

Cyber-physische Logistikmodule als Schlüssel zu einer flexiblen und wandlungsfähigen Produktion in der Prozessindustrie

Cyber-physical logistics modules as a key to a flexible and transformable production in the process industry

*Daniel Große-Puppendahl¹
Stefan Lier²
Moritz Roidl¹
Michael ten Hompel¹*

¹ Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund

² Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik
Institut für Thermo- und Fluidodynamik
Ruhr-Universität Bochum

Den zukünftigen Herausforderungen der Prozessindustrie kann mit den aktuell starren Produktions- und Logistiksystemen nicht mehr begegnet werden, woraus die Forderung nach einer modularen, wandlungsfähigen Produktion und Logistik resultiert. Um die Vorteile solcher Systeme nutzen und sich entfalten lassen zu können, bedarf es einer schnellen und aufwandsarmen (Re-)Konfiguration. Dafür sind standardisierte Schnittstellen und intelligente Module erforderlich, welche Plug & Produce in das Produktions- und Logistiksystem eingefügt werden können. Durch vorangegangene Forschungsprojekte (z.B. F³-Factory) konnte nachgewiesen werden, dass eine Produktion von Erzeugnissen der Prozessindustrie in modularen Gewerken in Form von Standardcontainern machbar ist.

Der Beitrag beschreibt nun die aktuellen Ergebnisse und Herausforderungen im Bestreben die Logistikforschung und die Verfahrenstechnik zur Entwicklung von intelligenten Standardcontainern für die modulare Produktion in der Prozessindustrie voranzutreiben. Anhand intelligenter Logistik- und Produktionsmodule wird gezeigt, wie eine Übertragung der Erkenntnisse aus der Entwicklung von cyber-physischen Logistiksystemen auf die Prozessindustrie möglich ist.

[Schlüsselwörter: Cyber-physische Systeme, Logistikmodule, wandlungsfähige Produktion, Plug & Produce, iCon®]

The future challenges of the process industry cannot be faced by the current rigid production and logistics systems, which results in the need for a modular, transformable production and logistics. In order to take advantage of such systems, a quick and low-effort (re)

configuration is required. Therefore, standardized interfaces and intelligent modules are necessary to be inserted in the production and logistics system according to the plug & produce principle. Due to previous research projects (e.g. F³ Factory) it could be demonstrated that a production in the process industry is feasible in modular standard containers.

The following article describes the current results and challenges in an effort to advance the logistics research and process engineering for developing intelligent standard containers for modular production in process industries. Using intelligent logistics and production modules it is shown how a transfer of knowledge gained from the development of cyber-physical logistics systems to Process Industry is possible.

[Keywords: cyber-physical systems, logistics modules, versatile production, Plug & Produce, iCon®]

1 EINLEITUNG

In der Prozessindustrie (Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie) werden große Produktionsanlagen bislang zentral angeordnet, um durch die Bündelung Skaleneffekte zu realisieren. Allerdings wird die strategische Planung dieser Standorte durch dynamisches Marktverhalten zunehmend erschwert. Aufgrund einer steigenden Produktdifferenzierung, von verkürzten Lebenszyklen der Produkte und der wachsenden Volatilität der Märkte wird eine Flexibilisierung der Produktion in der Prozessindustrie gefordert ([Buc10]; [Sha05]).

Im aktuellen Fokus der Forschungs- und Industrieinteressen stehen deshalb Konzepte zur Modularisierung

rums, sind aber nicht effizient ([Buc10]; [LG11]; [SSB+12]). Sie sind örtlich kaum verlagerbar und die Produktionskapazitäten werden von der Größe und Anzahl der Rührkessel zumeist vorgegeben. Um eine hohe Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, müssen diese zu Lasten von Lagerhaltung und Kapitalbindung oder Lieferzeiten hoch ausgelastet werden [Lie13].

Daher stehen modularisierte Produktionssysteme ([EKW02]; [Buc10]; [LG11]; [SSB+12]), welche zu wandlungsfähigen Produktionssystemen erweitert werden aktuell im Fokus [Lie13]. Mit Hilfe der Modularisierung wird die Flexibilität einer diskontinuierlichen Mehrproduktanlage mit der Effizienz einer kontinuierlichen Einproduktanlage kombiniert [SSB+12]. Eine Wandlungsfähigkeit und Flexibilität wird auf allen Ebenen vom Apparat, über den einzelnen Bearbeitungsschritt in der Produktion (Unit Operation) und bis hin zum Netzwerk aus Produktionscontainern angestrebt (vgl. Abbildung 3, [LG11]). Wandlungsfähigkeit entspricht dabei der Eigenschaft reaktiv oder proaktiv Veränderungen der Wandlungsobjekte und damit der gesamten Struktur in Produktion und Logistik bei geringem Aufwand durchzuführen [WH00]. Ein wandlungsfähiges Produktions- und Logistiksystem beinhaltet mehr als nur die gewisse Flexibilität in einer vorab definierten Bandbreite Anpassung vornehmen zu können. Wandlungsfähige Produktionskonzepte sind in der Lage auch über die bestehenden Grenzen hinaus Veränderungen in Technologie und Organisation umzusetzen [NRA08]. Eine flexible Produktion- und Logistikstruktur könnte hingegen lediglich die Veränderungsmöglichkeiten innerhalb bestehender Grenzen leisten. An dieser Stelle wird deutlich, dass der Begriff der Wandlungsfähigkeit den Flexibilitätsbegriff einschließt [LWG15].

Vollständige Wandlungsfähigkeit wird durch den Einbezug der Wandlungsbefähiger Universalität, Kompatibilität, Skalierbarkeit und Mobilität, ergänzt durch Redundanz sowie Sicherheit, geschaffen ([Lie13]; [KML+15]; vgl. Abbildung 2). Universalität wird durch schnelles, einfaches und aufwandsarmes Austauschen der Apparatemodule erreicht. Grundvoraussetzung dafür ist die Kompatibilität der Module untereinander und die Kompatibilität ihrer Schnittstellen mit der zugehörigen Peripherie [Lie13]. Durch die Multiplikation einzelner Prozessstränge (Numbering-Up) kann die Anzahl von Einzelsträngen der tatsächlichen Nachfrage angepasst werden. Dies verschafft Skalierbarkeit in der Kapazität ([Lie13], vgl. Abbildung 1). So kann der Lebenszyklus von Produkten verfolgt werden [BBE+03]. Darüber befindet sich die Logistikskala, in welcher die Produktionsanlagen Module innerhalb eines Standortes darstellen und die Standorte Module innerhalb des Produktionsnetzwerkes abbilden [Lie13]. Voraussetzung für die Wandlungsfähigkeit in dieser Dimension ist die räumliche Mobilität der Module [Lie13]. Das Produktionsnetzwerk, die Stand-

orte und die angesprochene Mobilität stehen im Fokus der gegenwärtigen Forschung.

