

■ WHITEPAPER

Future Challenges in Logistics and Supply Chain Management

# LOGISTIK IT IM WANDEL

**EINBINDUNG DEZENTRALER IT-STRUKTUREN  
AM BEISPIEL EINES CYBERPHYSISCHEN  
PRODUKTIONSSYSTEMS (CPPS)**



## ■ WHITEPAPER

# LOGISTIK IT IM WANDEL

Die Logistik IT befindet sich im Wandel. Haben früher große, monolithische Softwaresysteme die Gesamtprozesse im Lager, dem Unternehmen und der Supply Chain gesteuert, so werden diese in den letzten Jahren immer häufiger durch eine Vielzahl modularer Softwarepakete ergänzt und abgelöst. Schlüsselemente auf dem ShopFloor sind dabei cyberphysische Systeme (CPS), die autonom agieren, dezentral entscheiden und somit das jeweils aktuelle Optimum anstreben [1]. Das vorliegende Whitepaper betrachtet die Anforderungen, welche aus einem autonom agierenden Fertigungsumfeld an über- und unterlagerte IT-Systeme entstehen und zeigt Handlungsfelder für die Integration eines cyberphysischen Produktionssystems (CPPS) in die Unternehmensarchitektur auf.

## Future Challenges in Logistics and Supply Chain Management

Die Schriftenreihe »Future Challenges in Logistics and Supply Chain Management« greift aktuelle Herausforderungen auf, beleuchtet Trends und fokussiert neuartige Technologien und Geschäftsmodelle.

Die verschiedenen Ausgaben der Schriftenreihe zeichnen das Zukunftsbild einer innovativen Branche, das von Forschung und Praxis gestaltet und gelebt wird.

### Autoren

Haci Bayhan, FLW  
Dietmar Ebel, Fraunhofer IML  
Timo Erler, Fraunhofer IML  
Lorenz Kiebler, Fraunhofer IML  
Kira Schmeltzpfenning, Fraunhofer IML  
Robert Schulze Forsthövel, FLW

### Internet

Das Whitepaper steht Ihnen auch im Internet unter [www.leistungszentrum-logistik-it.de/](http://www.leistungszentrum-logistik-it.de/) sowie unter [www.warehouse-logistics.de](http://www.warehouse-logistics.de) zur Verfügung

### Herausgeber

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel  
Prof. Dr. Michael Henke  
Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

### Kontakt

Fraunhofer-Institut für Materialfluss  
und Logistik IML  
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2–4  
44227 Dortmund  
[schriftenreihe@iml.fraunhofer.de](mailto:schriftenreihe@iml.fraunhofer.de)



## LOGISTIK IT IM WANDEL

# Einbindung dezentraler IT-Strukturen am Beispiel eines cyberphysischen Produktionssystems (CPPS)

<b>Logistik IT im Wandel</b> . . . . .	<b>1</b>
Variable Prozesse erfordern eine modulare IT-Infrastruktur . . . . .	3
Daten werden zunehmend wichtiger in einer vernetzten Industrie . . . . .	4
Dynamische Veränderungen durch dezentrale Entscheidungsfindung ermöglichen . . . . .	5
<b>Anwendungsfall CPPS – Einbindung einer dezentral gesteuerten Produktion in die Unternehmensarchitektur</b> . . . . .	<b>6</b>
Herausforderungen an die Unternehmensarchitektur . . . . .	8
Herausforderungen und Potenziale der Anbindung des CPPS an ein WMS . . . . .	10
Herausforderungen und Potenziale der Verbindung eines dezentralen CPPS mit einem zentralen ERP-System . . . . .	12
<b>Ausblick</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>16</b>



# Logistik IT im Wandel

Die heute in Handels- und Industrieunternehmen stark verbreiteten klassischen IT-Systeme basieren größtenteils auf zentralen Planungsansätzen. Sie folgen Konzepten, welche möglichst alle Funktionen und Prozesse in einem System an einer Stelle integrieren, sodass monolithisch konzipierte und auf zentralen Daten und Entscheidungen basierende Planungs- und Steuerungssysteme entstehen. Im Rahmen der Unternehmens-IT-Infrastruktur werden verschiedene IT-Systeme miteinander zu einer ganzheitlichen Unternehmensarchitektur verbunden. Von der strategischen Planung bis zur operativen Steuerung auf dem Shop Floor sind alle wertschöpfenden und unterstützenden Prozesse in verschiedene Software-Lösungen integriert und relativ starr gesteuert.

