

# Modulare Logistiksysteme in der Prozessindustrie unter Einbeziehung von Industrie 4.0

Modular logistics systems in the process industry including Industry 4.0

**Andreas Hachmann**  
**Stephan Keßler**  
**Gustavo De La Torre**

*Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Institut für Produkt Engineering, Transportsysteme und -logistik  
Universität Duisburg-Essen*

*Operation Support & Safety  
Bayer Technology Services GmbH*

**Z**ur Gewährleistung einer kundenindividuellen, flexiblen Produktion, welche auch kleine Losegrößen kostengünstig produzieren kann, werden zukünftig Fabriken der Prozessindustrie nicht nur modular sondern darüber hinaus mobil sein. Zur Erreichung dieses Zieles werden neben Produktionselemente, auch sämtliche Logistikkomponenten in Containern zu Modulen zusammengefasst. Hierfür ist es notwendig Lager, aber auch komplexe Verpackungsmaschinen, zu konzipieren welche sich zusammen mit Produktionsmodulen, nach dem Plug-and-Produce-Prinzip, zu kompletten Produktionslinien verknüpfen lassen. Die Steuerung und Organisation erfolgt nach den Gedanken von Industrie 4.0.

*[Schlüsselwörter: Modulare Logistik, Prozessindustrie, Lean Production, Industrie 4.0, Pharma, Layoutplanung]*

**T**he requirement for a customised and flexible production, which can produce small batch sizes cost-effectively leads to modular, mobile factories in the process industry. For accomplishing this aim both the production elements and the logistics components will be placed into containers and conflate to a module. This requires the conceptualisation of warehouses but also of complex packaging machinery. Following the plug-and-produce principle these units can be connected to full production lines. The controlling and organisation follow the idea of Industry 4.0.

*[Keywords: Modular logistics, process industry, lean production, Industry 4.0, pharmaceutical, layout planning]*

## 1 EINLEITUNG

Nach der Fertigungsindustrie steht in den letzten Jahren auch die Prozessindustrie vermehrt vor der Herausforderung sich an schnell verändernde Märkte und kurze Produktlebenszyklen mit hoher Diversifikation anzupassen. Zusätzlich sind begrenzte Produktionskapazitäten zu

berücksichtigen. Als wesentliche Herausforderungen für die europäische Prozessindustrie wurde eine weitreichende, kostengünstige und hoch qualitative Prozessintensivierung identifiziert [Buc14]. Kontinuierliche Prozesstechnologien sind dabei von besonderem Interesse, da Fabriken mit Produktionskapazitäten von 100.000 Tonnen pro Jahr und mehr nicht für jedes Produkt geeignet sind. Modulare Produktions- und Logistiksysteme sind eine mögliche Lösung [Buc14]. Sie werden im Rahmen dieses Projektes und des Projektes ModuLOG erforscht.

## 2 ZIELSETZUNG

Das Ziel ist es ein technisches Konzept für ein modulares Logistiksystem unter der Berücksichtigung von Industrie 4.0 zu entwickeln. Ein Fokus liegt auf der technischen Entwicklung der Logistikeinheiten, da diese von der bisherigen Forschung noch nicht betrachtet wurden. Diese Logistikmodule unterstützen Produktionsmodule bei dem Wandel von einer Batch-Produktion zu einer kontinuierlichen Produktion. Sich hieraus ergebene Vorteile und Herausforderungen werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer betrachtet. Gleichzeitig müssen die Module in Größe, Funktion und Struktur so gestaltet sein, dass sie sich durch ihre Modularität und Mobilität rasch verändernden Märkten anpassen können, um die Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten [Gün06].

## 3 DEFINITION

Modulare Produktion und Logistik umfasst mobile, wiederwendbar und dezentral gesteuerte Module, welche eine klar umgrenzte Aufgabe erfüllen. Sie stellen einen Teil eines Wertschöpfungsprozesses dar z.B. in Form von Verpackungsmaschinen. Die einzelnen Module bestehen aus einem oder mehreren genormten ISO-Containern. In diese werden die erforderlichen Maschinen in Form von Submodulen auf einem einheitlichen, räumlichen Raster

angeordnet. Dieses Raster erlaubt es, die standardisierten Module an sich verändernde Anforderungen anzupassen. Zusätzlich ermöglichen es die Container die Module leicht zu transportieren und an einem neuen Standort neu zu positionieren. Die Verbindung der einzelnen Containern zu Modulen bzw. der verschiedenen Module miteinander erfolgt über standardisierte Schnittstellen. Diese erlauben den schnellen und flexiblen Aufbau ganzer Produktionsprozesse vom Wareneingang bis zum Versand.

Die Module beinhalten neben ihrer primären Produktions- oder Logistikfunktion zusätzlich die Betriebsmittel, die Schnittstellen zu externen Elementen, wie anderen Modulen und Versorgungseinrichtungen, und teilweise die Gebäudefunktionalitäten [Str09].

Die Definition von Industrie 4.0 stammt aus der bekannten Literatur und orientiert sich an den Logistikanforderungen:

„Der Begriff Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution, einer neuen Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den Lebenszyklus von Produkten. Dieser Zyklus orientiert sich an den zunehmend individualisierten Kundenwünschen und erstreckt sich von der Idee, dem Auftrag über die Entwicklung und Fertigung, die Auslieferung eines Produkts an den Endkunden bis hin zum Recycling, einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen. Basis ist die Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit durch Vernetzung aller an der Wertschöpfung beteiligten Instanzen sowie die Fähigkeit aus den Daten den zu jedem Zeitpunkt optimalen Wertschöpfungsfluss abzuleiten. Durch die Verbindung von Menschen, Objekten und Systemen entstehen dynamische, echtzeitoptimierte und selbst organisierende, unternehmensübergreifende Wertschöpfungsnetzwerke, die sich nach unterschiedlichen Kriterien wie bspw. Kosten, Verfügbarkeit und Ressourcenverbrauch optimieren lassen.“ [Pla13] [Hei15]

#### 4 ERFOLGSFAKTOREN MODULARER SYSTEME

Der innere Aufbau der Module kann zwar als Black Box verstanden werden, jedoch ist auch stets zu berücksichtigen wie die Module miteinander verknüpft sind. Es werden zwar standardisierte Schnittstellen zwischen den Modulen definiert, diese müssen aber dem Produkt angepasst werden, welches sich über den Verlauf der Produktion verändert. Somit sind sowohl in Form der Module, als auch in Form der Schnittstellen unterschiedliche Gestaltungsobjekte zu berücksichtigen [Str09].

