

Entwicklung eines Versuchsfelds für große Systeme intelligenter Behälter

Development of a testbed for systems of intelligent load carriers

Moritz Roidl, Jan Emmerich, Mojtaba Masoudinejad, Andreas Riesner, Michael ten Hompel

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund

Im Rahmen dieses Artikels werden aktuelle Forschungsarbeiten zum Einsatz von Energy-Harvesting und Ultra-Low-Power-Geräten in Materialflusssystemen beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wird auf die inBin-Plattform, das Energy-Harvesting und deren Auswirkungen auf die Leistungsverfügbarkeit gelegt. Dazu werden die Hardwareplattform und Architektur der inBin-Plattform sowie der Aufbau eines Versuchsfelds detailliert erläutert. Des Weiteren wird ein Ansatz zur Modellierung und Simulation von Systemen mit einer großen Anzahl von inBin-Plattformen vorgestellt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse zweier simulierter Szenarien und mögliche Folgen für die Planung zukünftiger Materialflusssysteme betrachtet.

[Schlüsselwörter: Cyberphysische Systeme, Intralogistik, Leistungsverfügbarkeit, Energy-Harvesting]

This paper provides a description and analysis of research in material handling systems in regard to energy-harvesting, ultra-low-power devices. Particular attention is paid to the inBin smart device, energy-harvesting, and the performance availability of material handling systems. A detailed description of the hardware platform, architecture and testbed is provided and an approach to model systems with a large number of devices is presented. Within the proposed model, two scenarios are simulated and their implications for the architecture of future materials handling systems are discussed.

[Keywords: Cyber-Physical System, Facility Logistics, Performance Availability, Energy-Harvesting]

1 EINLEITUNG

Der Einsatz cyberphysischer und eingebetteter Systeme in der Logistik ist Teil einer in den letzten Jahren fortschreitenden Entwicklung hin zu einem übergreifenden Internet der Dinge. Aktuelle Forschungsarbeiten untersuchen den massiven Einsatz von verteilten, eingebetteten Systemen als Basis für moderne Produktions-, Transport- und Distributionsstrategien im Rahmen einer *Industrie*

4.0, deren Kernkonzept auf einem cyberphysischen System basiert (vgl. [ERB⁺12], [RRH13], [LGW⁺13]). Dieses besteht aus einer Vielzahl von intelligenten Geräten, die das Produktions- oder Logistiksystem selbstständig steuern (vgl. [RHB⁺13], [Vog13]). Diese Geräte organisieren Transportbewegungen und verwenden externe Dienste entlang der Supply Chain. Obwohl die Forschung im Bereich der dezentral gesteuerten Materialflusssysteme in den vergangenen Jahren Erfolg versprechende Ergebnisse geliefert hat, wurde für die zentrale Grundidee des Internet der Dinge, dem intelligenten, vollständig autarken Ladungsträger bzw. Werkstück, eine überzeugende und praktisch anwendbare Implementierung noch nicht gefunden. Die aktuellen Entwicklungen in der Ultra-Low-Power-Technologie für drahtlose Sensornetze lassen hier jedoch einen Durchbruch in der näheren Zukunft für möglich erscheinen.

In der aktuellen Forschung wird für die grundsätzliche Bewertung eines logistischen Systems das Konzept der Leistungsverfügbarkeit verwendet, die über den Erfüllungsgrad von weichen Echtzeitanforderungen definiert ist. Sie ist dabei maßgeblich von spezifizierten Geschäftsprozessen abhängig, und nicht mehr direkt von der technischen Verfügbarkeit der einzelnen Teilkomponenten (vgl. [Mai12], [JH13]). Des Weiteren wird die hauptsächliche Anforderung an die Leistung fast immer über einen gewünschten Durchsatz durch termingerecht ausgeführte Transportaufträge des Gesamtsystems definiert. Die Leistungsverfügbarkeit ist als Schlüsselbegriff in der VDI-Richtlinie 4486 definiert als:

„Die Leistungsverfügbarkeit gibt den anforderungsgerechten und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen an.“

Der Erfüllungsgrad kann entweder über akkumulierte Wartezeiten berechnet werden oder über die Zahl verspätet ausgeführter Terminaufträge. Die VDI-Richtlinie 4486 beschreibt jedoch nur die Messung der Leistungsverfügbarkeit bereits existierender Systeme, üblicherweise als Teil des Inbetriebnahmeprozesses, mit dem Ziel der Ab-

nahme und Prüfung eines vertraglich vereinbarten Leistungsversprechens. Jedoch existieren derzeit keine Planungsmethoden in Bezug auf die Leistungsverfügbarkeit logistischer Systeme.