Enterprise Resource Planning Systeme (ERP-Systeme) als Basis der Unternehmens-IT-Architektur bündeln Stammdaten, Kundenaufträge und die verschiedenen Unternehmens-Ressourcen und verknüpfen die physischen Prozesse mit der Finanzbuchhaltung und dem Controlling. Expertensysteme wie Warehouse Management Systeme (WMS) oder Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS) beherrschen auch komplexere Teilanwendungsgebiete in einzelnen Unternehmensfeldern wie dem Lagermanagement, der Bedarfsermittlung oder der Produktionsplanung. Zusammengehalten werden diese verschiedenen Systeme über Schnittstellen und starr definierte Planungsprozesse. Diese – auch als Automatisierungspyramide bezeichnete – hierarchische Struktur der Unternehmens-IT über die verschiedenen Ebenen und Aufgaben hinweg basiert auf zentralen oder hierarchischen Entscheidungsprozessen. Die in die Zukunft gerichteten Pläne werden aufeinander abgestimmt und längerfristig verfolgt.

Durch sich verändernde Kundenanforderungen, kürzere Produktlebenszyklen, schnelle Fortschritte der potenziell eingesetzten Technologien und sich verändernde, nicht beeinflussbare externe Umweltfaktoren wandeln sich jedoch Geschäftsmodelle und die Anforderungen an Unternehmen, Produkte und Dienstleistungen [2, 3]. Dies führt unmittelbar auch zu einem Veränderungsdruck auf die internen Unternehmensprozesse sowie die hier eingesetzten IT-Systeme und deren Infrastruktur.

---

Eine vollständige Auflösung der bestehenden Automatisierungspyramide, wie sie häufig prognostiziert wurde und wird [4, 5], wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht als kurz- bis mittelfristiges Zielbild gesehen. Vielmehr ist aus Sicht der Autoren abzusehen, dass sich die IT-Landschaft zukünftig an den Wertschöpfungsprozessen des Unternehmens ausrichtet. Dies hat für das Beispiel eines CPPS die Folge, dass die strategische, normative Planungsebene übergeordnet und zentral organisiert weiterbesteht, während der operative und echtzeitnahe Planungsbereich für die Steuerung der einzelnen Wertschöpfungsströme durch Unternehmen und übergreifende Supply Chains in dezentralen Systemen organisiert wird.

---

Durch autonom agierende cyberphysische Systeme (CPS), welche auf Basis der ihnen lokal zur Verfügung stehenden Daten Entscheidungen treffen, werden Maschinen genauso wie Produkte oder Ladungsträger digital repräsentiert und gemeinsam möglichst abgestimmt und intelligent orchestriert. [6]

Während somit die aktuell eingesetzten monolithischen ERP-Systeme und WMS im Rahmen des zentral geplanten, normativen Bereichs auch in Zukunft weiter für das übergeordnete Management der globalen Unternehmensstrategie, die Interaktion mit Supply Chain Partnern, das übergeordnete Auftragsmanagement und auch die Lager- und Bedarfsplanung zuständig sein werden, muss die Verbindung dieser zu der dezentralen und sich selbst anhand vorgegebener Zielsetzungen steuernden Systemwelt hergestellt werden. Über- oder untergeordnete IT-Systeme, welche die Wissensbasis über Bestände, über Auftragspools und deren Verknüpfung mit den finanzbuchhalterischen Kennzahlen der Unternehmenssteuerung verbinden, müssen sowohl Informationen in diese dezentralen Systeme kommunizieren als auch Statusmeldungen, Informationen und Daten erhalten können. Die übergeordneten IT-Systeme bleiben somit vorerst weiterbestehen, geben nur bestimmte Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten in dezentrale Systeme ab. Hierbei besteht die Herausforderung vor allem darin, die bestehenden Planungsgütern, Informationsbedarfe und internen Abstimmungen weiterhin auch ohne die alles umfassende zentrale Steuerung beibehalten oder ähnlich neu erreichen zu können.

## Variable Prozesse erfordern eine modulare IT-Infrastruktur

Mit dem Grundsatz von Henry Ford (1913) »People can have the Model T in any colour as long as it's black.« lassen sich Konsumenten heutzutage nicht mehr zufriedenstellen. Produkte und Services müssen maßgeschneidert auf den Endkunden passen. Steigende Marktanforderungen an die Dynamik und die Flexibilität von Unternehmen in Bezug auf Produktvielfalt, Lieferfähigkeit, Verfügbarkeit und auch immer stärker an die Robustheit gegenüber ungeplanten Ereignissen führen zu einer Steigerung der Komplexität von Prozessen und Produkten [5, 7]. Es entsteht eine hohe Bandbreite an Prozessen in der Logistik. Die Ausnahme wird zum Standard und die Steuerung der Prozessvarianz und -dynamik wird zu einer Mammutaufgabe für bestehende IT-Systeme.