Gleichermaßen müssen die Module eine Reihe von Eigenschaften aufweisen, welche für den erfolgreichen Einsatz von großer Bedeutung sind. Dies sind Erweiterungsfähigkeit, Integrationsfähigkeit, Produktmixflexibilität, Layoutflexibilität, Durchsatzflexibilität, Lernfähigkeit und die Flexibilität des Automatisierungsgrades [Buc14]

[Gün06]. Ziel ist es dabei stets den optimalen Betriebspunkt zwischen Flexibilitätsanforderungen, Kosten und Automatisierungsgrad zu nutzen. Auf Grund dessen müssen Materialflusssysteme so gestaltet sein, dass sie auf ungeplante Ereignisse reagieren oder mit geringen Rüstkosten und -zeit angepasst werden können, um beispielsweise auf neue Produkte oder Produktmenge reagieren zu können [Gün06].

#### 5 ZIELE MODULARER SYSTEME

Das wesentliche Ziel modularer Systeme ist in den Produktionsanlagen eine kontinuierliche Produktion von Kleinstmengen zu erreichen, welche u.a. die Produktion kundenindividueller Produkte erlaubt. Zusammen mit den unterstützenden Logistikmodulen wird gegenüber den konventionellen, stationären Produktionslinien, eine deutliche Erhöhung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erreicht. In solchen Prozessen passt sich die Logistik nicht mehr reaktiv, sondern interaktiv den Gegebenheiten an [Cor08].

Dadurch ist es möglich den Betrieb nur einzelner Module und die Ausgliederung anderer Module z.B. an Dienstleister, ist es für Produzenten möglich, sich auf ihr Kerngeschäft zu konzentrieren [Str09].

Nach der Zielrichtung von Industrie 4.0, soll eine einheitliche IT und Steuerungstechnik genutzt werden, die dazu führt, dass modulare Systeme dezentral gesteuert werden. Eine solche Steuerung unterstützt auch das Ziel der Verkürzung und Automatisierung von Planungsaktivitäten zur Etablierung neuer Logistikprozesse, welche durch modulare Systeme deutlich häufiger stattfinden können als bei stationären Anlagen. Im finalen Entwicklungsschritt sollen die Module ihre Produktion und Verlagerung komplett selber steuern. Zusammenfassend kann das übergreifende Ziel modularer Systeme als Supra-Adaptivität bezeichnet werden. Unter diesem Begriff wird die Fähigkeit eines Systems verstanden, sich mit minimalem Aufwand an unternehmensübergreifende Veränderungen anzupassen. Hierfür ist eine Kombination aus Wandlungsfähigkeit, Mobilität und Vernetzungsfähigkeit notwendig.

Neben den bisherigen qualitativen Zielen ist auch eine Reihe an quantitativen Zielen Teil modularer Systeme. Hierzu zählen die Minimierung der Transportkosten, Zwischenlagerungskosten, Raumkosten sowie Standortwechselkosten [Sch09]. Durch ihren dezentralen und relativ autonomen Aufbau bietet sich zugleich die Möglichkeit, insbesondere für die Logistikmodule, sie eigenverantwortlich bezüglich der Kosten und Ergebnisse zu betreiben. Hierdurch ergeben sich auch Outsourcingpotenziale an Logistikdienstleister.

## 6 AUFBAU MODULARER SYSTEME

Ein Produktionssystem setzt sich aus verschiedenen Elementen zusammensetzt, bei den denen es sich im betrachteten Falle um Module handelt. Die Module wiederum stellen eine oder mehrere spezielle Funktionen bereit, welche nach dem Baukasten- bzw. Legoprinzip (s. Abbildung 1) beliebig zu Produktionslinien zusammengesetzt und deren Kapazitäten erweitert werden können (s. Abbildung 2 und Abbildung 3) [FFa131] [May07]. Auch wenn in den beiden Abbildungen sind nur 20' Container dargestellt sind, ist es vorstellbar aus verschiedenen Containergrößen Module bzw. ganze Produktionsanlagen zu erstellen. Ein Modul setzt sich aus Containern derselben Farbe zusammen. Zudem besitzt in diesem Beispiel nur ein Container eines Moduls einen Anschluss an externe Infrastruktur. Weitere Container werden über diese Schnittstellen mit versorgt.