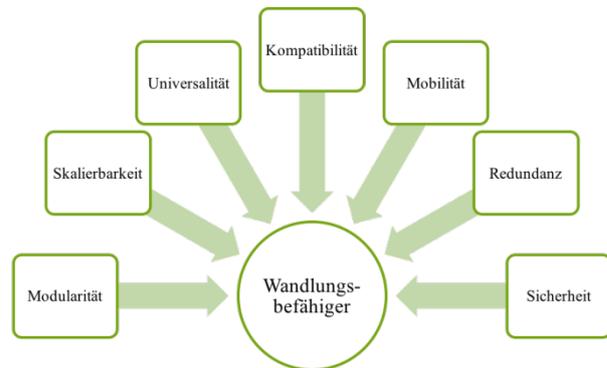


Abbildung 2: Wandlungsbefähiger für modulare Produktionssysteme

Vorangegangene Forschungsprojekte, wie das F³ Factory EU-Projekt oder ModuLOG, konnten bereits Ergebnisse zur Anpassungsfähigkeit der Produktion und Logistik in der Prozessindustrie liefern und stellen somit die Grundlage für die angestrebte Fokussierung der Logistikskala dar. Ein wandlungsfähiges und flexibles Produktionsnetzwerk in der Prozessindustrie kann nur geschaffen werden, wenn simultan die Apparate und die Produktionsanlagen diese Eigenschaften auch aufweisen (vgl. Abbildung 3).

Fabrikebenen in der Fertigungstechnik	→	Äquivalente in der Chemieindustrie	
Produktionsnetzwerk	→	Produktionsnetzwerk	Skala Logistik
Standort	→	Standort	
Generalstruktur	→	Produktionsanlage	Skala Anlagen
Bereich	→	Prozessstrang	
Gruppe	→	Apparat (Reaktor, etc.)	Skala Apparate
Einzelplatz	→	Einzelphänomen (Rohr, Kapillare, Kanal, ...)	

Abbildung 3: Planungsebenen der chemischen Produktion [Lie13]

Im Rahmen der erwähnten Forschungsprojekte konnte die Umsetzbarkeit der chemischen Produktion in Standardcontainern nachgewiesen werden. Um die geforderte modulare Produktion gewährleisten zu können, besteht die Notwendigkeit, dass die Förder- und Lagertechnik (Intralogistikmodule) ebenfalls dem modularen Grundgedanken folgen. Im ModuLOG-Projekt konnten daher verschiedene Herausforderungen an diese Gewerke identifiziert werden. Intralogistikmodule müssen sowohl dem gleichen Flexibilitäts- als auch Modularitätsgrad der Produktion folgen, damit das Gesamtkonzept einer modularen Produktion funktionsfähig ist und die intralogisti-

sche Gewerke keine Flexibilitätsbremse darstellen. [KML+15]. Zudem müssen Intralogistikmodule eine Eignung für die Chemieindustrie aufweisen.

2.1 FÖRDERTECHNIK IN DER PROZESSINDUSTRIE

Im Bereich der Fördertechnik sind in den vergangenen Jahren marktreife Produkte entstanden, die den automatisierten Transport innerhalb von intralogistischen Systemen ermöglichen und dabei dem Trend, die Flexibilität und Modularität von intralogistischen Materialflusssystemen zu erhöhen, folgen.

Aus der un stetigen und stetigen Fördertechnik ergeben sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Modularisierung von Fördertechnik. Einerseits werden intelligente fahrerlose Transportfahrzeuge genutzt, um autonom und ohne zentrale Steuerungsinstanzen einen Materialfluss garantieren zu können. Das Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML entwickelte beispielsweise in Kooperation mit der Firma Dematic das sogenannte Multishuttle Move, das neben der Bedienung eines Shuttle-Lagers auch die Transportaufgaben der Lagereinheiten innerhalb des Materialflusses übernehmen kann. Die Koordinierung der autonomen Fahrzeuge erfolgt mittels Schwarmintelligenz. Durch eine dezentrale Steuerung sind zellularen Transportsysteme skalierbar und wandlungsfähig, da die Gesamtleistung des Systems bis zu einer bestimmten Grenze nach Bedarf angepasst werden kann, indem die Anzahl der Fahrzeuge im System geändert wird. Jedes Fahrzeug bewegt sich autonom und reagiert dynamisch auf seine Umgebung [KSK12].

Andererseits existiert modulare Stetigfördertechnik. Der Flexförderer ist ein von dem Institut für Fördertechnik und Logistik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickeltes flexibles Fördersystem auf Basis baugleicher, dezentral gesteuerter Einzelmodule [BVL15]. Die Firma GEBHARDT Fördertechnik GmbH vertreibt den Flexförderer unter dem Namen „FlexConveyor“ mit vordefinierten, standardisierten Fördermodulen unterschiedlicher Funktion und Abmessungen nach dem Baukastenprinzip [Geb15]. Das Layout kann durch die Modulbauweise in kurzer Zeit an neue Anforderungen des Materialflusses angepasst werden. Die einzelnen Module werden manuell nach dem Plug & Play-Prinzip sowohl mechanisch als auch elektrisch aneinandergeschlossen und bilden danach selbständig ein funktionierendes Fördersystem. Der Flexförderer ist mit Rollen und Zahnriemen ausgestattet und kann dadurch Fördereinheiten in vier Richtungen transportieren. Dadurch beinhaltet jedes einzelne Modul die Eigenschaften, um als Verzweigung, Zusammenführung oder einfache Förderstrecke zu agieren. Da jedes Modul für sich bereits ein autonomes Fördersystem darstellt, erfordert eine Änderung des Layouts, eine Erweiterung oder ein Austausch defekter Module, keinen hohen Planungsaufwand [BVL15]. Weitere wandlungsfähige Fördertechnik befindet sich noch in einem frühen

Stadium der Forschung und wird vermutlich in den nächsten Jahren die Marktreife erlangen [Pro15].