Die Eignung eines Embedded Systems für eine logistische Aufgabenstellung ist immer im Zusammenhang mit den spezifischen Anforderungen von Materialflusssystemen zu bewerten. Üblicherweise wird die Leistung eingebetteter Systeme über generische Benchmarks bewertet, die zum Beispiel ausschließlich allgemeine Rechenoperationen und Algorithmen betrachten. Dies hat zwar den Vorteil, dass verschiedene Elektronikplattformen einfach verglichen werden können, es kann aber auch der Anwendungsbezug verloren gehen, solange dieser nicht direkt im Benchmark verankert ist. Das hat zur Folge, dass es bislang auch keine Planungsmethoden für in komplexe Materialflusssysteme eingebettete Elektronikplattformen gibt. Dies beschränkt sich nicht nur auf die Logistik, vielmehr ist die Beweisführung, dass eine verteilte, eingebettete Systemplattform den Anforderungen eines komplexen Anwendungskontextes genügt, mit den in der Informatik verfügbaren Methoden nur sehr beschränkt möglich (vgl. [NER⁺13]).

Eine weitere Herausforderung an Systeme verteilter und ressourcenbeschränkter Geräte stellt das Kommunikationsverhalten dar, das einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistung des Gesamtsystems nimmt. Aus der klassischen Sichtweise eines Logistikplaners wäre die Leistungsbewertung nur eine einfache Frage der technischen Verfügbarkeit individueller Komponenten, die eine Nichterreichbarkeit und andere Kommunikationsprobleme als Ausfall wertet. Nichtsdestotrotz fehlen auch hier die Planungsmethoden für logistische Systeme der Industrie 4.0, um solche Systeme drahtloser Sensorknoten so auszulegen, dass eine spezifische Leistung erreicht wird. Konsequenterweise stehen heutzutage auch keinerlei Analysewerkzeuge zur Verfügung, die zur Lösung derartiger Probleme beitragen könnten.

Dieser Artikel ist folgendermaßen gegliedert: Abschnitt 2 beschreibt den intelligenten Behälter *inBin*, der mit dem Ziel energieneutralen Betriebs entwickelt wurde. Abschnitt 3 betrachtet den Begriff der Leistungsverfügbarkeit im Kontext des *inBin*. In Abschnitt 4 wird die Architektur eines Versuchsfelds vorgestellt, das die Bewertung und Untersuchung einer Vielzahl von *inBins* erlaubt. Abschnitt 5 stellt einen Ansatz zur Simulation zweier unterschiedlicher Kommunikationsstrategien für Systeme mit einer großen Anzahl von *inBin* vor. Im Anschluss werden die Ergebnisse dieser Simulationsversuche und die Auswirkungen auf die Planung moderner logistischer Systeme betrachtet. Abschließend werden in Abschnitt VI die Ergebnisse dieses Artikels zusammengefasst und die Pläne für zukünftige Arbeiten vorgestellt.

2 DER INTELLIGENTE BEHÄLTER

Der intelligente Behälter *inBin* (siehe Abbildung 1) wurde gemäß den Anforderungen an einen Ladungsträger für Materialflusssysteme im Internet der Dinge entwickelt. Er speichert nicht nur Daten über seinen Inhalt und kennt nicht nur seine Position im System, sondern arbeitet vollkommen energieneutral. Zusätzlich hat er die Möglichkeit, über ein grafisches Display und Bedienknöpfe mit einem menschlichen Benutzer zu interagieren. Die Kommunikation mit einem übergeordneten Verwaltungssystem wird über eine Sende- und Empfangseinheit durchgeführt.



Abbildung 1. Der intelligente Behälter „inBin“

Der *inBin* kann in klassischen Logistikanwendungsfällen im Lager eingesetzt werden und kann zusätzlich die Funktion eines mobilen Kommissionierplatzes übernehmen (siehe Abbildung 2). Gegenüber traditionellen Pick-by-Light-Systemen hat er den Vorteil, dass die Verkabelung vollständig entfallen kann. Dies verringert nicht nur die Installationskosten, sondern erhöht die Flexibilität und Skalierbarkeit des Materialflusssystems, da neue Regale im laufenden Betrieb hinzugefügt und neu angeordnet werden können.

