded Systems and Sensors Engineering (ESS)

Spielzeiten von RBGs sind in der heutigen Zeit ein entscheidendes, markendifferenzierendes Kriterium bei der Abnahme von Lagerdurchsätzen. In diesem Beitrag werden die aktuellen Forschungsergebnisse zur Spielzeitanalyse an RBGs vorgestellt sowie Begründungen und Antworten auf die Leitfragen gegeben: Wie groß ist der Unterschied der mittleren Spielzeiten beim Einzelspiel zwischen Realität und Theorie?

[Regalbediengerät, Spielzeitanalyse, Konstant beschleunigte Bewegung, mittlere Spielzeit, Einzelspiel]

Timing constraints are major competitive parameters for the differentiation of stacker cranes in throughput. For that reason we will present in this paper our actual research results of timing analysis of stacker cranes and give answers to the research question: How big is the difference in mean single command cycle time between reality and theory?

[Stacker crane, time analysis, constant accelerated movement, mean travel time, single command cycle]

1 EINLEITUNG

Für Unstetigförderer, wie z.B. das Regalbediengerät (RBG), ist eine der wichtigsten charakterisierenden Größe die für eine Förderaufgabe benötigte Spielzeit, d.h. der Zeitbedarf eines Arbeitsspiels. Klassischerweise werden Arbeitsspiele als ein gleich oder ähnlich wiederkehrender Bewegungsablauf eines jeden Fördervorgangs beschrieben. Da beim RBG ein Arbeitsspiel meist aus der Fahrt zu verschiedenen Lagerfächern oder Positionen besteht, definiert man eine weitere Größe, die sogenannte mittlere Spielzeit bzw. ein mittleres Arbeitsspiel. [Arn09]

Forschung im Rahmen der Spielzeitanalyse wurde bereits in den 1970er Jahren u.a. mit den Schriften von Gude-

hus, z.B. in seinem Artikel „Grundlagen der Spielzeitberechnung für automatisierte Hochregallage“ [Gud72] betrieben. Die darin grundlegend hergeleiteten Spielzeitformeln werden jeweils an den gleichen Stellen vereinfacht, in dem anstelle einer konstant beschleunigten Bewegung bestehend aus einer Normalfahrt und Spitzfahrt ausschließlich eine konstante, maximale Geschwindigkeit ohne Berücksichtigung von Beschleunigungen verwendet wird (siehe Abbildung 1)

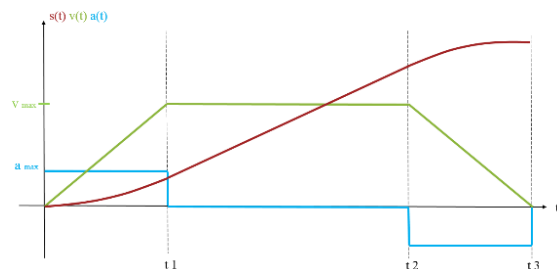


Abbildung 1. Normalfahrt einer konstant beschleunigten Bewegung [Bra16]

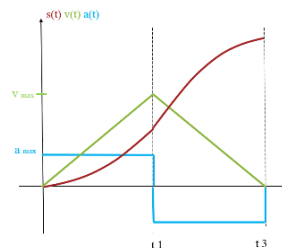


Abbildung 1a. Spitzfahrt einer konstant beschleunigten Bewegung [Bra16]

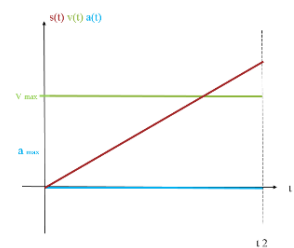


Abbildung 1b. Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit [Bra16]

Als Begründung werden sowohl die geringen Dynamiken von „derzeitigen“ RBGs und damit der geringe Anteil an der Gesamtanzahl der Arbeitsspiele einer Lagerfront angegeben.