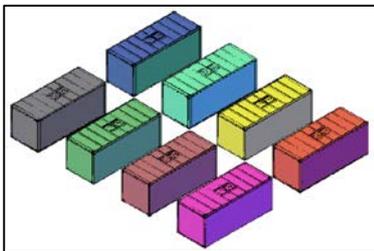


Abbildung 1: Baukasten modularer Systeme

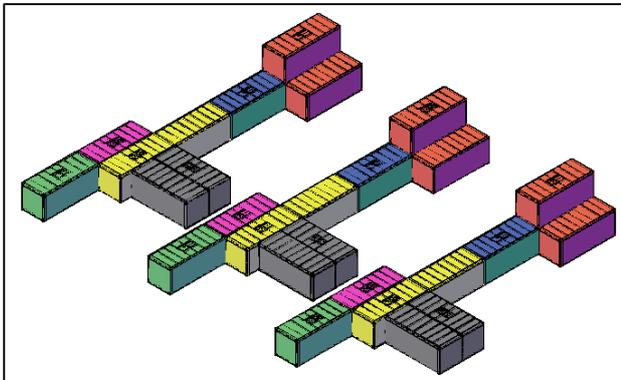


Abbildung 2: Kapazitätserweiterung durch parallele Produktionslinien

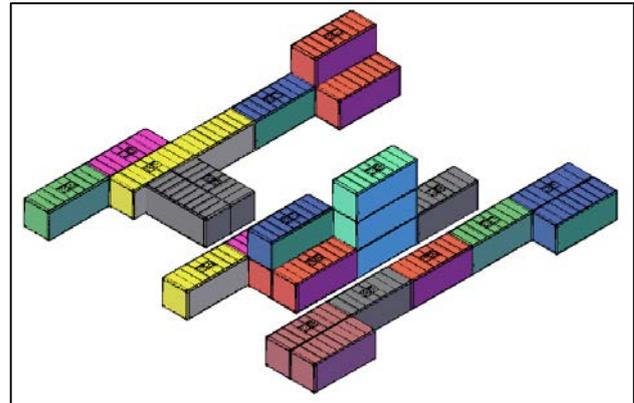


Abbildung 3: Parallele Produktion verschiedener Produkte

## 7 VOR- UND NACHTEILE MODULARER LOGISTIK

Eines der größten Probleme in der Prozessindustrie ist, dass viele Produktionsanlagen erst aber einer bestimmten Grundleistung wirtschaftlich arbeiten. So erlaubte es der Markt lange Zeit Losgrößen von ca. 5.000 Verpackungen pro Los zu verpacken, woraufhin bei Maschinen der Fokus auf Leistung und weniger auf kurze, kostengünstige Rüstzeiten lag. Durch Marktveränderung und neue Gesetze ist es heute teilweise erforderlich Losgrößen von nur 50 Verpackungen pro Los herzustellen. Auch kundenindividuelle Verpackungen erfordern kleinere Losgrößen [Brü14]. Durch modular aufgebaute Verpackungsmaschinen ist es machbar, die Module ohne oder nur mit kurzen Rüstzeiten an verschiedene Anforderungen anzupassen [Gei12]. Gleichzeitig sind die Transportdistanzen, sowohl für die Produkte, als auch für das Verpackungsmaterial zu den Verpackungsmodulen, deutlich kürzer als unter heutigen Bedingungen. Dies ergibt sich aus der möglichen Positionierung von Lagermodulen in direkter Nähe der Verpackungsmodule.

Bei Produktions- und Marktmengenschwankungen können Produktionsmodule nach Bedarf zu- oder abgeschaltet werden. Die Folge ist, eine gute Skalierbarkeit der Produktionsmodule an die Nachfrage, ferner können die Prozesse in diesen immer unter Idealbedingungen ablaufen und sind deutlich besser steuerbar [Gün06]. Module die für den lokalen Markt nicht notwendig sind, können entweder zu anderen Märkten transportiert werden oder sie werden mit geringem Rüstaufwand an die neuen Anforderungen angepasst. So kann ein Unternehmen mit wenig Aufwand eine auf den jeweiligen Märkten angepasste, effiziente Strategie verfolgen.

Diese Mobilität ermöglicht bereits in einem frühen Markteintrittsstadium in einem Markt zu produzieren, für den eine Großanlage nicht geeignet und/oder das Risiko zu hoch wäre z.B. auf Grund der politischen Lage [Buc14]. So können neue Märkte schneller erschlossen werden und sowohl die Kundenbindung als auch die Kundenzufriedenheit gesteigert werden [Brü14]. Im selben

Zug werden die Auflagen vieler Staaten für eine lokale Wertschöpfung erfüllt und die Produktion kann besser auf die lokalen Regularien abgestimmt werden [Keß14]. In Kombination mit der Standardisierung erlaubt es die Mobilität darüber hinaus, dass defekte Module oder auch nur Modulelemente wie Container oder Submodule schnell ausgetauscht werden können, ohne dass die Produktion und/ oder die Logistik für längere Zeit still steht.

Wie in Abbildung 4 zu sehen, verändert sich durch die modulare Produktion auch der Kostenverlauf bei Produktionsmengensteigerung. Während die konventionelle Kostenverlaufskurve erst mit steigender Fabrikgröße absinkt und immer flacher wird, fallen die Produktionskosten der modularen Produktion bereits direkt nach der Entwicklung deutlich und bleiben lange Zeit unter dem Verlauf der konventionellen Produktion. Begründet ist dies im Aufbau aus kleineren und schnell anpassbaren Submodulen, der hohen Effizienz der Produktionsmodule bei kleinen Produktionsmengen und der durch die Logistikmodule gewährleisteten Flexibilität [Buc14]. Allein bei den Ursprungsmaterialien können innerhalb der Produktionsmodule nach den bisherigen Untersuchungen durchschnittlich 15% der Materialkosten gespart werden [F3F13].

Ab bestimmten Produktionsmengen übersteigen die Kosten modularer Produktionsanlagen die der konventionellen Produktion auf Grund der steigenden Komplexität und fehlender Skaleneffekte. Somit sind modulare Systeme nur für kleine bis mittlere Produktionsmengen geeignet [Fra15]. Ab wie vielen Modulen dieser Break-Even-Punkt eintritt, ist bisher noch nicht erforscht und ist abhängig von dem jeweiligen Produkt. Auch die standardisierten Schnittstellen, welche eine Logistikkomponente darstellen, führen zu Kosteneinsparungen, da sie es erlauben Module unabhängig zu testen, in Betrieb zu nehmen und ebenso zu warten [Gün06]. Die Pilotanlagen haben gezeigt, dass Kosteneinsparungen von 10-20% möglich sind [Buc14].

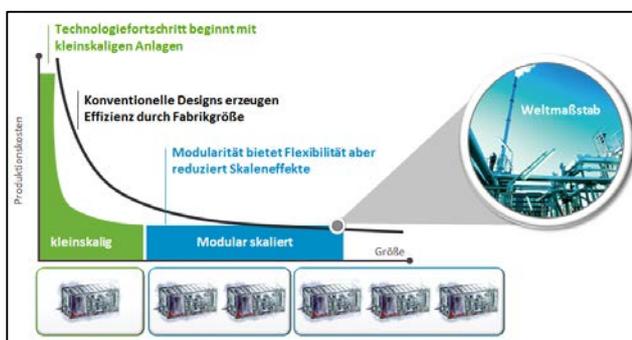


Abbildung 4: Kostenverlaufskurve modulare und konventionelle Produktion im Vergleich [Wie13]

Bei der Gestaltung der standardisierten Schnittstellen ist jedoch mit Mehraufwand zu rechnen, da diese erheblich kostenaufwendiger ist, als die von integralen Schnitt-

stellen. Für Prozesse mit der Anforderung einer hohen Wandlungsfähigkeit werden diese Mehraufwände bei der Veränderung der Prozesse allerdings wieder ausgeglichen [May07].

Nicht nur Kostenreduzierungen, auch Entwicklungszeiten können durch modulare Anlagen verringert werden, was zu Wettbewerbsvorteilen führt. So lassen sich die Zeiten von der Entwicklung bis zur Produktion reduzieren und die Wandelbarkeit steigern. Ermöglicht wird dies einerseits durch die Wiederwendung von Modulen und das Zurückgreifen auf vorhandenes Wissen, wodurch Versuche in Technikums- bzw. Pilotanlagen vermieden werden [May07]. Ferner wird es durch die modulare Struktur und die standardisierten Schnittstellen ermöglicht Prozesse schnell abzubilden [Gün06].