Dabei kommen auf die IT-Systeme insbesondere zwei große Herausforderungen zu:

1. Die Notwendigkeit echtzeitnahe Entscheidungen zu treffen und
2. Die Abbildung einer großen Anzahl hochspezialisierter funktionaler Anforderungen.

Die abnehmende Verlässlichkeit von Prognosen und die Zunahme von sowohl bekannten als auch unbekanntem Markt- sowie Umweltrisiken führen zu zunehmenden Planabweichungen und damit verbunden zu Umplanungs- und Anpassungsaufwänden [8]. Die aktuell eingesetzten, auf Basis einer möglichst vollständigen Datenbasis möglichst langfristig planenden, IT-Systeme benötigen hierfür immer größere Aufwände in Bezug auf Ressourcen und Zeiten, wobei diese Zeit immer knapper und wertvoller wird. Eine Verringerung der Latenz zwischen Ereignis und der entsprechenden Reaktion fordert neue Prozesse als auch neue grundlegende Technologien und Planungsparadigmen [9].

Zudem erfordern individualisierte Prozesse zunehmend spezialisierte IT-Unterstützung. Immer mehr digitale Services und Apps zur Abbildung individueller Anforderungen drängen auf den Markt (u.a. durch Open Source Communities) und erweitern bestehende IT-Systeme wie WMS, ERP und TMS um notwendige Funktionalitäten. Für den Kunden ist es wichtig, eine Best-of-Breed Lösung zu erhalten, die seine individuellen logistischen Anforderungen abdeckt. Dabei ist es notwendig, dass sowohl der gezielte Einsatz einzelner Module von ehemals monolithischen IT-Systemen wie beispielweise ERP, WMS und TMS als auch die Einbindung kleinerer Systembausteine und dezentral agierender Agenten / Devices ermöglicht wird.

## Daten werden zunehmend wichtiger in einer vernetzten Industrie

Prozesse werden variabler und die IT-Infrastruktur modularer und vernetzter. Ein wesentlicher Baustein für die digitale Transformation sind die Daten. Die Daten repräsentieren die reale Welt auf IT-Ebene. Im vorherigen Absatz ist beschrieben, wie die Grenzen in Folge der immer variableren Prozesse zwischen den IT-Systemen aufweichen. IT-Systeme orientieren sich nicht mehr an statischen Bereichen des Unternehmens, sondern an den dynamischen Wertschöpfungsketten. Eine solche systemübergreifende Zusammenarbeit ist nur dann möglich, wenn die Daten zwischen den Prozessschritten einheitlich ausgetauscht werden können. Ein Ansatz in diese Richtung beschreibt das Projekt »Logistics Mall« mit den Geschäftsobjekten für die Logistik [10, 11].

Die Datenlandschaft in der monolithischen Welt der IT-Systeme ist eine stark heterogene. Für die Realisierung einer effizienten und zielgerichteten Wertschöpfungskette ist eine zunehmende Homogenisierung der Daten erforderlich [12]. Das Verständnis der Daten muss über die Bereiche und Prozesse einheitlich sein. Für diese Herausforderung ist eine zentrale Datenarchitektur erforderlich, welche eng in die Unternehmensarchitektur eingebettet ist. So inkludiert das »The Open Group Architecture Framework« die Datenarchitektur als einen Eckpfeiler der Unternehmensarchitektur [13].

Der Weg zum Ziel einer zentralen und einheitlichen Datenarchitektur ist das Datenmanagement. Das Datenmanagement beschreibt alle Tätigkeiten zur Orchestrierung der Daten entlang der Wertschöpfungsprozesse [14]. Zur Sicherstellung eines gemeinsamen Verständnisses sind ein Metadaten-Management sowie ein Datenqualitätsmanagement wichtige Aspekte des Datenmanagements [15]. Eine einheitlich verständliche Datenarchitektur führt zu einer schnittstellenübergreifenden Kommunikation und ermöglicht so weitere Optionen, wie Datenanalysen und dezentrale Entscheidungsfindungen.