Grundsätzlich sind beide beschriebenen Ansätze der modularen Fördertechnik in der Lage, den Materialtransport modularer und hochflexibler Intralogistiksysteme zu gewährleisten. Nachteilig wirkt sich, insbesondere im Fall der fahrerlosen Transportfahrzeuge, der Umstand aus, dass die Leistung des Systems nicht unbegrenzt gesteigert werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ab einem gewissen Punkt das Einbringen weiterer Fahrzeuge in das Transportsystem zu gegenseitigen Behinderungen führt. In diesem Fall nimmt die Gesamtleistung ab, anstatt durch die Erhöhung der Transportfahrzeuge zuzunehmen. Somit ist die Systemflexibilität begrenzt ([Schw14]; [Lan12]). Darüber hinaus zeigen sowohl die Stetig-, als auch die Unstetigförderer signifikante Unverträglichkeiten hinsichtlich des Einsatzes in der chemischen Industrie. Die am Markt verfügbaren Systeme sind für den Transport genormter Stückgüter ausgelegt und können somit insbesondere Behälter in den Abmessungen 600mm x 400mm oder Europaletten handhaben. Die üblichen Ladehilfsmittel der Chemiebranche (Chemiepalette, Fässer, Big-Bags etc.) können nicht transportiert werden. Weiterhin sind die bestehenden Systeme nicht auf die Rahmenbedingungen und Umweltvorgaben der chemischen Produktion ausgelegt. So existieren bislang keine Technologien, die für den Einsatz beispielsweise in Reinräumen ausgelegt sind. Zusätzlich ist die Technologie für keine Schutzklassen im Umgang mit Gefahr- oder Explosivstoffen ausgelegt, welche in der chemischen Produktion zum Teil vorausgesetzt werden.

2.2 LAGERTECHNIK IN DER PROZESSINDUSTRIE

Im Bereich der am Markt verfügbaren Lagertechnik existieren Systeme, die auf Grund ihres Aufbaus oder ihrer Funktionsweise grundsätzlich für eine modulare chemische Produktion geeignet sind. Im Hinblick auf standardisierte modulare Produktionssysteme, fehlen jedoch Lagersysteme, die der notwendigen Kompatibilität, Mobilität, Modularität und Skalierbarkeit eines solchen Systems gerecht werden [KML+15]. Aus diesem Grund wurde in dem Forschungsprojekt ModuLOG ein Lagercontainer entwickelt, der den Anforderungen einer modularen chemischen Produktion gerecht wird (vgl. Abbildung 4).

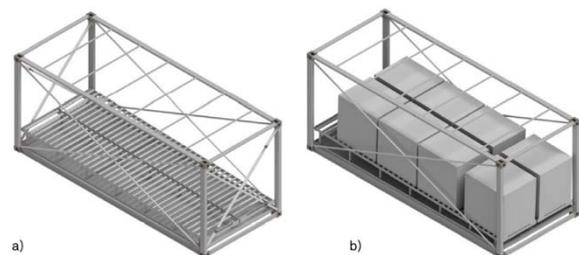


Abbildung 4: Containerdurchlaufregal (ModuLOG-Demonstrator)

Zusätzlich zu dem, im Detail entwickelten, Containerdurchlaufregal, konnte weitere notwendige Intralogistikmodule konzeptionell erarbeitet werden, u.a. Bereitstellungsmodul, Reinigungsmodul, Abfüllungsmodul, Puffermodul und Verpackungsmodul. Die Module wurden in Form von dreidimensionalen virtuellen Modellen erstellt und mit Hilfe von Materialfluss- und Finite-Elemente-Simulationen auf ihre Eignung sowie die Einhaltung der ISO-Norm für Container überprüft [MK15].

Die Ergebnisse aus dem ModuLOG-Forschungsprojekts und der F³ Factory zeigen Möglichkeiten auf, wie die Apparate- und Anlagenskala modular gestaltet werden kann. Sie stellen jedoch auch die Herausforderungen dar, die bis zu einem wandlungsfähigen Produktionsnetzwerk in der Prozessindustrie seitens der Forschung noch zu meistern sind. Bisher existieren keine Schnittstellen, weder zwischen den einzelnen Modulen, noch zwischen Mensch und Maschine. Der angestrebte Plug & Play- bzw. Plug & Produce-Ansatz scheitert zurzeit an der fehlenden Intelligenz der Produktions- und Logistikmodule. Der Einsatz cyber-physischer Systeme (CPS) soll dieser Herausforderung begegnen.

3 CYBER-PHYSISCHE LOGISTIKSYSTEME

Ein cyber-physisches System ist per Definition ein System, „bei dem informations- und softwaretechnische mit mechanischen bzw. elektronischen Komponenten verbunden sind, wobei Datentransfer und -austausch sowie Kontrolle bzw. Steuerung über eine Infrastruktur wie das Internet in Echtzeit erfolgen. Wesentliche Bestandteile sind mobile und bewegliche Einrichtungen, Geräte und Maschinen (darunter auch Roboter), eingebettete Systeme und vernetzte Gegenstände (Internet der Dinge). In der Industrie 4.0 haben cyber-physische Systeme eine zentrale Funktion“ [Gab15]. Unter dem Schlagwort Industrie 4.0 untersuchen aktuelle Forschungen im Bereich der Logistik die massive Verwendung von verteilten, eingebetteten Systemen als neue Grundlage moderner Produktions-, Transport- und Distributionsstrategien ([RRH13], [LGW+13], [RHB+13], [Vog13]). Diese cyber-physischen Systeme vernetzen Bearbeitungsprozesse mit den notwendigen Transportprozessen. Handelt es sich bei dem Einsatzort der CPS um die Logistik, entsteht ein cyber-physisches Logistiksystem. Als solches wird vor allem ein System verstanden, welches eine Ansammlung von Logistikelementen aufweist (Fördersysteme, Lager-systeme, Ladehilfsmittel, etc.), die jeweils die Kriterien CPS erfüllen, miteinander, mit Produktionselementen sowie dem Menschen kommunizieren und unter Berücksichtigung vorhandener Rahmenbedingungen autonom agieren und reagieren [VLH+13].

Bei der Entwicklung und Anwendung von cyber-physischen Systemen nimmt die Logistik eine Vorreiterrolle ein. Herausforderungen, wie z.B. die anhaltende Globalisierung, der steigende Vernetzungsgrad oder der

Wunsch nach Individualität („Losgröße Eins“) führen zu einer exponentiell steigenden Komplexität in der Branche und erfordern intelligente Lösungen. Cyber-physische Logistiksysteme sind seit einiger Zeit Teil dieser Lösung [Fie13].