Nicht zuletzt stehen viele etablierten Prozessindustriestandorte vor der Schwierigkeit, dass keine Flächen für Erweiterungen zur Verfügung stehen und ggf. leerstehende Gebäude, z.B. auf Grund ihrer Stützenstruktur, nicht für neue Prozesse geeignet sind. Zur Schaffung freier Flächen z.B. für Produktionserweiterungen ist ein erster Ansatz häufig Logistikaktivitäten auszulagern und teilweise an externe Dienstleister zu vergeben. Durch den Einsatz kompakter Logistikmodule mit geringem und genormtem Flächenbedarf können auch bisher nicht geeignete Flächen für Logistikaktivitäten, z.B. Sekundärverpackungsanlagen, genutzt werden. Hinzu kommt, dass sich hierdurch der Flächen- und Raumnutzungsgrad deutlich verbessern lässt [Buc14].

## 8 VERKNÜPFUNG VON MODULARER LOGISTIK UND INDUSTRIE 4.0

Bereits bei einem ersten Blick sind starke Ähnlichkeiten beider Themen zu erkennen. Der modulare Aufbau und die Verbindung über standardisierte Schnittstellen ist Grundlage für viele identische Eigenschaften beider Anwendungen wie z.B. Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Dennoch weisen die Elemente beider Konzepte einen hohen Grad an Standardisierung auf. Ziel dieses Aufbaus ist es bei Neubau oder Veränderungen nach dem Plug-and-Produce-Prinzip zu arbeiten, um die hiermit verbundenen Vorteile zu nutzen.

Dabei sind können die Module als Hardwarekomponente angesehen werden, welche die physischen Produktions- und Logistikfunktionen erfüllen und ihre genannten Eigenschaften beitragen. Durch Industrie 4.0 als Softwarekomponente wird eine dezentrale Steuerung und Organisation ermöglicht, welche die einzelnen Module schnell und effizient verknüpft. Zudem wird eine Abstimmung der Kapazitäten ermöglicht. Diese Kombination erzeugt eine besonders schlagkräftige Wertschöpfungskette, welche auf Veränderungen und neue Anforderungen schnell und flexibel reagieren kann, um z.B. Losgrößenmenge von eins zu produzieren.

## 9 KONZEPTIONELLE UMSETZUNG

Als Beispiel für eine konzeptionelle Umsetzung soll ein typischer Verpackungsbereich für pharmazeutische Produkte dienen. Heute in derartigen Bereichen genutzte Hochleistungsverpackungsmaschinen lassen sich bei kleinen Losgrößen mit häufigen Rüstvorgängen nicht mehr effizient einsetzen. Hinzu kommt, dass Verpackungen häufig in großen Mengen auf Paletten bereitgestellt werden und dass die Wege zu den Lagern relativ lang sind. Um eine produktionsnahe Lagerung in kleinen Losgrößen zu gewährleisten, wurde – dem modularen Gestaltungsansatz für Produktionscontainer aus dem F<sup>3</sup> Factory-Projekt folgend – ein modulares Behälterlager entwickelt. Bezüglich der Konzeption einer modularen Verpackungsanlage sei auf die Masterarbeit [Hac15] verwiesen.

### 9.1 GRUNDANNAHMEN

Als Basis für die praktische Konzeption dienen 20' ISO-Container mit der Bezeichnung 1C und 40' ISO-Container mit der Bezeichnung 1A nach der Norm ISO 668: 1999. Diese weisen nach [Deu99] [Int15] [Int151] die folgenden wesentlichen Eckdaten auf:

	1C-Container	1A-Container
<b>Außenmaße</b>		
Länge in mm	6.058	12.192
Breite in mm	2.438	2.438
Höhe in mm	2.438	2.438
<b>Innenmaße</b>		
Länge in mm	5.700	11400
Breite in mm	2.280	2.280
Höhe in mm	2.280	2.280
<b>Gewicht</b>		
Max. Gesamtgewicht in kg	24.000	24.000
Max. Ladungsgewicht in kg	22.500	21.000

Tabelle 1: Eckdaten Container

Bei den Innenmaßen und den Gewichten handelt es sich um modifizierte Werte, welche kleiner sind als die Angaben des Containerherstellers. Bezüglich der Innenmaße ist dies mit dem zu Grunde gelegten Raster von 570 mm x 570 mm x 570 mm begründet. Es ist identisch mit dem im Rahmen des F<sup>3</sup> Factory-Projektes entwickelten

Rasters für einen Produktionscontainer und basiert bezüglich der Grundfläche auf dem Viertel einer Chemiepalette mit den Maßen 1.140 mm x 1.140 mm. Ein weiterer Vorteil dieses Rasters ist, dass bei Containern mit einer Außenhöhe von 2.438 mm der Innenraum optimal ausgenutzt wird (s. Abbildung 5). Dieses Raster verfolgt das Ziel, den Container auch in sich modular aufzubauen, indem einzelne Elemente auf diesem Raster verschoben und ausgetauscht werden können. Mit den europäischen Modulmaßen, auf denen u.a. Europaletten und Eurobehälter basieren, wäre dies nicht möglich.

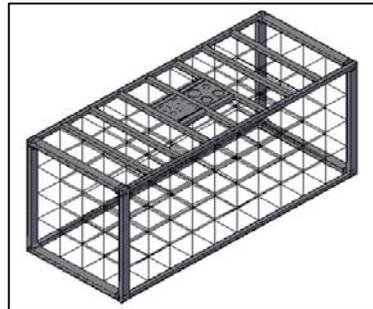


Abbildung 5: 20 Fuß Container im Grundaufbau

Im Vergleich eines 20' Containers zu einem 40' Container wird das Raster nur verdoppelt, obwohl theoretisch mehr Platz zur Verfügung steht. Da dieser zusätzliche Platz jedoch nur 434 mm mehr Platz in der Länge bietet ist kein zusätzliches Rasterfeld von 570 mm möglich (s. Abbildung 6). Dieser Platz steht daher zu Verstärkung der Containerstatik und als optionaler Platz zur Verfügung, welcher hier nicht weiter berücksichtigt wird.