In der heutigen Zeit spielen jedoch die Dynamiken und damit die Beschleunigungen eines RBGs eine entscheidende, wettbewerbsdifferenzierende Größe der RBG-Hersteller. Besonders bei Spielzeitmessungen an realen Geräten wurden deutliche Unterschiede zwischen den charakteristischen Fächern nach der herkömmlichen Berechnung und den tatsächlichen Lagerfächern identifiziert. Speziell bei der Betrachtung der Schnellläuferzonen ergeben sich hier extreme Unterschiede der Spielzeiten. Deshalb ist es unbedingt erforderlich erweiterte Annahmen in die Spielzeitberechnungen einfließen zu lassen.

2 GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG DER SPIELZEIT

Die Wegzeiten des RBG werden „von dem Verhältnis der Fahrgeschwindigkeiten des Regalbediengeräts zur Ausdehnung des Lagers in horizontaler bzw. vertikaler Richtung bestimmt“ [Arn09]. Nach [Gud72] gilt für das Verhältnis der Fahrgeschwindigkeiten zu den Ausdehnungen des Lagers unter der Annahme konstanter Geschwindigkeiten ohne Berücksichtigung der Beschleunigungen in x- (Fahrt) und y-Richtung (Hub-/Senkbewegung) der Wandparameter w . Er ist definiert über

$$w = \frac{\frac{H}{L}}{\frac{v_y}{v_x}} = \frac{v_x}{v_y} \cdot \frac{H}{L} \quad (1)$$

In [Sch69] und [Zsc64] werden die mittleren Spielzeiten unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit, ohne Berücksichtigung der Beschleunigung hergeleitet.

Vergleicht man die synchrone Bewegung eines RBGs, d.h. dem zeitgleichen Erreichen der Antriebe in x- und y-Richtung, mit den Annahmen einer konstant beschleunigten Bewegung und der Annahme einer konstanten Geschwindigkeitsbewegung so ergeben sich folgende Lagerfächer:

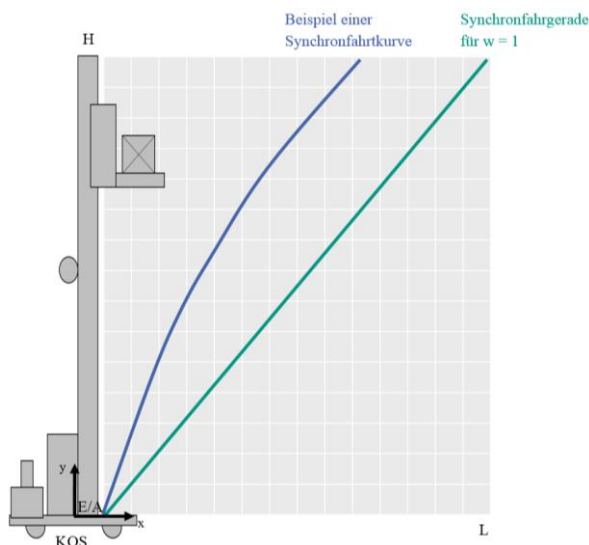


Abbildung 2. Vergleich der Synchronfahrkurven mit $w=1$, d.h. konstante Geschwindigkeit, ohne Beschleunigungen und der Kurve für eine konstant beschleunigte Bewegung [Bra16]

Als Synchronfahrkurve wird die Fahrtrasse des RBGs bei einer synchronen Bewegung beider Antriebe bezeichnet. Die Unterschiede beider Kurven sind deutlich zu erkennen. Deshalb wird nachfolgend auf die Modellierung der Spielzeit in Form einer konstant beschleunigten Bewegung im Vergleich zur Herleitung als konstante Geschwindigkeit eingegangen.

Mathematisch kann der Zusammenhang für den Weg unter der Annahme von gleicher Be- als auch Entschleunigung folgendermaßen beschrieben werden [Bra16]:

$$s_{Ges} = \begin{cases} \frac{1}{4} a t_{Ges}^2 & \text{für } t_{Ges} \leq \frac{2v_{Max}}{a} \\ t_{Ges} v_{Max} - \frac{v_{Max}^2}{a} & \text{für } t_{Ges} > \frac{2v_{Max}}{a} \end{cases} \quad (2)$$

und für die Gesamtzeit

$$t_{Ges} = \begin{cases} \frac{2v_{Max}}{a} & \text{für } s_{Ges} \leq \frac{v_{Max}^2}{a} \\ \frac{v_{Max}}{a} + \frac{s_{Ges}}{v_{Max}} & \text{für } s_{Ges} > \frac{v_{Max}^2}{a} \end{cases} \quad (3)$$

Der Zeitpunkt, bei dem die Spitzfahrt in die Normalfahrt übergeht, wird als t_{Grenz} bezeichnet. Es muss unterschieden werden welche Bewegungsrichtung zuerst in die Normalfahrt übergeht und hierfür jeweils eine Fallunterscheidung durchgeführt werden.