## Dynamische Veränderungen durch dezentrale Entscheidungsfindung ermöglichen

Die Dezentralisierung der Planungs- und Steuerungsprozesse stellt eine Möglichkeit dar, die stetig steigende Komplexität zu beherrschen, indem das Optimierungsproblem in kleine Teilprobleme zerlegt wird, welche von verteilten und intelligenten Aufträgen und Fertigungs- oder Transportressourcen in dezentralen Kontrollsystemen selbstgesteuert gelöst werden können [16]. Denn das volatile Produktionsumfeld führt dazu, dass es keine dauerhafte ideale Produktionsreihenfolge mehr gibt. Kunden wünschen sich immer individuellere Produkte und somit steigt die Komplexität der Prozesse innerhalb der Produktion. Die gesamte Produktion muss sich den äußeren Umständen anpassen und auf kurzfristige Veränderungen reagieren können [17, 18]. Diese zunehmende Komplexität ist mit zentralen Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS) nicht mehr handhabbar, sie stoßen an ihre Grenzen [19, 20]. Autonom agierende cyberphysische Systeme (CPS) bieten dagegen eine Lösung. Sie sind über das Internet der Dinge und Dienste vernetzt und können miteinander kooperieren [1, 21]. Durch ihren hohen Grad an Mobilität, Kompatibilität und Universalität sind sie für den Einsatz bei sich wandelnden Anforderungen geeignet [21, 16]. Konzepte der Selbststeuerung bieten mögliche Ansatzpunkte, um die bestehende Komplexität zu minimieren und beherrschbar zu machen. Denn sie beruhen auf der Verlagerung von zentraler Planung und Steuerung hin zu einer Vielzahl dezentraler Lösungsfindungsprozesse zwischen Systemkomponenten [22, 23, 24]. Die Aufgaben der PPS werden auf die autonomen CPS, die sich zu einem cyberphysischen Produktionssystem (CPPS) zusammensetzen, verteilt. Diese können Entscheidungen dezentral und unter Berücksichtigung der lokalen Situationen treffen.

Wenn in einem Teilsystem Änderungen neue Anforderungen oder Ausfälle auftreten, dann können die betroffenen CPS autonom die Prozesse den geänderten Gegebenheiten anpassen. Es ist keine zentrale Neukonfiguration des Systems mit ggf. benötigten Stillstandzeiten oder manuellem Eingreifen nötig. Auf diese Weise kann auch auf globale und komplexe Änderungen und Probleme verteilt und effizient reagiert werden. Die Lösung von Problemen mit Hilfe der verteilten Problemlösung bietet sich vor allem an, wenn sich das globale Problem in Teilprobleme aufteilen lässt, die parallel und voneinander losgelöst betrachtet werden können.

---

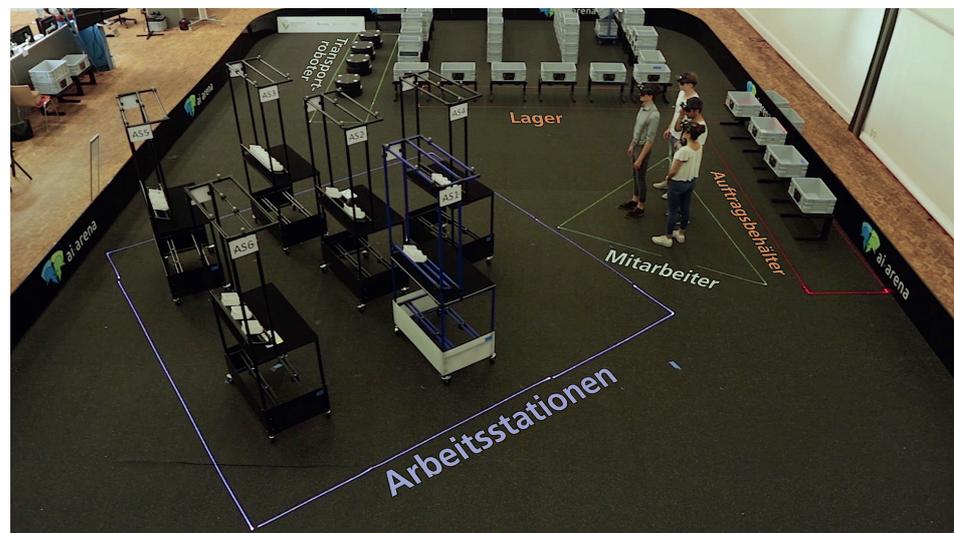
»Das Maß der Dezentralisierung und Selbstorganisation wächst mit der Komplexität der (logistischen) Systeme.« [6]

---

## Anwendungsfall CPPS – Einbindung einer dezentral gesteuerten Produktion in die Unternehmensarchitektur

Das Leuchtturmprojekt »Innovationslabor: Hybride Dienstleistungen für die Logistik« geht durch die Entwicklung und Realisierung eines solchen funktionierenden CPPS mit gutem Beispiel voran und dient als Prototyp für zukünftige Anwendungsbereiche in der industriellen Praxis (siehe Abbildung 1). Während die möglichen Ausführungsformen und Funktionen variabel und unterschiedlich sein können, sind die nötigen Anforderungen und Schnittstellen an übergeordnete und angrenzende Systeme dabei exemplarisch für die Einbettung in reale praktische Anwendungsbereiche.