Das Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik IML konnte in den vergangenen Jahren viele Erfahrungen und Erkenntnisse im Bereich der cyber-physischen Systeme sammeln. Bereits im März 2012 wurde mit dem inBin der erste intelligente Behälter auf der LogiMAT vorgestellt. Der Kleinladungsträger ist in der Lage mit Mensch und Maschine zu kommunizieren, eigenständig Entscheidungen zu treffen, Umgebungsbedingungen zu überwachen und logistische Prozesse zu steuern. Damit erfüllte der inBin, entwickelt vom Fraunhofer IML in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, bereits 2012 diverse Anforderungen an ein cyber-physisches Logistiksystem [RH16]. In den letzten vier Jahren folgten auf den inBin weitere intelligente Systeme, u.a. die zellularen autonomen fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) oder das neuartige Pick-by-Inc Kommissioniersystem mit diversen smarten Schnittstellen. Die neueste Anwendung stellt der intelligente Container iCon[®] dar. Er wurde auf der CeBIT 2016 als intelligente Containerlösung im Luftfrachtbereich vom Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen zusammen mit dem Fraunhofer IML präsentiert. In den verschiedensten Bereichen des Materialflusses konnten bisher Erkenntnisse über den Einsatz von intelligenten Systemen gesammelt werden. Die Gemeinsamkeit, die alle Projekte jedoch haben ist, dass es sich ausschließlich um die logistische Handhabung von Stückgütern handelt. Bislang finden sich jedoch keine Anwendungen in der Prozessindustrie mit ihren spezifischen Anforderungen. Das Bestreben eine wandlungsfähige Produktion, trotz der vorhandenen komplexen Rahmenbedingungen, zu erhalten, bedingt die Übertragung der Erkenntnisse aus den bisherigen Forschungen im Bereich der CPS auf diesen Industriezweig.

Die Herausforderung des gegenwärtigen Forschungsvorhabens der beteiligten Lehrstühle ist die Adaption der Erkenntnisse über cyber-physische Logistiksysteme auf die Produktionsgestaltung der Prozessindustrie. Dabei soll der Fokus auf dem Einsatz der iCon[®]-Technologie im Bereich der modularen Produktion und Logistik liegen.

4 POTENTIALE INTELLIGENTER LOGISTIKMODULE IN DER PROZESSINDUSTRIE

Dieser Artikel hat bereits gezeigt, dass auf der einen Seite Produktions- und Lagermodule in Standardcontainern für den Einsatz in einem wandlungsfähigen Produktionssystem existieren (vgl. Kapitel 2). Auf der anderen Seite ist die Forschung im Bereich der cyber-physischen Logistiksysteme bereits so weit fortgeschritten, dass erste vielversprechende Praxisergebnisse für die Anwendung in der Stückgutproduktion vorliegen (vgl. Kapitel 3). Im

Folgendes soll, anhand eines ausgewählten Beispiels, eine Möglichkeit aufgezeigt werden, Logistikmodule mit Intelligenz auszustatten, sodass unter Berücksichtigung sämtlicher Randbedingungen der Prozessindustrie eine flexible Produktion, nach dem Plug & Produce Prinzip, entstehen kann. Hierzu werden zunächst die Produktmerkmale und technischen Daten von iCon[®] aufgezeigt (vgl. Kapitel 4.1) sowie die Anwendbarkeit in der Prozessindustrie erörtert (vgl. Kapitel 4.2). Darauf aufbauend wird das Konzept eines möglichen cyber-physischen Logistikmoduls dargestellt (vgl. Kapitel 4.3) und abschließend mit Hilfe der VDI-Richtlinie 2225 bewertet (vgl. Kapitel 4.4).

4.1 BEST PRACTICE BEISPIEL AUS DER LUFTFRACHT – iCon[®]

Mit dem iCon[®] hat das Fraunhofer IML den ersten intelligenten Luftfrachtcontainer entwickelt (vgl. Abbildung 5). Dieser ist in der Lage, selbstständig den Weg zu seinem Bestimmungsort zu suchen, indem er mittels Datenübertragungsschnittstellen, wie z.B. GPS sowie 4G LTE-Netz, mit anderen CPS und mit allen erforderlichen weiteren Akteuren kommunizieren kann. Verpasst iCon[®] einen Anschlussflug, ist er dank der Kommunikationsbausteine und dem weltweiten Multiortungssystem fähig sich selbst einen Platz auf einer späteren Frachtmaschine zu buchen.



Abbildung 5: iCon[®] (Fraunhofer IML)

Die Hardware von iCon[®] besteht neben den Kommunikationsbausteinen und den Ortungssystemen aus:

- einem 32-Bit-ARM-Prozessor
- einem hochauflösenden ePaper-Display
- hocheffizienten Solarzellen

- einem Akkumulator mit 6-8 Monaten Energie-reserve
- einem 16 MB großen internen Speicher plus einer Cloud-Verbindung und
- verschiedenster Sensorik (z.B. Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit, Vibration).

Mit Hilfe des integrierten 2,4 GHz Nachbereichsfunk können die Container untereinander und mit anderen CPS kommunizieren, ohne die Mobilfunktechnologien nutzen zu müssen. So wird Energie eingespart. Zusätzlich erlauben diverse Sensoren eine Echtzeitüberwachung aller bedeutenden Umweltparameter. Das hochauflösende ePaper-Display bildet die Mensch-Maschine-Schnittstelle und ist für eine bidirektionale Kommunikation ausgelegt. Einerseits können relevante Informationen über das Display abgerufen werden. Andererseits können Einstellungen an dem intelligenten Container mittels eines Smart Devices mit der passenden App durch den Menschen geändert werden.

Die beschriebene Hardware wurde bislang lediglich im Rahmen des Luftfrachtcontainer-Projektes eingesetzt. Die Produktmerkmale und die technischen Eigenschaften lassen jedoch den Schluss zu, dass die Einsatzmöglichkeiten nicht darauf beschränkt sind. Aufgrund dessen fließen die Idee sowie die Hardware-Komponenten von iCon[®] in das Konzept der cyber-physischen Logistikmodule ein, um den, im Folgenden beschriebenen, Anforderungen der modularen Produktion und Logistik in der Prozessindustrie begegnen zu können.

4.2 ANFORDERUNGEN DER MODULAREN PRODUKTION UND LOGISTIK IN DER PROZESSINDUSTRIE

Bislang wurde der Mehrwert von iCon[®] nur für den Transport von Stückgut nachgewiesen, woraus auf einen problemlosen Einsatz in der diskreten Fertigungsindustrie geschlossen werden kann. Dort angewandte Lösungen sind jedoch nur nach wesentlichen Modifikationen in der Prozessindustrie einsetzbar [SML92]. Einige Systeme oder Methoden können aufgrund der wesentlichen Unterschiede zu anderen Industriezweigen oftmals gar nicht adaptiert werden.

Die wichtigsten Besonderheiten der chemischen und pharmazeutischen Industrie liegen in der Beschaffenheit der Rohstoffe und Produkte. Die Verwendung von Stückgut findet in der chemischen Produktion nur sehr begrenzt statt. Schüttgüter, Flüssigkeiten und Gase bilden die Grundlage für das spätere Produkt [SML92]. Die Stoffe werden je nach Aggregatzustand in Kleingebinden (Behälter, Kanister, etc.), in Großgebinden (Fässer, IBC, Druckbehältnisse, etc.) oder in Kartons, Big Bags, Säcken sowie Trommeln an der Produktionsstraße bereitgestellt (vgl. [MK15]). Alternativ wird die Produktion direkt über Rohrleitungen mit den notwendigen Stoffen versorgt.