Durch den Einsatz zweier Fahrtriebe ergeben sich damit drei Bereiche [Bra16], die in Abbildung 3 auch visualisiert sind:

- Bereich 1, in dem die Antriebe beider Achsen in einer Spitzfahrt sind
- Bereich 2, in dem einer der Antriebe bereits in der Normalfahrt, der andere jedoch noch in der Spitzfahrt ist
- Bereich 3, in dem beide Bewegungsachsen in der Normalfahrt sind.

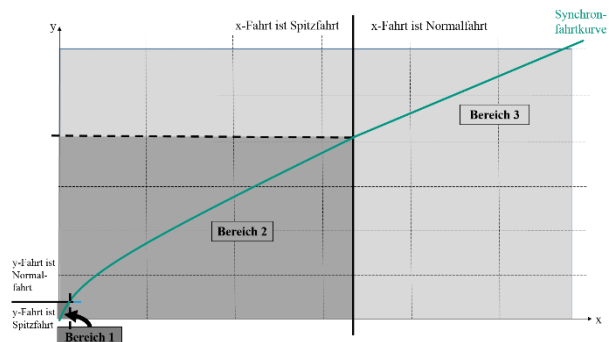


Abbildung 3. Prinzipdarstellung der Synchronfahrkurve mit Darstellung der drei Bereiche [Bra16]

Unter Anwendung der grundlegenden Formeln kann nun die Fahrzeit für jedes beliebige Lagerfach einer Lagerfront berechnet werden. Maßgebend für die mittlere Spielzeit und damit für die Umschlagleistung sind jedoch mittlere Fahrzeiten. Die Zeitanteile zur Modellierung dieser mittleren Spielzeit eines Einzelspiels sind nach [Arn09]

$$t_s = t_0 + 2t_z + 2\max\{t_x, t_y\} \quad (4)$$

- t_0 : Totzeitanteil, zum Beispiel für Reaktions- und Schaltzeiten,
- t_z : Zeit zur Übergabe des Ladeguts
- t_x : Wegzeit in x- Richtung
- t_y : Wegzeit in y- Richtung

Sowohl t_0 als auch t_z sind konstante Werte. Die wegzeitabhängigen Anteile sind entscheidend für die mittlere Spielzeit. Der Ansatz zur Berechnung der mittleren Spielzeit eines Einzelspiels kann in Analogie zu [Gud72] oder [Arn09] verwendet werden. Lediglich bei der Berechnung der Maximum-Funktion muss eine Unterscheidung getroffen werden. Während bei der konstanten Geschwindigkeit die Synchronfahrgerade die Lagerfront in zwei gleichgroße Bereiche unterteilt, entstehen bei der Synchronfahrkurve sechs verschieden große Bereiche. Eine ungewichtete Summation der Zeiten würde bei der Mittelwertbildung einen Fehler entstehen lassen und eine entsprechende Verfälschung der mittleren Spielzeit verursachen. Deshalb müssen die bereichsabhängigen Zeitanteile bezüglich ihrer Flächenanteile, multipliziert werden, um eine Mittelwertbildung der gesamten Lagerfront zu ermöglichen. Für den

Erwartungswert der wegabhängigen Zeitanteile ergibt sich damit

$$E(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{MAX}\{t_x(s_x) \cdot s_y(s_x); t_y(s_x) \cdot s_y(s_y)\} \quad (4)$$