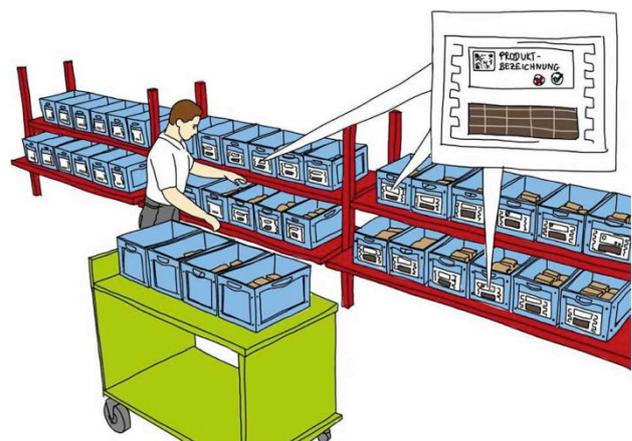


Abbildung 2. Der *inBin* in einer Kommissionieranwendung

Abbildung 3 zeigt ein Diagramm der funktionalen Einheiten des inBin: die Solarzelle, den Ladecontroller mit Maximum Powerpoint Tracking (MPPT), ein Energiespeicher und den Power Management Integrated Circuit (PMIC). Über den PMIC kann diese Systemplattform effizient auf eine große Bandbreite von Ladezuständen reagieren. Abhängig von der benötigten Stromstärke wird die Energie entweder über einen Low Dropout Regulator (LDO), einen Buck Converter oder Zero Bias bereitgestellt. Zusätzlich zum reduzierten Energieverlust werden so die Ruhestromverluste minimiert.

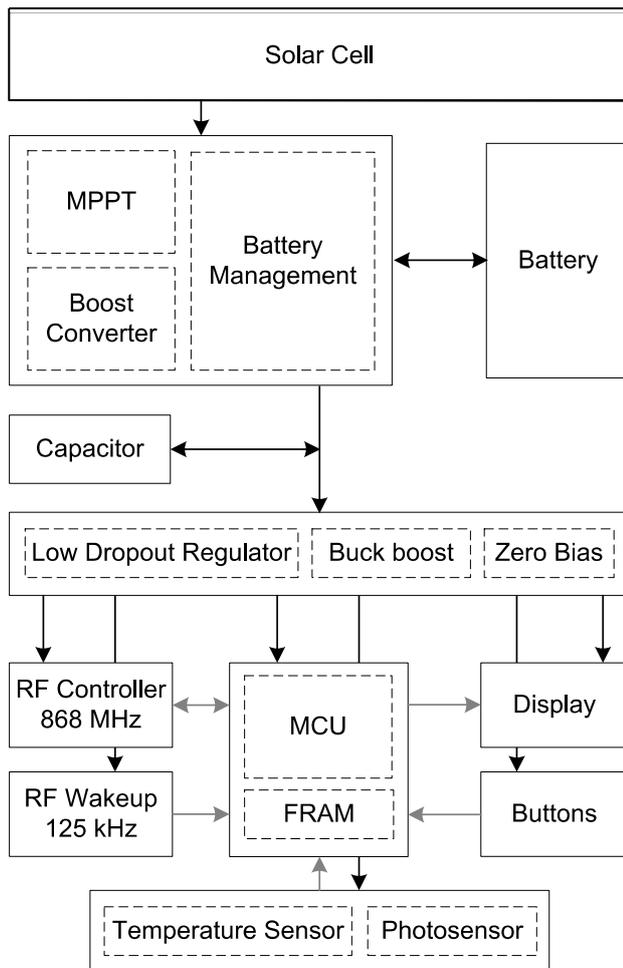


Abbildung 3. Die Funktionsblöcke der inBin-Plattform

Den Kern der inBin-Plattform bildet ein TI MSP430FR5969 FRAM Mixed Signal Microcontroller. Der nonvolatile, ferromagnetische RAM (FRAM) ist wesentlich energiesparender im Vergleich zu klassischen SRAM- und Flash EEPROM-Lösungen. Er hat den Vorteil, dass die Speicherinhalte auch bei einem plötzlichen Systemabsturz erhalten bleiben. Die Funkkommunikation ist über eine Microsemi Ultra-Low-Power RF Sub-GHz Sende-Empfangeinheit umgesetzt worden (ZL70251), die im 868 MHz-Spektrum arbeitet. Als Benutzerinterface wird eine Pervasive Displays 2,7 Zoll E-Ink-Display

verwendet. Zusätzlich gibt es multiaxial gelagerte Bedienknöpfe, die unterhalb des Displays angeordnet sind.