Für die intelligente modulare Produktion und Logistik ergeben sich daraus besondere Anforderungen. Der intelligente Produktionscontainer muss zu jeder Zeit wissen, welche Rohstoffe benötigt werden und in welchem Behälter sie bereitgestellt werden. Alle Schnittstellen zu dem Produktionsmodul müssen durch das Modul selbst berücksichtigt werden. Ähnliches gilt für die Logistikmodule. Intelligente Logistikmodule müssen neben den Stoffen, die sie fördern oder lagern, und ihren jeweiligen Mengen vor allem wissen, ob Restriktionen durch Gefahrgut vorliegen. Generell gilt, dass es sich bei den meisten Rohstoffen in der Prozessindustrie um Chemikalien handelt, die bei Lagerung, Handhabung und Transport einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen unterliegen.

Die Restriktionen, Randbedingungen und Verordnungen, die im Umfeld der chemischen sowie pharmazeutischen Produktion vorliegen, können durch iCon[®] Berücksichtigung auf der Apparateebene, aber auch in der Dimension der Anlagenskala, finden. Das Konzept der Integration von iCon[®], in die bereits erforschten standardisierten Produktions- und Logistikcontainer wird im Folgenden anhand des Containerdurchlaufregallagers aus dem ModuLOG Projekt vorgestellt. Die Ausstattung aller weiteren Logistik- und Produktionsmodule verläuft äquivalent.

4.3 KONZEPT EINES CYBER-PHYSISCHEN LOGISTIKMODULS

Das Ziel der konzeptionellen Darstellung eines beispielhaften intelligenten Logistikmoduls ist nicht die Entwicklung eines konstruktionsfähigen cyber-physischen Logistiksystems. An dieser Stelle soll stattdessen konzeptionell anhand des Fallbeispiels eines Containerdurchlaufregallagers veranschaulicht werden, wie sich eine Integration von iCon[®] in die Logistik- und Produktionsmodule auf die Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in der modularen Prozessindustrie auswirken kann.

Die Anforderungen an das Konzept eines intelligenten Logistikmoduls ergeben sich aus den Zielen des beschriebenen Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 2). Mit Hilfe der cyber-physischen Systeme sollen die Schnittstellen zwischen den einzelnen modularen Bausteinen der Produktion geschaffen werden, die bislang fehlen. Zudem soll insbesondere die Wandlungsgeschwindigkeit durch Plug & Produce erreicht werden, die für eine schnelle und aufwandsarme Rekonfiguration der Systeme notwendig ist. Die Kommunikation zwischen den Containern (Maschine-zu-Maschine-Schnittstelle) steht dabei genauso im Fokus wie eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle. Darüber hinaus soll das Containermodul selbst über vollständige Kenntnisse des Inhalts verfügen. Für Logistikmodule sind hier vor allem die Art der Behälter, die gelagerten Rohstoffe, ihr Aggregatzustand, Gefahrenklassen, Druckzustände und Temperaturen von besonderer Bedeutung. Hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit der Produktion

muss ein weiteres Augenmerk auf der Einbindung der geschaffenen cyber-physischen Systeme in die bestehende ERP-Struktur eines Unternehmens liegen. Das übergeordnete Ziel des Plug & Produce-Prinzips in der modularen Prozessindustrie kann nur erreicht werden, wenn die erwähnten Schnittstellenprobleme nicht nur physisch, sondern auch informationstechnisch gelöst werden.

Der Einsatz von iCon[®] in der Prozessindustrie kann diesen Herausforderungen begegnen. Der Know-how Transfer von einem Stückgut transportierenden Air Cargo Container zu einem Containerdurchlaufregallager in der chemischen Industrie erscheint auf den ersten Blick sehr komplex. Für iCon[®] ist jedoch vorerst irrelevant, ob es sich bei dem System um einen Luftfrachtcontainer oder um einen Überseestandardcontainer handelt. Die technischen Eigenschaften von iCon[®] werden in der folgenden Tabelle (vgl. Tabelle 1) auf den Nutzen für die modulare Produktion in der Prozessindustrie untersucht und beurteilt.

Tabelle 1: Produktmerkmale von iCon[®] und Adaptierbarkeit für die modulare Produktion in der Prozessindustrie

Produktmerkmale iCon [®]	Nutzen Prozessindustrie	Anmerkungen
Positionsbestimmung über GPS und GSM	JA	Tracking der Container außerhalb der Fabrik
Geofencing mit automatischer Alarmmeldung	JA	„Safety and Security“ Aspekte
Weltweiter Datenaustausch über 4G LTE-Netz, UMTS oder GSM	JA	Weltweite Echtzeit-Statusüberprüfung
Integrierter Nahbereichsfunk für die Kommunikation	JA	Maschine-Maschine-Kommunikation
Überwachung und Meldung von Umweltparametern	JA	Sensorik zur Statusüberwachung
Anzeige von beliebigen Daten auf Display	JA	Mensch-Maschine-Schnittstelle
Interner Speicher für bis zu 100 Seiten	JA	Datenspeicherung und Dokumente
Cloud-Verbindung	JA	Langzeit-Datenanalysen jedes einzelnen Moduls möglich
Stromversorgung via Energy-Harvesting und eine Batterie mit 6-8 Monaten Energie-reserve	JA	Keine externe Stromversorgung erforderlich