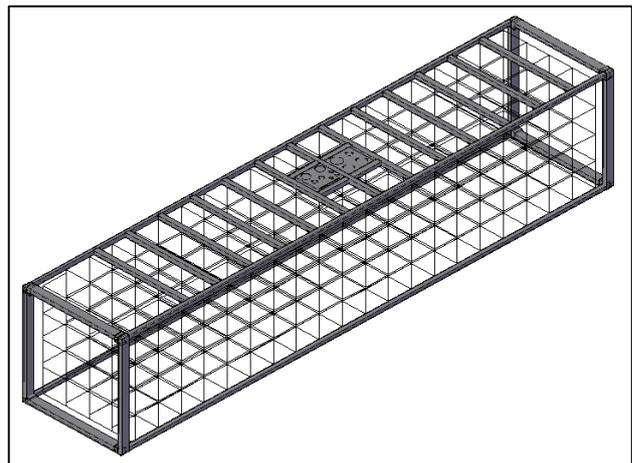


Abbildung 6: 40 Fuß Container im Grundaufbau

Das Gewicht wurde limitiert, um Straßentransporte ohne Sondergenehmigung durchführen zu können. Laut Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 34 Absatz 6 Nummer 5 ist das maximal zulässige Gewicht im normalen Straßenverkehr auf 40 t beschränkt. Ein beispielhafter Sattelzug weist ein Eigengewicht von 15 t auf. Zusätzlich besitzen 1C Container ein Leergewicht von 2,38 t und 1A

Container 3,86 t [Int15] [Int151]. Diese Gewichte werden vom maximal zulässigen Gewicht abgezogen und gerundet als maximales Gewicht für die Container genommen.

Im Unterschied zum Gestaltungsansatz für Produktionscontainer im F<sup>3</sup> Factory-Projekt wird die Schnittstellen zu den externen Versorgungsleitungen im Dach des Containers untergebracht und nicht an einer der Kopfseiten. So ist es möglich innerhalb eines Moduls, welches aus mehreren Containern besteht, nur einen Container über eine externe Schnittstelle anzubinden und über interne Leitungen die anderen Container mit den Betriebsmitteln zu versorgen (vgl. *Abbildung 2* und *Abbildung 3*). Einer der Vorteile die hierdurch entstehen ist, dass die Container und Module beliebig zueinander positioniert werden können, um einen optimalen Materialfluss zu gewährleisten und nicht bereits eine Seite blockiert ist. Zudem erfolgt die Versorgung von Gebäuden in Chemieparks überwiegend über Rohrbrücken, deren Verläufe im Vergleich zu erdgebundenen Leitungen deutlich leichter veränderbar sind. Darüber hinaus entstände bei einer Schnittstelle direkt durch den Boden der Container das Problem, dass die bei vielen Produkten notwendige Gefahrgutwanne durchbohrt werden müsste.

Eine besondere Vorgabe für die modularen Logistikanlagen ist ihre Widerstandsfähigkeit gegen die Transportbeanspruchungen z.B. gegen variierende Frequenzen und Beschleunigungen der verschiedenen Transportträger.

## 9.2 VORGEHEN

Nach dem Durcharbeiten der Grundannahmen, wird zuerst das Raster in Kombination mit der Nutzung von Submodulen betrachtet. Um den Rüstaufwand beim Verschieben oder Austauschen von Modulen minimal zu halten wurden drei Ladungs- /Submodulträger orientiert an der CP3-Chemiepalette konzipiert. Bezüglich der Gewichtsgrenze stellen die Submodulträger kein Problem dar. Selbst schwere Lager und Verpackungsmaschinen, die den gesamten Container ausfüllen würden, liegen laut Herstellerangaben deutlich unterhalb der Gewichtsgrenze.

### 9.2.1 BEHÄLTERLAGER

Als nächstes gilt es einen Lagertyp auszuwählen der für die Versorgung einer oder mehrerer Verpackungsmaschinen in der Pharmaindustrie geeignet ist und den folgenden Kriterien entspricht, welche sich an [ten07] orientieren:

1 = Geringe Bedeutung

2 = Mittlere Bedeutung

3 = Höchste Bedeutung

Nr.	Kriterium	Bewertung
1.	Anzahl Ladeeinheiten pro Artikel	Klein
2.	Artikelanzahl	Groß
3.	Flexibilität für Artikelmengeänderung	3
4.	Direktzugriff auf jede Ladeeinheit	3
5.	Kurze Zugriffsdauer	3
6.	Gewicht der Ladeeinheiten	Klein bis mittel
7.	Geringe Lagergutbelastung	3
8.	Automatisierungsgrad	2
9.	Eignung für eine automatische Kommissionierung	1
10.	Zusätzlich benötigte Fördertechnik zum Ein- und Auslagern	2
11.	First in – First out	2
12.	Raumnutzung = Lagegutvolumen/Lagergesamtvolumen	3
13.	Flächennutzung = Lagegutfläche/Lagergesamtfläche	3
14.	Höhen- oder Längenbegrenzung	3
15.	Chaotische Lagerung	3
16.	Organisation mit Datenverarbeitung	3
17.	Investitionsaufwand (Lager- und Fördertechnik)	2
18.	Wartungsaufwand	3
19.	Geringe Risiko von Störungsanfälligkeit und Unfallgefährdung	3
20.	Notbetrieb bei Betriebsstörungen von Lagermittel oder Lagerbedientechnik	3
21.	Erweiterungsfähigkeit	3

Tabelle 2: Kriterien für Lagerauswahl

Umso geringer in Summe die Abweichung des Lagers ist, umso geeigneter ist es für modulare Systeme. Nur für die Kriterien der „Anzahl Ladeeinheiten pro Artikel“,

der „Artikelanzahl“ und dem „Gewicht der Ladeeinheiten“ wurde der numerischen Bewertung abgewichen, da sie nicht geeignet ist.

Die Bewertungen der Kriterien 1 und 2 stellen den Grundgedanken einer Artikelstruktur für die modulare Produktion dar. Eine große Anzahl verschiedener Artikel wird entweder in kleinen Artikelmenen parallel und kontinuierlich produziert oder sie werden auf einer Maschine mit geringen Rüstzeiten hergestellt. Auch kann es als Folge von Marktschwankungen häufig zu Artikelmenenänderungen kommen (Kriterium 3), wodurch möglichst ein Direktzugriff auf jede Ladeeinheit möglich sein muss (Kriterium 4). Daher ist auch eine kurze Zugriffsdauer von höchster Bedeutung (Kriterium 5). Das Gewicht in Kriterium 6 entspricht den typischen Werten für Verpackungsmaterial und von Pharmaprodukten, deren Belastung darüber hinaus möglichst gering sein sollte, um eine Beschädigung zu vermeiden (Kriterium 7). Bezüglich des gewünschten Automatisierungsgrades besteht nur eine mittlere Bedeutung, welche auch zu einer geringen Bedeutung verändert werden kann. Hintergrund hierfür ist der relativ hohe Aufwand für den Aufbau automatisierter Systeme. Um eine hohe Flexibilität zu gewährleisten, ist eine manuelle Bedienung häufig robuster (Kriterium 8 und 9). Wenn möglich, sollte die Ein- und Auslagerung der Ladeeinheiten ohne externe Fördertechnik erfolgen, um die dezentrale, unabhängige Struktur der Module zu unterstützen (Kriterium 10).