3 LEISTUNGSVERFÜGBARKEIT IM KONTEXT DES INBIN

In einer realistischen Industrieanwendung werden eine große Anzahl an inBin gleichzeitig in Betrieb gehen und in der Art eines *Wireless Sensor Network* (WSN) arbeiten. Im Gegensatz zu existierenden Versuchsfeldern für WSN (vgl. [CPC⁺12], [WSW05]), soll hier der Fokus auf energieneutrale Hardwareplattformen gelegt werden, die in realistischen industriellen Anwendungen mit Echtzeitanforderungen, Benutzerinteraktion und räumlicher Bewegung betrieben werden. Ein Hauptkriterium für die Leistungsverfügbarkeit innerhalb eines solchen Systems ist die maximale Anzahl an betriebsfähigen inBin, die zuverlässig kommunizieren können.

Die inBin sollten in der Lage sein, innerhalb des Systems zu kommunizieren, um die allgemeine Funktionalität des Gesamtsystems zu gewährleisten. Die Kommunikationsinfrastruktur basiert auf einem zentralen Server, der alle inBin verwaltet. Es gibt keine direkte Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten. Jedoch werden alle logistischen Funktionen, abgesehen von der übergeordneten Auftragsverwaltung, von den inBin selbstständig durchgeführt. Dies beinhaltet regelmäßige Statusinformationen an das Zentralsystem, die Möglichkeit, Abfragen über alle Behälter durchzuführen sowie verteilte Entscheidungsstrategien, die Aufträge bestimmten Behältern zuzuordnen. Im Gegensatz zu anderen Anwendungsfällen für Sensornetzwerke ist in den planbaren logistischen Systemen eine solche Systemarchitektur machbar.

Ein wichtiger zu betrachtender Aspekt ist die Energieverwaltung. Bei zu erwartenden Lichtstärken zwischen 400 Lux an Arbeitsplätzen bis hin zu 50 Lux in den dunkelsten Bereichen eines Hochregals kann das Energy-Harvesting-Teilsystem zwischen 0,02 und 0,1 mA Strom liefern. Die Strombedarfe für einzelne Teilkomponenten der inBin-Plattform werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. inBin Strombedarfe

Operation	Strombedarf [mA]
Speicherzugriff	0,135
Rechnen bei 1 MHz	0,18
Rechnen bei 16 MHz	1,6
HF Senden	3
HF Empfangen	16

Eine durchgängiges Empfangen von Daten bzw. Horchen des inBin auf dem Funkkanal ist aufgrund der gemessenen Werte für Stromerzeugung und -bedarf unmöglich. Demnach müssen Kommunikationsstrategien verwendet werden, die trotz zwischenzeitlicher Nichter-

reichbarkeit einzelner inBin die Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems sicherstellen. Im folgenden Abschnitt soll daher ein Versuchsfeld vorgestellt werden, das für die Untersuchung solcher Fragestellungen aufgebaut wird.

4 DAS VERSUCHSFELD

In dem im Aufbau befindlichen Versuchsfeld werden zwei unterschiedliche Typen von inBin betrachtet: Hardwareplattformen mit Display und User-Interface und einfache Geräte ähnlich einem Sensorknoten. Beide Bauformen werden die beschriebene gemeinsame Hardwareplattform als Basis verwenden. Da beabsichtigt wird das Versuchsfeld für die Entwicklung von Hard- und Software zu verwenden, wird dies durch ein Versuchsträgersystem ergänzt, wie es in Abbildung 4 gezeigt wird.