Die Ausstattung eines Standardcontainers mit Intelligenz erfordert hardware-seitig die Installation der technischen Elemente von iCon® (vgl. Abbildung 5), zugänglich an einer der Außenwände des Containers, sowie die Ausstattung des Innenraums mit allen notwendigen Sensoren. Im Fall des Containerdurchlaufregallagers sind Temperatursensoren (innen und außen), Feuchtigkeits-, Luftdruck-, Vibrationssensoren und Photodioden sowie Rauch- und Gasmelder geplant. Zusammen mit den Waagen, die an beiden Rollenbahnen vorgesehen sind (vgl. Abbildung 4), können vollständige Statusmeldungen abgerufen werden, ohne einen Blick in das Innere des Containers werfen zu müssen. Die Möglichkeit der Überwachung von Umweltparametern ist aufgrund der beschriebenen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 4.2) besonders wichtig für die Prozessindustrie. Die ermittelten Sensordaten werden direkt an iCon® geschickt, wo sie visualisiert, gespeichert und weitergeleitet werden. Die Visualisierung erfolgt über das hochauflösende ePaper-Display, welches als Bestandteil von iCon® die Schnittstelle zum Menschen bildet. Der Mensch ist zu jeder Zeit in der Lage sich einen Überblick über den Status des Logistikmoduls zu verschaffen, indem er die Echtzeitdaten auf dem Display abrufen. Alternativ kann ein Zugriff auf die Daten jedes einzelnen Moduls über das Unternehmensnetzwerk ablaufen. Über das 4G-LTE-Netz ist ein weltweiter Datenaustausch möglich, d.h. von einem zentralen Leitstand können die Verantwortlichen den Status aller Logistik- und Produktionsmodule auslesen, die Prozesse fernsteuern und Fernwartung betreiben. Durch die ebenfalls integrierte stetige Cloud-Verbindung können sämtliche Daten gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt abgerufen werden. Detaillierte Analysen einzelner Module können orts- und zeitunabhängig durchgeführt werden. Die Kommunikation der Module untereinander, die eine zentrale Rolle für den Plug & Produce-Ansatz spielt, funktioniert mittels Nahbereichsfunk (868 MHz oder 2,4 GHz). In einer dezentralen Organisation funkt jedes Modul seine Position im Produktionsprozess an die anderen cyber-physischen Systeme und bekommt im Gegenzug erforderliche Informationen zurück. Am Beispiel des Containerdurchlaufregallagers ist, z.B. eine wichtige Information für das vorgelagerte Modul die Auslastung des Lagers. Besitzt ein Lagermodul keine Kapazität mehr, gibt es diese Information autonom an die vorgelagerten Prozesse weiter. Diese verringern dementsprechend ihre Produktionsgeschwindigkeit oder adressieren ein anderes Lagermodul, falls vorhanden (Numbering-up). Die Möglichkeit der Positionsbestimmung per GPS oder GSM wird in einer Produktionsumgebung nicht von Bedeutung sein. Diese technische Eigenschaft von iCon® ist jedoch hilfreich, wenn eine modulare Produktionslinie an einem neuen Standort aufgebaut werden soll oder wenn ein Modul zwischen Standorten verschoben wird und sich im Transport befindet. Die Position jedes einzelnen Containers auf der Welt kann so getrackt werden. In Kombination mit der Möglichkeit des Geofencings kann die Positionsbestimmung auch zu Sicherheitszwecken genutzt werden. So wird beispiels-

weise eine Alarmmeldung an den zentralen Leitstand geschickt, sobald ein Modul seinen Bestimmungsort ungeplant verlässt. Dem Sicherheitsaspekt der Fernüberwachung kommt vor allem bei der angestrebten dezentralen Produktion eine besondere Bedeutung zu. Auffällig ist, dass alle technischen Aspekte der ursprünglichen iCon®-Idee auch ihren Nutzen für die Prozessindustrie haben.

Die Integration von iCon® in die modulare Produktion der Prozessindustrie kann aus konzeptioneller Sicht gelingen und einen wichtigen Schritt in Richtung Wandlungsfähigkeit bedeuten. Eine praktische Umsetzung des Konzeptes und die damit verbundene Validierung stehen allerdings in der Forschung noch aus. Eine erste Bewertung des Grobkonzeptes eines cyber-physischen Logistiksystems kann jedoch auf Basis der bisherigen Erkenntnisse durchgeführt werden.

4.4 KONZEPTEBEWERTUNG: CYBER-PHYSISCHE SYSTEME ALS WANDLUNGSBEFÄHIGER

Die Vorteile eines cyber-physischen Logistik- oder Produktionsmoduls für die Wandlungsfähigkeit einer Produktion in der Prozessindustrie können anhand des entwickelten Konzeptes abgeschätzt werden. Hierzu wird eine im Rahmen des ModuLOG Forschungsprojektes durchgeführte Nutzwertanalyse um das Konzept des cyber-physischen Logistikmoduls erweitert. Ein Containerdurchlaufregallager wird nachfolgend mit einem intelligenten Containerdurchlaufregallager verglichen. Die Vergleichskriterien sind aus den Wandlungsbefähigern für modulare Produktionssysteme abgeleitet (vgl. Abbildung 2, [MK15]).

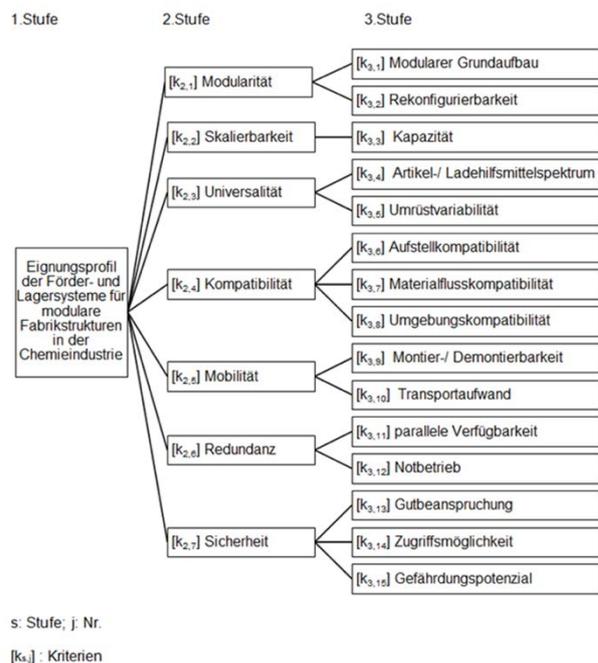


Abbildung 6: Kriterienhierarchie aus den Wandlungsbefähigern [MK15]

Die in Stufe 3 dargestellten Kriterien (vgl. Abbildung 6) wurden im Rahmen des ModuLOG Projekts auf Unabhängigkeit und Eignung überprüft.

Für die cyber-physischen Logistikmodule existiert bisher nur ein Grobkonzept, sodass eine Nutzwertanalyse mit einer Zehnerskala und Gewichtungsfaktoren eine Genauigkeit suggerieren würde, die aufgrund des frühen Stadiums der Forschung noch nicht gegeben sein kann. Der angestrebte Vergleich wurde daher streng nach der diskursiven Methode der Punktbewertung (VDI-Richtlinie 2225) durchgeführt. Im Gegensatz zu der Nutzwertanalyse umfasst die Werteskala hier lediglich die Werte „0 – 4“, menschenlesbar „unbefriedigend – sehr gut (ideal)“ [Mei 08]. Die Orientierung an der Vorgehensweise der Punktbewertung nach VDI 2225 führt zu einer seriösen Bewertungsgrundlage, ohne dass der Detaillierungsgrad einer vollständigen Nutzwertanalyse notwendig ist.

Das Ergebnis des Vergleich zwischen einem Logistikmodul ohne Intelligenz und einem cyber-physischen Logistikmodul auf Basis der Punktbewertung nach VDI 2225 ist in Abbildung 7 in anschaulicher Form dargestellt.