Dem „First in – First out“ in Kriterium 11 ist nur eine mittlere Bedeutung zugemessen. Für Verpackungen hat dies eher eine geringe Bedeutung, hingegen besitzt die Berücksichtigung des Mindesthaltbarkeitsdatums bei zwischengelagerten befüllten Verpackungen eine hohe Bedeutung, daher dieser Mittelwert. Von besonderer Bedeutung ist auf Grund der begrenzten Containermaße eine hohe Flächen- und Raumnutzung (Kriterium 12 und 13), zusammen mit der Höhen- und Längenbegrenzung (Kriterium 14). Eine chaotische Lagerung (Kriterium 15) gewährleistet zudem eine optimale Auslastung des Lagers durch die Lagereinheiten. Um dies und dezentrale Steuerung zu gewährleisten, ist die Bedeutung der „Organisation mit Datenverarbeitung“ als hoch einzustufen (Kriterium 16). Als nächstes ist den Investitionskosten (Kriterium 17) eine mittlere Bedeutung zugemessen, da sie zwar wie bei jedem Projekt eine wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig aber würden sie bei einer hohen Bewertung zu einer reduzierten Wandlungsfähigkeit führen. Das gleiche gilt für den Wartungsaufwand (Kriterium 18). Überdies ist von großer Bedeutung mit Hilfe eines geringen Stör- und Unfallrisikos die Zuverlässigkeit zu maximieren (Kriterium 19). Sollte es dennoch zu Störungen kommen, z.B. als Folge nicht idealer Standortbedingungen, ist es von großer Bedeutung, dass die Anlagen in einem Notbetrieb einen gewissen Mindestdurchsatz gewährleisten (Kriterium 20). Wichtig ist zudem die Erweiterungsfähigkeit um zusätzliche Container und/oder Module, welche identisch sind

oder eine Ergänzung um zusätzliche Funktionen darstellen (Kriterium 21). Dies betrifft neben der Lagerkonstruktion und Fördertechnik auch die eingesetzte IT. Die IT erkennt automatisch die neuen Anlagen und ergänzt sie ohne Programmieraufwand im System.

Am besten erfüllt das Behälterregal diese Kriterien. Dabei wurde von einem zentralen Bediengang innerhalb des Containers abgesehen, da er wertvollen Platz innerhalb des Containers in Anspruch nehmen würde und der Bedienung innerhalb eines Zeltes oder einer Schnellbauhalle erfolgen kann.

Nach diesem Entwicklungsschritt werden die zu handhabenden Güter betrachtet. Hierbei stellte sich heraus, dass die Lagerbehälter die minimalen Innenmaße von (L x B x H) 90 mm x 217 mm x 260 mm aufweisen müssen. Es ist zu betonen, dass es sich bei diesem Maß um ein Minimalmaß handelt und nicht um ein Idealmaß, da es auf Grund der großen Anzahl verschiedener Verpackungen wichtiger ist alle Verpackungen lagern zu können, als das Behältervolumen immer voll auszunutzen.

Bei der Untersuchung, der auf dem Markt verfügbaren Behälter zeigen die folgenden Eurobehälter die beste Eignung nach den oben genannten Kriterien auf.

Behältertyp	Innenmaße in mm	Volumen in l bzw. dm <sup>3</sup>	Außenmaße in mm
Behälter 1	359 x 259 x 306	29,5	400 x 300 x 320
Behälter 2	552 x 352 x 295	63,7	600 x 400 x 320
Behälter 3	754 x 554 x 286	122,0	800 x 600 x 320

Tabelle 3: Maße genutzte Behälter

Die Nutzung dieser drei Behälter hat den Vorzug, dass in einem Behälterlager, mit einer gegebenen Fachbreite von 400 mm oder 600 mm, entweder Behälter 1 und 2 oder Behälter 2 und 3 zusammen in einem Fach eingelagert werden können. Hierfür muss Behälter 2 um nur 90° gedreht werden. Diese Maße sind aber auch ein Problem mit Blick auf das Raster und die Containermaße, da sie nicht mit diesen kompatibel sind. Als Folge der Nutzung der Submodulträger kann es dazu kommen, dass ungenutzte Fläche zu Gunsten der Wandelungsfähigkeit entsteht, wie auf Abbildung 8 zu sehen. Dies ist aber neben der Behälterauswahl auch abhängig von den genutzten Elementen des Lagers.

Bei der Entwicklung des Lagers sind, neben den üblichen Kriterien, die Abmaße der einzelnen Elemente von besonderer Bedeutung. Im Extremfall kann ein Millimeter zu viel dazu führen, dass zwei Rasterplätze in Anspruch genommen werden müssen anstatt einem. Das Behälterre-

gal für Behälter mit einer Breite von 400 mm wurde daher beispielhaft dem Rastermaß angepasst (s. Abbildung 7).

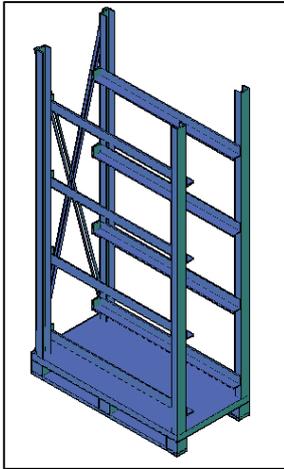


Abbildung 7: Submodul-Behälterlager mit Breite von 400 mm

Wie in Abbildung 7 zu sehen, sind vier Regalstützen mit den Abmaßen eines U-Profiles auf den Ecken eines 570 mm x 1140 mm Submodulträgers positioniert. Diese Stützen weisen zu allen Seiten hin Rasterlöcher auf. Die seitlichen dienen dazu die Querträger beliebig in der Höhe zu variieren. Die Frontalen werden zum Einhängen von Identifikationsmitteln genutzt. Hierfür befindet sich auf einem Schild eine Fachbezeichnung in Klarschrift, welche durch einen Barcode und/oder RFID-Tag ergänzt wird. So können die Behälterplätze einfach beschriftet werden, je nach Anzahl und Positionierung eines oder mehrerer Lagermodule. Zudem können die Stützen durch die vorderen Rasterlöcher auch für andere Lagerarten, z.B. Traversenregale wiederverwendet werden, da sie einen ausreichenden Stabilitätsüberschuss aufweisen.