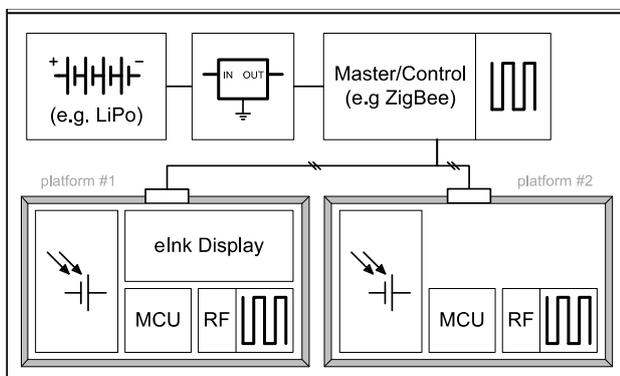


Abbildung 4. Das Layout der Versuchsträgerplattform

Der Versuchsträger beinhaltet einen batteriebetriebenen ZigBee-Controller (IEEE 802.15.4) zum Sicherstellen der Kommunikationsfähigkeit der Versuchsplattform bei Programmier- und Hardwarefehlern. Über Slots sind pro Versuchsträgersystem bis zu zwei Versuchsplattformen angehängt, die bei Ausfällen neu gestartet, mit neuer Firmware ausgestattet und lokalisiert werden können. Die Versuchsträgersysteme übernehmen die Steuerung der Versuche und melden über Statusupdates die Umgebungsbedingungen (wie z.B. Ladezustand, Temperatur oder Lichtstärke).

Der Einsatz von zwei Slots pro Versuchsträger ermöglicht direkte, parallele Vergleiche zwischen verschiedenen Hardwareplattformen. Die Basis der Trägerplattform bildet eine System-on-a-Chip 2,4 GHz Sendempfangseinheit und MCU mit einem 8051 Rechnerkern. Über eine langlebige Li-Ion-Zelle, die separat von den Versuchsplattformen angeschlossen ist, wird die Trägerplattform mit Energie versorgt.

Das inBin-Versuchsfeld wird in die bereits bestehende Versuchshalle für zellulare Fördertechnik (ZFT) integriert. Die ZFT-Halle stellt mit ihrer Fläche von 1.020 m²

eine realistische Umsetzung der Kommissionierzone eines Lagerbereichs dar (siehe Abbildung 5). Über eine agentenbasierte Steuerung übernehmen 50 selbstorganierte Fahrzeuge die Transportaufträge. Die exemplarisch aufgebauten Regale können bis zu 500 Behälter aufnehmen, die zu Kommissionierplätzen transportiert werden können. Diese Standardbehälter werden für das neue inBin-Versuchsfeld verwendet.



Abbildung 5. Das Versuchsfeld in der ZFT-Halle mit einer Kapazität von 500 Behältern

4.1 SIMULATION GROBER SYSTEME

Neben dem Aufbau des Versuchsfelds wurden bereits Simulationsexperimente durchgeführt, deren Ziel es ist das Verhalten einer großen Anzahl von inBin (1.000 bis 20.000) zu untersuchen. Es wurde die Erreichbarkeit einer großen Zahl von energiebeschränkten, intelligenten Behältern untersucht, die ein einfaches Protokoll und eine einfache Netzarchitektur verwenden, um über einen limitierten Funkkanal zu kommunizieren. Als Basis für die Modellierung wurde die inBin-Plattform verwendet und ein Referenzszenario erstellt, das auf einer Kommissionieranwendung basiert (siehe Abbildung 2). Das Netzwerkmodell basiert auf Zeitslots von 20 ms, deren Dauer so gewählt wurde, dass ein vollständiger Request-Acknowledge-Vorgang zwischen dem Server und einem einzelnen inBin stattfinden kann.

Des Weiteren wird von einer einzelnen Sendempfangseinheit auf der Serverseite ausgegangen, die alle inBin erreichen kann und nur einen einzigen Funkkanal für alle Kommunikationsversuche bereitstellt. Die inBins sind in der Simulation zeitlich synchronisiert und versuchen eine Kommunikation nur zu Beginn eines Zeitslots. Jedes Gerät wacht alle 4 bis 6 Minuten auf und versucht, während des 20 ms Zeitslots mit dem Server Daten auszutauschen.

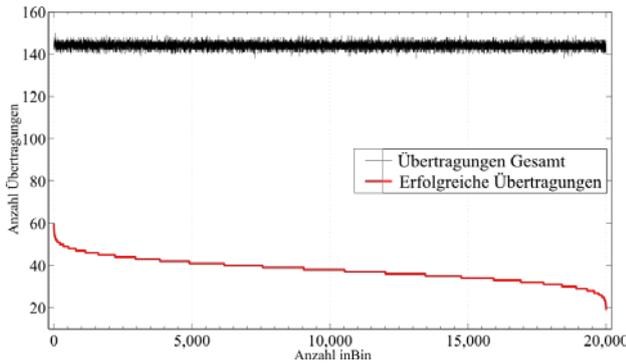


Abbildung 6. Anzahl Übertragungen in einem System mit 20.000 inBin und einer einfachen Kommunikationsstrategie