Die detaillierte Herleitung ist [Bra16] zu entnehmen. Zur Berechnung der mittleren Spielzeit des gesamten Lagers ergeben sich schließlich folgende Formeln:

$$E(t_{\text{Mittel}}) = 2 \cdot \begin{cases} \frac{1}{2H} (E(t_{1,x})(x_1y_1) + E(t_{2n,x})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,x})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{1,y})(x_1y_1) + E(t_{2n,y})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,y})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{2L})(H - y_3)) & \text{für } t_{\text{Grenz},x} > t_{\text{Grenz},y} \wedge x_3 = L \wedge y_3 < H \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x})(x_1y_1) + E(t_{2n,x})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,x})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{1,y})(x_1y_1) + E(t_{2n,y})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,y})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{2H})(L - y_3)) & \text{für } t_{\text{Grenz},x} > t_{\text{Grenz},y} \wedge y_3 = H \wedge x_3 < L \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x})(x_1y_1) + E(t_{2n,x})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,x})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{1,y})(x_1y_1) + E(t_{2n,y})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,y})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{2L})(H - x_3)) & \text{für } t_{\text{Grenz},x} < t_{\text{Grenz},y} \wedge x_3 = L \wedge y_3 < H \\ \frac{1}{2H} (E(t_{1,x})(x_1y_1) + E(t_{2n,x})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,x})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{1,y})(x_1y_1) + E(t_{2n,y})(x_2y_2 - x_1y_1) + E(t_{3,y})(x_3y_3 - x_2y_2) + E(t_{2H})(L - x_3)) & \text{für } t_{\text{Grenz},x} < t_{\text{Grenz},y} \wedge y_3 = H \wedge x_3 < L \end{cases} \quad (5)$$

Im nachfolgenden Kapitel werden die tatsächlichen mittleren Spielzeiten (mit Berücksichtigung der Beschleunigungsanteile) mit den Zeitanteilen konstanter Geschwindigkeitsbewegungen verglichen.

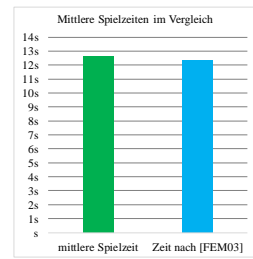
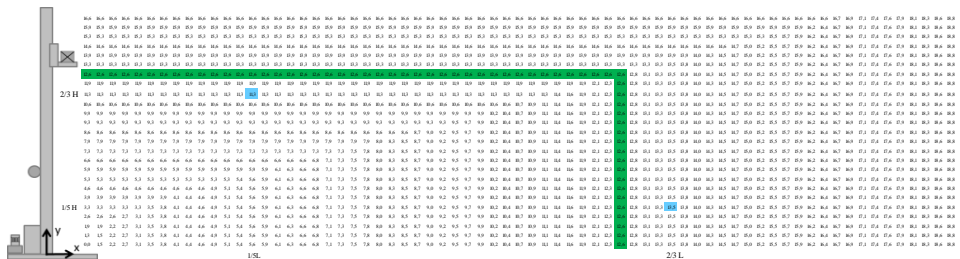


Abbildung 4. Darstellung der mittleren Spielzeit der Lagerfächer bei einer 3-Phasen Fahrt (Konstant beschleunigte Bewegung) und vereinfachte Berechnung mit $w=1$, $L=42m$, $H=10m$, $v_x=5\frac{m}{s}$, $v_y=1,2\frac{m}{s}$, $a_x=4\frac{m}{s^2}$, $a_y=4\frac{m}{s^2}$ relativer Fehler: 2%

3 UNTERSCHIEDE DER MITTLEREN SPIELZEITEN BEIM EINZELSPIEL

Die Lage der Isochronen ist wie bisher über die Maximum-Funktion von Fahr- und Hubbewegung dominiert und entspricht dem bekannten Bild (siehe [Gud72]). In Abbildung 4 sind die mittleren isochronen Lagerfächer der Berechnung unter Annahme der konstant beschleunigten Bewegung sowie die Lagerfächer nach FEM

9.851[FEM03] dargestellt. Die in FEM 9.851 ausgewählten Fächer sind auf Grundlage der Erkenntnisse aus [Gud72] und dem damaligen Stand der Technik ausgewählt worden.