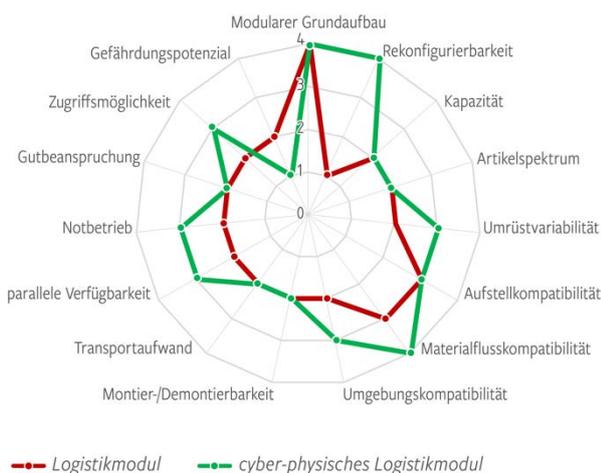


Abbildung 7: Vergleich der Wandlungsfähigkeit in der modularen Produktion der Prozessindustrie

Das cyber-physische Logistikmodul wird bei allen Kriterien in höherer Ausprägung bewertet, die über die Apparateskala (vgl. Abbildung 3) hinausgehen, da dort das cyber-physisch System der dezentralen Selbstverwaltung greift (vgl. Abbildung 7). Die Rekonfigurierbarkeit eines intelligenten Logistik- oder Produktionsmoduls läuft nach dem Plug & Produce-Prinzip ab. Eine erneute Konfiguration ist damit deutlich leichter, als bei fehlender Intelligenz. Im Optimalfall muss jedes cyber-physische Modul nur einmal einem Funktionstest unterzogen werden. Weitere Validierungen bei Änderungen der Reihenfolge in einem Produktionsprozess sind nicht mehr erforderlich. Ähnliche Vorteile liefert das cyber-physische Logistikmodul in puncto Kompatibilität. Darüber hinaus verbessern sich die Zugriffsmöglichkeiten. Probleme müssen nicht zwangsläufig vor Ort behoben werden. In vielen

Fällen reicht eine Fernauslese des Fehlers aus. Kritisch wird hingegen das Gefährdungspotential bei den intelligenten Logistikmodulen bewertet. Dabei steht vor allem die Datensicherheit im Fokus. Bei allen gegebenen Kommunikationsmöglichkeiten muss sichergestellt werden, dass die sensiblen Daten aus den einzelnen Modulen nur den Akteuren zugänglich gemacht werden, die sie benötigen und berechtigt sind sie zu bekommen.

Hinsichtlich der Wandlungsfähigkeit zeigt Abbildung 7 trotzdem deutlich die Vorteile eines intelligenten Systems. Sobald eine Verkettung von Modulen erforderlich ist, handelt es sich um ein Multi-Agenten-System, welches ohne die Intelligenz der einzelnen Einheiten nicht funktionieren kann.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Durch die Integration von iCon® konnte aus einem physischen vorhandenen, aber separierten Logistikmodul ein cyber-physisches Logistiksystem entwickelt werden. Ein Modul mit Intelligenz zu versehen ist der nächste Schritt auf dem Weg zu einer flexiblen und anpassungsfähigen Produktion in der Prozessindustrie. Für die wandlungsfähige Produktion ist die Logistik ein zentraler Enabler und Schlüssel für den Erfolg des Konzeptes. Dazu sind insbesondere vor dem Hintergrund der schnellen und aufwandsarmen (Re-)Konfiguration CPS notwendig. In Verbindung mit der in ModuLOG entstandenen automatischen Anordnungsplanung von modularen Containeranlagen geben cyber-physische Logistikmodule den Unternehmen die Chance, auf die steigende Produktdifferenzierung, verkürzte Lebenszyklen der Produkte und die wachsende Volatilität der Märkte schnell zu reagieren. Während die Logistik vorher in der Planung als notwendiges Übel ganz am Ende des Planungsprozesses betrachtet wurde, wird sie jetzt zum Schlüsselement für die Wettbewerbsfähigkeit der wandlungsfähigen Produktion.

Bislang existiert das beschriebene cyber-physische Logistikmodul allerdings nur in theoretischer Form als Grobkonzept. Daher handelt es sich bei den Ergebnissen kritisch betrachtet erst einmal um begründete Annahmen. Die Validierung dieser muss in den nächsten Schritten des Forschungsvorhabens durch Materialflusssimulationen in einer Digitalen Fabrik durchgeführt werden. Zusätzlich soll der Bau eines Prototypens, des beschriebenen intelligenten Logistikcontainers, Aufschluss über den Einsatz und die Funktionsweise der verschiedenen Hardwarekomponenten (Sensoren, Display, Solarzellen, etc.) geben. Nach Abschluss der Simulationen und der Feststellung des optimalen Materialflusses, gilt es die Modelle der Verfahrenstechnik und der Logistik zusammenzuführen. Die Produktionscontainer müssen ebenso mit der relevanten Technik ausgestattet werden, wie die Logistikmodule. Ein Funktionstest für cyber-physischen Produktionsmodule in der Prozessindustrie bedarf der Berücksichtigung diverser Restriktionen und Besonderheiten. Zum Abschluss

des angestrebten Forschungsvorhabens soll eine ganzheitliche Simulation der modularen Produktion in der Prozessindustrie entstehen, sodass die Umsetzbarkeit einer wandlungsfähigen Produktion mittels cyber-physischen Systemen bewiesen werden kann.