Das Energiemodell wird über einen Integerwert dargestellt, der den aktuellen Ladezustand des Behälters repräsentiert. Innerhalb jedes Zeitslots wird ein fester Wert hinzugefügt, der den Effekt des Energy-Harvestings darstellt. Jeder Kommunikationsversuch verbraucht eine große Menge Energie aus diesem Speicher. Die Größe des angenommenen Energiespeichers orientiert sich am inBin und ermöglicht 300 Kommunikationsversuche bei voller Ladung.

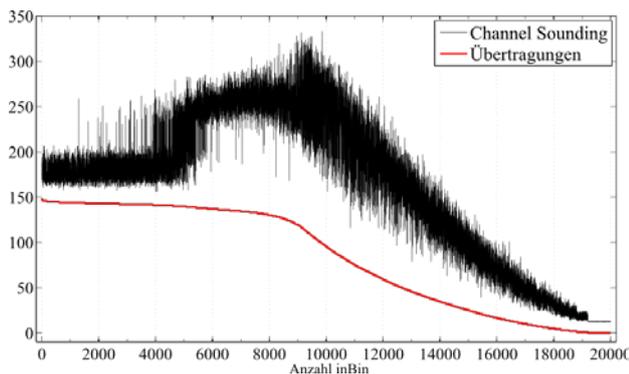


Abbildung 7. Übertragungen und Channel Soundings in einem System mit 20.000 inBin

Es wurden zwei einfache Kommunikationsstrategien implementiert. Entweder versucht ein Behälter nach dem Aufwachen direkt mit dem Server zu kommunizieren und riskiert dabei eine Kollision im Funkkanal oder er verwendet Channel Sounding, um erst kurz zu horchen, ob bereits eine Kommunikation stattfindet. Wenn dies der Fall sein sollte, dann geht der Behälter in einen Zustand über, in dem er wiederholte Sendeveruche durchführt, solange bis er eine Nachricht erfolgreich übertragen kann. Die Dauer zwischen zwei Versuchen wird dabei nach jedem gescheiterten Versuch verdoppelt (Exponential Back-Off). In der Simulation wurde eine typisches Logistiksystem mit einem Arbeitstag von 12 Stunden angenommen. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Anzahl der inBin im System variiert.

Abbildung 6 zeigt die Simulationsergebnisse für die einfache Kommunikationsstrategie, die Kollisionen in

Kauf nimmt. Die obere Linie zeigt alle Übertragungsversuche an, während die untere Linie die Anzahl der erfolgreichen Übertragungen anzeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Vielzahl von Kollisionen entsteht, aber alle inBin erfolgreich kommunizieren können.

In Abbildung 7 hingegen verwenden die inBin Channel Sounding und prüfen zuerst, ob der Funkkanal frei ist. Dies resultiert in einer wesentlich höheren Anzahl an erfolgreichen Übertragungen für etwa die Hälfte der inBin, aber führt auch zu einer Nichterreichbarkeit einiger inBin.

Die Simulationsläufe zeigten die folgenden zwei Beobachtungen: Mit einer sehr einfachen Kommunikationsinfrastruktur erscheint eine inBin-Anwendung in einem realistischen Logistiksystem möglich. Trotzdem ist die Planbarkeit eines Systems extrem abhängig von den spezifischen Anforderungen, den Umgebungsbedingungen. Selbst kleinste Änderungen bei der Hardwareplattform, der Umgebung oder bei den Kommunikationsmustern können zu einer signifikant verringerten Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems führen. Zukünftige Planungsmethoden für Logistiksysteme der Industrie 4.0 müssen dies berücksichtigen.