Konstruktionsbedingt weist das Lager eine nutzbare Tiefe von 1.096,5 mm auf. Für die Höhe ist ein maximaler Wert von 2.280 mm durch den Container vorgegeben. Pro Fach wird eine Höhe von 526 mm benötigt. Somit ergibt sich, dass bei der aktuellen Auslegung und Behälterhöhe vier Behälter übereinander gelagert werden können. Zur Stabilisierung werden die hinteren Stützen mit zwei Trägern in X-Form verbunden. Ein Kanten- und Anfahrerschutz musste nicht berücksichtigt werden, da dieser durch den Containerrahmen gewährleistet ist.

Für Behälter mit einer Breite von 600 mm muss das Lager um 200 mm verbreitert werden. Unter Beibehaltung der bisherigen Konstruktionselemente und Abmaße führt dies zur Nutzung eines 1.140 mm x 1.140 mm Submodulträgers, welcher in Abbildung 8 dargestellt ist. Bis auf die vergrößerte Breite unterscheidet sich dieses nicht von dem 400 mm Regal.

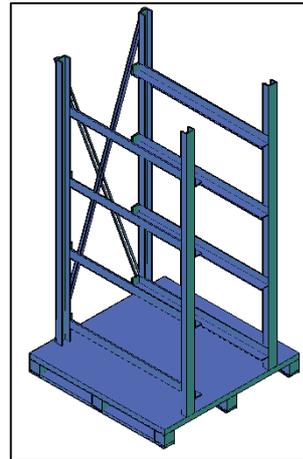


Abbildung 8: Submodul-Behälterlager mit Breite von 600 mm

Durch Nutzung der Submodulträger ist es nun möglich die Submodule beliebig innerhalb eines Containers zu positionieren. Ein Beispiel für die Kombination der 400 mm und 600 mm Behälterregale ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Bedienung erfolgt durch flurgebundene, frei bewegliche Behälterstapler oder einen Hubwagen, welcher mit Hilfe einer entsprechenden Hubvorrichtung auch in den oberen Ebenen des Regals arbeiten kann. Für beide Bediengeräte ist es erforderlich, dass sich unterhalb der Gabel keine vorstehenden Elemente befinden oder dass das Lastaufnahmemittel teleskopierbar ist, da der Containerrahmen ein Unterfahren des Lagers verhindert.

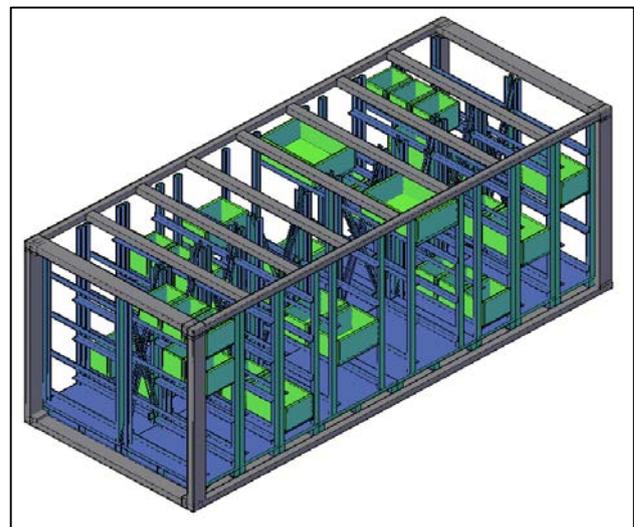


Abbildung 9: Behälterlagermodul

## 9.2.2 PALETTENREGAL

Zur Palettenlagerung könnte ein Regal in Erwägung gezogen werden. Bei der Betrachtung der Containerinnenhöhe von 2.280 mm, einer Palettenhöhe von 138 mm und einer Hubhöhe von 100 mm zeigt sich aber, dass eine Bodenzeilenlagerung am vielversprechendsten ist. Bei ei-

ner Lagerung von zwei Paletten übereinander beträgt die maximal mögliche Ladungshöhe auf einer Palette 952 mm. In Summe mit der Palettenhöhe entspricht dies einer Höhe von 1.090 mm. Um die Nutzung der CCG-Norm zu ermöglichen, welche in der CCG I eine Höhe von Ladung und Palette von 1.050 mm vorschreibt, wird die maximal zulässige Höhe auf diesen Wert begrenzt. Die Ladeeinheiten können entweder wie in Abbildung 10 im Container gestapelt werden oder in einen normalen Transportcontainer, welcher direkt zum Kunden transportiert werden kann. Die Bedienung erfolgt durch einfach flurgebundene, frei bewegliche Gabelstapler.

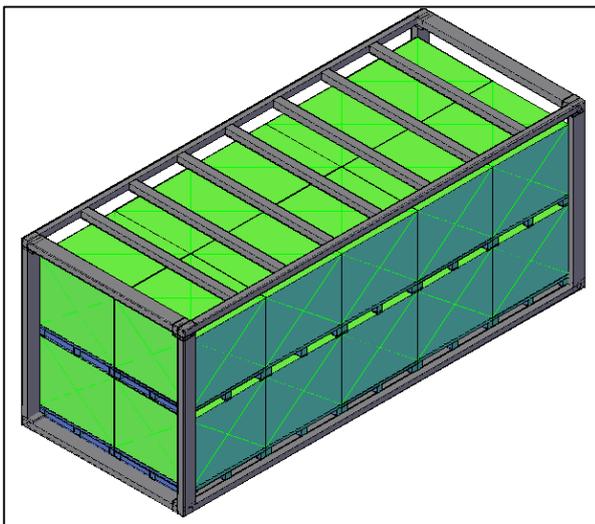


Abbildung 10: Palettenlagermodul

## 10 FAZIT

Modulare Produktions- und Logistiksysteme weisen neben einer hohen Wandlungsfähigkeit, dank des Einbaus in Containern, auch eine beispiellose Mobilität auf. Trotz des frühen Entwicklungsstandes zeigt sich bereits eine Reihe von Potentialen für den zukünftigen Einsatz. Insbesondere in der Prozessindustrie ermöglichen es modulare Systeme neue Märkte zu erschließen und neue Produkte auf den Markt zu bringen, die als Folge ihrer kleinen bis mittleren Losgrößen bisher nicht wirtschaftlich produziert werden konnten. Für die klassische Produktion großer Mengen stellen modulare System dennoch keinen Ersatz dar.