Erkennbar sind klare Unterschiede zwischen den Berechnungen. In [Gud72] wird die Vereinfachung verwendet, da sich keine analytischen, für Optimierungszwecke geeigneten Beziehungen ergeben. Der maximale Fehler von 0,3s kann jedoch nicht pauschal bestätigt werden, da je

nach Geschwindigkeitsverhältnis oder Beschleunigungsverhältnis der Bewegungsrichtungen auch größere Fehler auftreten können.

Nach [Arn07] wird die Vereinfachung verwendet, da die Zeiten für kurze Fahrwege mit der vereinfachten Formel zu groß erscheinen, allerdings durch den geringen Anteil der Beschleunigungsbewegung an der Gesamtzahl der Arbeitsspiele „einen unbedeutenden Fehler bewirken“. Aufgrund der geringeren Dynamiken der RBGs in den 1970er Jahren konnte mit den Annahmen realitätsnahe Ergebnisse berechnet werden. Heutzutage mit der Erhöhung der Dynamiken entstehen jedoch erhebliche Ungenauigkeiten, die zu einer Verfälschung der Ergebnisse beitragen.

Weiterhin ist die Lage der Synchronfahrkurve zu beachten. Während in der Literatur die Synchronfahrgerade mit der Vereinfachung vom Ursprung aus eingezeichnet ist, müsste die Lage um einen Versatz in y-Richtung (in Abhängigkeit des Beschleunigungsverhältnisses zwischen Hub- und Fahrbewegung) verschoben sein, da die Synchronfahrkurve lediglich aus Bereich 3 besteht. Werden auch Bereich 1 und 2 berücksichtigt entspringt die Synchronfahrkurve dem Ein/Auslagerpunkt (siehe Abbildung 5).

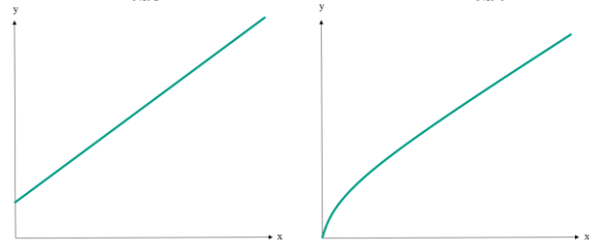


Abbildung 5. Synchronfahrgerade mit und ohne Berücksichtigung von Beschleunigungsanteile (links mit konstanter Geschwindigkeit, rechts mit Beschleunigungsanteil)

Im nachfolgenden Kapitel werden nun verschiedene Lagerlayouts und deren relativen Fehler zwischen den Spielzeiten visualisiert und analysiert.

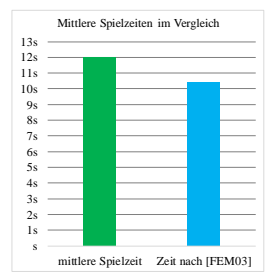


Abbildung 6. Darstellung der mittleren Spielzeit der Lagerfächer für $w=0,32$, $L=42m$, $H=10m$, $v_x=4,3\frac{m}{s}$, $v_y=3,2\frac{m}{s}$, $a_x=4\frac{m}{s^2}$, $a_y=4\frac{m}{s^2}$ relativer Fehler: 14%

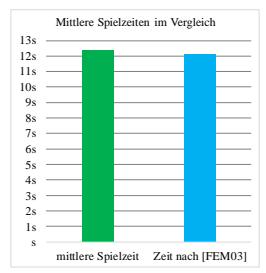


Abbildung 7. Darstellung der mittleren Spielzeit der Lagerfächer für $w=1,9$, $L=42m$, $H=10m$, $v_x=8\frac{m}{s}$, $v_y=1\frac{m}{s}$, $a_x=4\frac{m}{s^2}$, $a_y=4\frac{m}{s^2}$ relativer Fehler: 2%



Abbildung 8. Darstellung der mittleren Spielzeit der Lagerfächer für $w=0,32$, $L=42m$, $H=10m$, $v_x=4,3\frac{m}{s}$, $v_y=3,2\frac{m}{s}$, $\alpha_x=1\frac{m}{s^2}$, $\alpha_y=4\frac{m}{s^2}$ relativer Fehler: 8%