4.2 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

In diesem Artikel wurden verschiedene Aspekte der Entwicklung und Evaluierung von cyberphysischen Systemen am Beispiel der inBin-Plattform betrachtet. Es wurden realistische Anwendungen vorgestellt, die mit energieneutralen, autonomen intelligenten Geräten funktionieren und am Markt verfügbare elektronische Komponenten verwenden. Die Auswirkungen des Funkverkehrs auf die Leistungsverfügbarkeit eines Lagers mit großer Zahl von inBin wurde simulativ untersucht. Dabei konnte eine Obergrenze an einsetzbaren inBin festgelegt werden. Die Simulation und das vorgestellte Versuchsfeld kann als Teil einer Planung für Logistiksysteme der Industrie 4.0 eingesetzt werden. Dabei können sowohl das spezifische Design der inBin-Plattform, aber auch der allgemeine Einsatz von cyberphysischen Systemen in Materialflusssystemen evaluiert werden. In Zukunft sollten verbesserte Channel-Scheduling-Algorithmen für die Funkkommunikation und ein niedrigerer Energieverbrauch der elektronischen Komponenten analysiert werden. Zusätzlich müssen Simulationswerkzeuge zu entwickelt werden, die sowohl das dynamische als auch das ereignisorientierte Verhalten von Kommunikations- und Materialflusssystemen und die Energieverbräuche berücksichtigen.

5 DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Paketantrags PAK 672 „Leistungsverfügbarkeit - Logistics on Demand“ im Projekt C5, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

LITERATUR

- [ERB⁺12] J. Emmerich, M. Roidl, T. Bich, and M. ten Hompel, "Development of self-sustaining intelligent load carriers using the example of the inBin," *Logistics Journal*, vol. 2012, no. 9, 2012.
- [RRH13] D. Rüdiger, M. Roidl, and M. ten Hompel, "Towards agile and flexible air cargo processes with localization based on rfid and complex event processing," in *Dynamics in Logistics*, ser. Lecture Notes in Logistics, H.-J. Kreowski, B. Scholz-Reiter, and K.-D. Thoben, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 235–246.
- [LGW⁺13] M. Lewandowski, M. Gath, D. Werthmann, and M. Lawo, "Agent-based control for material handling systems in in-house logistics - towards cyber-physical systems in in-house-logistics utilizing real size," in *Proc. of 2013 European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (SmartSysTech)*, VDE, 2013, pp. 1–5.
- [RHB⁺13] S. Russwurm, A. Huber, G. Baum, H. Borchering, M. Broy, and M. Eigner, *Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*. Springer-Verlag New York Incorporated, 2013.
- [Vog13] B. Vogel-Heuser, *Engineering von der Anforderung bis zum Betrieb*. Kassel University Press GmbH, 2013, vol. 3.
- [NER⁺13] T. Niemueller, D. Ewert, S. Reuter, U. Karras, A. Ferrein, S. Jeschke, and G. Lakemeyer, "Towards benchmarking cyber-physical systems in factory automation scenarios," in *KI 2013: Advances in Artificial Intelligence*. Springer, 2013, pp. 296–299.
- [Mai12] M. Maier, *Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie*. VDI-Verlag, 2012.
- [JH13] E.-N. Jung and M. ten Hompel, "Analytische stauprognose in stetigfördersystemen im rahmen der systemplanung," *Logistics Journal*, vol. 2013, no. 10, 2013.
- [CPC⁺12] G. Coulson, B. Porter, I. Chatzigiannakis, C. Koninis, S. Fischer, D. Pfisterer, D. Bimschas, T. Braun, P. Hurni, M. Anwander, G. Wagenknecht, S. P. Fekete, A. Kröller, and T. Baumgartner, "Flexible experimentation in wireless sensor networks," *Communications of the ACM*, vol. 55, pp. 82–90, Jan. 2012.
- [WSW05] G. Werner-Allen, P. Swieskowski, and M. Welsh, "Motelab: A wireless sensor network testbed," in *Proc. of the 4th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'05)*, April 2005.
-
- Dipl.-Inform. Moritz Roidl** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Dortmund. Er studierte Informatik an der Technischen Universität Dortmund. E-Mail: moritz.roidl@tu-dortmund.de
- Dipl.-Inf. Jan Emmerich** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Dortmund. Er studierte Angewandte Informatik an der Technischen Universität Dortmund. E-Mail: jan.emmerich@tu-dortmund.de
- Mojtaba Masoudinejad, M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Dortmund. Er studierte Automation & Robotics an der Technischen Universität Dortmund. E-Mail: moma@flw.mb.tu-dortmund.de
- Andreas Riesner, B.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Dortmund. Er studierte Informatik an der Fachhochschule Dortmund. E-Mail: anri@flw.mb.tu-dortmund.de
- Prof. Dr. Michael ten Hompel** ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen an der Technischen Universität Dortmund und geschäftsführender Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und promovierte an der Universität Witten/Herdecke. E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de
- Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, LogistikCampus, 44227 Dortmund.