LITERATUR

- [BBE+03] Behr, A., Brehme, V.A., Ewers, C.L.J., Grön, H., Kimmel, T., Küppers, S. and Symietz, I. (2003), Neue Entwicklungen bei Anlagen und Verfahren für die Produktion von Pharmawirkstoffen. *Chemie Ingenieur Technik*, 75: 417-427. doi:10.1002/cite.200390084
- [BBK13] Bieringer, T., Buchholz, S. and Kockmann, N. (2013), Future Production Concepts in the Chemical Industry: Modular – Small-Scale – Continuous. *Chem. Eng. Technol.*, 36: 900-910. doi:10.1002/ceat.201200631
- [Buc10] Buchholz, Sigurd *Chem. Eng. Process*, 2010, 49 (10), S. 993
- [Buc14] Buchholz, Sigurd: F3 Factory Final Report to EC, 2014, http://F3factory.com/scripts/pages/en/new-sev-ents/F3_Factory_final_report_to_EC.pdf (Zugriff 15.08.2016)
- [BVL15] BVL (Hrsg.): Innovation in der Logistik-Fallbeispiel 2 „Der Flexförderer“. URL <http://www.bvl.de/thema/innovation-in-der-logistik/fallbeispiele/beispiel2> – Abrufdatum: 17.08.2016
- [EKW02] C. L. Ewers, S. Küppers, H. Weinmann, *Pharma supply chain. Neue Wege zu einer effizienten Wertschöpfungskette*, Edition- Cantor-Verlag, 2002
- [Fie13] Fiedler, M.: Wenn die Dinge wissen was sie tun... – Cyber Physical Systems in der Logistik. (2013) online: http://ikt.nrw.de/uploads/tx_dgdownload/1372155971-Fiedler_Effizienzsteigerungen_CPS.pdf – Abrufdatum: 17.08.2016
- [Gab15] Springer Gabler Verlag (Herausgeber), *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: Cyber-physische Systeme, online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2046932906/cyber-physische-systeme-v1.html> – Abrufdatum: 17.08.2016
- [Geb15] Gebhardt- Fördertechnik (Hrsg.): *GEBHARDT FlexConveyor - Industrie 4.0 Fördertechnik Baukasten*. URL <http://www.gebhardt-foerdertech-nik.de/de/produkte/flexconveyor.html> – Abrufdatum: 17.08.2016
- [KML+15] Kaczmarek, S., Mosblech, C., Lier, S. and ten Hompel, M. (2015), Modularisierung und automatische Anordnungsplanung der Intralogistik für modulare Containeranlagen in der Prozessindustrie. *Chemie Ingenieur Technik*, 87: 1246-1257. doi:10.1002/cite.201400160
- [KSK12] Kirks, T., Stenzel, J., Kamagaew, A. and ten Hompel, M. (2012), Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme. *Logistics Journal: Proceedings - ISSN 2192-9084* 1246-1257.
- [Lan12] Langenbach, Maik: Beitrag zur Systemfindung von Shuttle-Lagersystemen mit horizontaler Bedienebene. Dortmund. Verl. Praxiswissen, 2012
- [LG11] Lier, S. and Grünewald, M. (2011), Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants. *Chem. Eng. Technol.*, 34: 809-816. doi:10.1002/ceat.201000380
- [Lie13] Lier, Stefan. Entwicklung einer Bewertungsmethode für die Modularisierung von Produktionssystemen in der Chemieindustrie. Shaker, 2013
- [LGW+13] M. Lewandowski, M. Gath, D. Werthmann und 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 (Smart-SysTech)*, VDE. 2013, S. 1-5.
- [LWG15] Lier, S., Wörsdörfer, D., Grünewald, M. (2015), Wandlungsfähige Produktionskonzepte: Flexibel, Mobil, Dezentral, Modular, Beschleunigt, *Chemie Ingenieur Technik*, 87: 1147-1158. doi: 10.1002/cite.201400191
- [Mei08] Meier, Markus: *Auswählen und Bewerten*. Zürich, 2008

- [MK15] Mosblech, Christian; Kaczmarek, Sascha (2015): ModuLOG: Masterplan – Logistik & Supply Chain Strategien für modulare Chemie- und Pharmaproduktionen. Schlussbericht.
- [NRA08] P. Nyhuis, G. Reinhart, E. Abele, Wandlungsfähige Produktionssysteme, PZH-Verlag, Garbsen 2008.
- [Pro15] Produktionsforschung: KARISPRO. URL http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=3558 – Abrufdatum: 17.08.2016
- [RH16] Roidl M, ten Hompel M (2016). Leistungsverfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit in Systemen intelligenter Ladungsträger. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2016.
- [RHB+13] S. Russwurm, A. Huber, G. Baum, H. Borchering, M. Broy und M. Eigner. Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer-Verlag New York Incorporated, 2013.
- [RRH13] D. Rüdiger, M. Roidl und M. ten Hompel. "Towards Agile and Flexible Air Cargo Processes with Localization Based on RFID and Complex Event Processing". In: Dynamics in Logistics. Hrsg. von H.-J. Kreowski, B. Scholz-Reiter und K.-D. Thoben. Lecture Notes in Logistics. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 235-246.
- [Sch14] Schwarz, Christoph: Untersuchung zur Steigerbarkeit von Flexibilität, Performanz und Erweiterbarkeit von Fahrerlosen Transportsystemen durch den Einsatz dezentraler Steuerungstechniken. Dissertation, Oldenburg, 2014
- [Sha05] N. Shah, Comput. Chem. Eng. 2005, 29, S. 1125
- [SML92] Schürbüscher, D., Metzner, W. and Lempp, P. (1992), Besondere Anforderungen an die Produktionsplanung und -steuerung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Chemie Ingenieur Technik, 64: 334-341. doi:10.1002/cite.330640405
- [SSB+12] T. Seifert, S. Sievers, C. Bramsiepe, G. Schembecker, Chem. Eng. Process. 2012, 52, 140
- [VLH+13] Veigt, M., Lappe, D., Hribernik, K. A., & Scholz-Reiter, B. (2013). Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. Industrie Management, 29(1), 15-18.
- [Vog13] B. Vogel-Heuser. Engineering von der Anforderung bis zum Betrieb. Bd. 3. Kassel University Press GmbH, 2013.
- [WH00] H.-P. Wiendahl, R. Hernandez, Ind. Manage. 2000, 16 (5), 37.
-
- Daniel Große-Puppenthal, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW der Technischen Universität Dortmund. Daniel Große-Puppenthal wurde 1989 in Haltern am See, Deutschland, geboren. Zwischen 2009 und 2015 studierte er Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Dortmund.
- Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4, 44227 Dortmund, Deutschland.
Tel.: +49 231 755-2794, Fax: +49 231 755-4768
E-Mail: daniel.grosse-puppenthal@tu-dortmund.de
- Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Stefan Lier, MSIE (USA)**, Akademischer Rat am Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik der Ruhr-Universität Bochum. Leitung der Arbeitsgruppe für wandlungsfähige Produktions- und Logistik-konzepte. Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Dortmund und Industrial Engineering am Georgia Institute of Technology und promovierte an der Forschungsschule für energieeffiziente Produktion und Logistik.
- Adresse: Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum, Deutschland.
Tel.: +49 234 32-26193, Fax: +49 234 32-14164
E-Mail: Lier@fluidvt.rub.de
- Dipl.-Inform. Moritz Roidl**, Oberingenieur am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen FLW der Technischen Universität Dortmund. Er studierte Informatik an der TU Dortmund.
- Tel.: +49 231 755-3092, Fax: +49 231 755-4768
E-Mail: moritz.roidl@tu-dortmund.de
- Prof. Dr. Michael ten Hompel**, Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen FLW 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.
- Tel.: +49 231 9743-600, Fax: +49 231 755-4768
E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de