4 ANALYSE DER SPIELZEITEN

Die Analyse der Spielzeiten wird auf Basis eines real existierenden Lagers durchgeführt, das sich in dieser Dimensionierung auch im industriellen Umfeld im Einsatz befindet. Es besitzt eine Lagerfront mit einer Länge von 42m und einer Höhe von 10m. Die gemessenen Maximalgeschwindigkeiten liegen in Fahrrichtung bei 4,3m/s und in Hubrichtung bei 3,2m/s. Diese Konstellation entspricht somit dem Wandparameter $w=0,32$, was im realen Einsatz nicht unüblich ist, da sich die Geschwindigkeiten nur sehr marginal ändern, während sich Lagerdimensionierungen allerdings stark voneinander unterscheiden können.

Abbildung 6, 7 und 8 zeigen jeweils eine Lagerfront mit den mittleren realen Spielzeiten sowie den Zeiten nach [FEM03]. Es wurde dabei ein maximaler Fehler für die dargestellten Beispiele von 14% identifiziert. Qualitativ ist zu erkennen, dass mit einer Zunahme der Beschleunigungswerte, ein zunehmender relativer Fehler zwischen den Spielzeiten auftritt. Umfangreiche quantitative Untersuchungen folgen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für Spielzeitberechnungen und Optimierungen wie auch alle darauf aufbauenden Analysen, z.B. des Energiebedarfs, wird empfohlen Formel (5) bzw. die in [Bra16] hergeleiteten Berechnungsvorschriften unter Annahme der konstant beschleunigten Bewegung zu verwenden, da mit den aus der Literatur bekannten Formeln zur Realität stark abweichende Ergebnisse erzielt werden. Diese Abweichungen treten aufgrund der nicht berücksichtigten Beschleunigungsanteile auf.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden weitere Forschungsarbeiten durchgeführt. Ziel ist in die Analyse auch andere Lagerfächer, z.B. [VDI73], zu integrieren sowie eine Abschätzungsformel für die Fehlerabweichung bzw. eine einfache Ermittlungsmethode der jeweiligen repräsentativer Fächer zu entwickeln.

LITERATUR

[Arn09] Arnold, Dieter; Furmans Kai: Materialfluss in Logistiksystemen, 6.erweiterte Auflage, 2009, Springer Verlag, Heidelberg, ISBN 978-3-642-01404-8

[Bra16] Braun, Meike: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten, Diss., 2016 – Karlsruher Institut für Technologie

[FEM03] Federation Europeenne de la Manutention: FEM 9.851: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte Spielzeiten. VDMA Frankfurt 2003

[Gud72] Gudehus, Timm: Grundlagen der Spielzeitberechnung für automatisierte Hochregallager, deutsche hebe- und förder-technik, Nr.64, 1972

[Sch69] Schaab, Wilhelm: Automatisierte Hochregalanlagen : Bemessung und Wirtschaftlichkeit. Düsseldorf, Diss., 1969

[VDI73] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3561: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. Beuth Verlag, Berlin 1973

[Zsc64] Zschau, Ulrich: Technisch-wirtschaftliche Studie über die Anwendbarkeit von Stapelkränen im Lagerbetrieb, Diss., 1964. – Berlin, Techn. Univ., Diss., 1964

Dr.-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).

Meike Braun studied mechanical engineering at Karlsruhe Institute of Technology (KIT) from 2006 to 2011. Since November 2011, she works at IFL, in July 2016 she graduated. Her research topics are simulation, measurements, improvement of overall energy efficiency of material handling systems.

E-Mail: Meike.Braun@kit.edu

Address: Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,
Phone: +49 (0)721/608-48619,

Dipl.-Ing. Jochen Kramer, Research Scientist at Forschungszentrum Informatik (FZI)

Jochen Kramer studied electrical engineering and information technology at Karlsruhe Institute of Technology (KIT). His focus lays on systems engineering and model based design of electric/electronic architectures of road vehicles. He wrote his diploma thesis in the topics of system architecture modeling, electrical powertrains and functional safety. Since 2012 he is working as a research scientist in the department of Embedded Systems and Sensors Engineering (ESS) at FZI. His major research topics are energy efficiency for road vehicles in combination with increasing traffic flow on a basis of interacting traffic users.

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