Der frühe Entwicklungsstand bietet die Möglichkeit die modularen Systeme optimal an die zukünftigen Anforderungen anzupassen und mit den Ideen von Industrie 4.0 zu verbinden. Zudem sind noch eine Reihe an Themenfeldern zu erforschen und zu entwickeln. Neben den technischen Aspekten, wie der Konstruktion eines Prototypen, gilt es auch rechtliche Problemstellung zu betrachten, wie z.B. die Notwendigkeit Genehmigungsverfahren an die modularen und mobilen Strukturen anzupassen und die Zeiten bis zur rechtlichen Produktionsfreigabe deut-

lich zu verkürzen. Des Weiteren können auf Basis funktionsfähiger Module Netzwerkstrukturen mit Hilfe mathematischer Methoden und Optimierungsalgorithmen verschiedene Standortszenarien entwickelt werden.

## LITERATUR

- [Brü14] Brüll, L. & Kessler, S., 2014. *Literature Series Supply Chain Management: Sustainable Logistics for Modular Production in the Process Industry*. [Online] Available at: <http://www.bvl.de/mybvl/kostenfreie-publikationen/literature-series-archiv> [Zugriff am 07 April 2015].
- [Buc14] Buchholz, S., 2014. *F<sup>3</sup> Factory final report to EC*. [Online] Available at: [http://f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F3\\_Factory\\_final\\_report\\_to\\_EC.pdf](http://f3factory.com/scripts/pages/en/newsevents/F3_Factory_final_report_to_EC.pdf) [Zugriff am 28 April 2015].
- [Cor08] Corsten, H. & Gössinger, R., 2008. *Einführung in das Supply Chain Management*. 2. Auflage Hrsg. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- [Deu99] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1999. *ISO 668 : 1999 ISO-Container der Reihe 1*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [F3F13] F<sup>3</sup> Factory Consortium, 2013. *PDF of achievements and case study summaries of F<sup>3</sup> Factory project*. [Online] Available at: <http://f3factory.com/scripts/pages/en/home.php> [Zugriff am 28 April 2015].
- [FFa131] F<sup>3</sup> Factory, 2013. *F<sup>3</sup> Factory: Modular and flexible continuous chemical production concept Notes pages*. [Online] Available at: [f3factory.com/html/images/upload/WP9\\_Dissemination/01\\_Modular\\_and\\_flexible\\_continuous\\_production.pdf](http://f3factory.com/html/images/upload/WP9_Dissemination/01_Modular_and_flexible_continuous_production.pdf) [Zugriff am 30 April 2015].
- [Fra15] Fraunhofer IML; Weyer Gruppe, 2015. *Abschlusspräsentation ModuLOG*. Dortmund: Fraunhofer IML; Weyer Gruppe.
- [Gei12] Geisberger, E. & Broy, M., 2012. *acatech STUDIE*. [Online] Available at:

- [http://www.bmbf.de/pubRD/acatech\\_STUDI\\_E\\_agendaCPS\\_Web\\_20120312\\_superfinal.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/acatech_STUDI_E_agendaCPS_Web_20120312_superfinal.pdf)  
[Zugriff am 07 April 2015].
- [Gün06] Günthner, W. A., Wilke, M. & Heinecker, M., 2006. *Modulare Materialflusssysteme für wandelbare Fabrikstrukturen*, Garching bei München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München.
- [Hac15] Hachmann, A., 2015. *Modulare Produktion und Logistik in der Prozessindustrie unter Berücksichtigung von Industrie 4.0*, Duisburg: Universität Duisburg-Essen.
- [Hei15] Heinrich, A., 2015. *Wirtschaftswoche: Kleine Zulieferer, die Verlierer der Digitalisierung*. [Online] Available at: <http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/industrie-4-0-kleine-zulieferer-die-verlierer-der-digitalisierung/11616570.html>  
[Zugriff am 16 April 2015].
- [Int15] International Container Service GmbH, 2015. *International Container Service GmbH: 20' Dry Van blau*. [Online] Available at: <http://www.iconcontainer.de/portfolio/dv-20standard/>  
[Zugriff am 01 Juli 2015].
- [Int151] International Container Service GmbH, 2015. *International Container Service GmbH: 40' Dry Van blau*. [Online] Available at: <http://www.iconcontainer.de/portfolio/40-dry-van-x-8-x-86-container-full-corten-steel/>  
[Zugriff am 01 Juli 2015].
- [Keß14] Keßler, S. & Brüll, L., 2014. *Nachhaltige Logistik für die modulare Produktion in der Prozessindustrie*. [Online] Available at: [www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/iff-wissenschaftstage-2014-logistik-tagungsband-fraunhofer-iff.pdf](http://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/iff-wissenschaftstage-2014-logistik-tagungsband-fraunhofer-iff.pdf)  
[Zugriff am 28 06 2015].
- [May07] Mayer, A., 2007. *Modularisierung der Logistik: Ein gestaltungsmodell zum Management von Komplexität in der industriellen Logistik*. Berlin: Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin.
- [Pla13] Plattform Industrie 4.0, 2013. *Was Industrie 4.0 (für uns) ist*. [Online] Available at: <http://www.plattform-i40.de/blog/was-industrie-40-f%C3%BCr-uns-ist>  
[Zugriff am 20 Mai 2015].
- [Sch09] Schulte, C., 2009. *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*. 5. Hrsg. München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- [Str09] Straube, F. & Ouyeder, O., 2009. *Modularisierung logistischer Systeme*, Berlin: Technische Universität Berlin.
- [ten07] ten Hompel, M., Schmidt, T. & Nagel, L., 2007. *Materialflusssysteme*. 3. Hrsg. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Wie13] Wiemann, D., 2013. *Industrie 4.0 und modulare Produktionsanlagen*, Leverkusen: Bayer AG.
- 
- Andreas Hachmann, M.Sc.**, Bester Masterabsolvent im Studiengang Technische Logistik an der University Duisburg-Essen, Transportsysteme und -logistik, Institut für Produkt Engineering, Fakultät für Ingenieurwissenschaften. Seine Masterarbeit verfasste er in Kooperation mit der Bayer Technology Services GmbH. Auszüge dieser Arbeit wurden für diesen Artikel verwendet. Andreas Hachmann wurde 1988 in Niebüll, Deutschland geboren und absolvierte seinen Bachelorabschluss im Studiengang Transportwesen/Logistik an der Hochschule Bremerhaven im September 2013.
- Adresse:  
M.Sc. Andreas Hachmann  
Institut für Produkt Engineering, Transportsysteme und –  
logistik  
Keetmannstr. 3-9  
47058 Duisburg, Deutschland.  
E-Mail: [andreasHachmann@web.de](mailto:andreasHachmann@web.de)
- Adresse:  
Dr.-Ing. Stephan Keßler  
Bayer Technology Services GmbH  
Gebäude: K9  
51368 Leverkusen, Deutschland  
[stephan.kessler@bayer.com](mailto:stephan.kessler@bayer.com)