Abbildung 1  
Ausschnitt der realen  
Versuchsproduktions-  
umgebung innerhalb  
des lehrstuhleigenen  
Forschungszentrums



Das im Forschungszentrum erforschte CPPS ist für die Anwendung in innerbetrieblichen Produktionsumgebungen mit diskreter Fertigung gedacht, welche sich durch ein hohes Maß an Freiheitsgraden bezüglich Steuerungsentscheidungen hervorheben. Diese Ausgangssituation bildet das Fundament für die Steigerung der Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit, die zu den primären Zielen bei der Entwicklung des CPPS im Forschungszentrum zählt. Da vor allem mit Rücksicht auf die Logistik starre Wertschöpfungsketten kontraproduktiv wären, wird infolgedessen von der Basis-Produktionsumgebung die Fähigkeit zur freien und ungerichteten Verkettung der Arbeitsstationen (ASs) gefordert. Folglich ermöglicht dieses Vorgehen ein produktabhängiges, hochdynamisches Routing von Production Orders. Damit

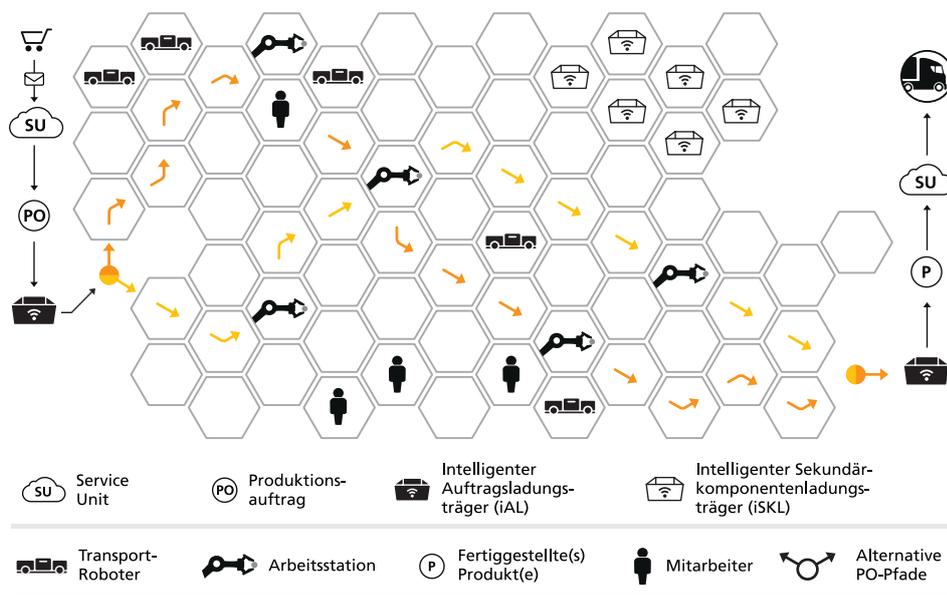


Abbildung 2  
Basis-Produktions-  
umgebung [25]

die Routing-Flexibilität erhöht werden kann, ist der Einsatz von jeweils mehreren Arbeitsstationen mit identischen Prozessfähigkeiten innerhalb der Basis-Produktionsumgebung vonnöten. Auf diese Weise sind gewisse Freiheitsgrade auf der strukturellen, physischen Ebene der Basis-Produktionsumgebung erzeugt. Durch Anpassungen von Informationsstrukturen sollten zusätzliche Freiheitsgrade intendiert werden, sodass Arbeitsvorgänge (AVs) nicht länger in klassischen Arbeitsplänen sequenziell aneinander zu reihen sind. Alternativ sind die Reihenfolgebedingungen der Arbeitsvorgänge zur Herstellung einer spezifischen Produktvariante mithilfe von einem Vorranggraphen (VG) zu erfassen. Die Entscheidungsalternativen in Bezug auf mögliche Arbeitsvorgangs-Reihenfolgen bzw. -Sequenzen sind hier hervorzuheben. Sie erhöhen so die Summe der möglichen Pfade, auf denen eine Production Order durch ein gegebenes Produktionssystem geführt werden kann. Dabei müssen Vorranggraphen im Einsatz des CPPS je Knoten Stücklisteninformationen, die Angabe des Zeitintervalls, das voraussichtlich zur Abarbeitung eines Arbeitsvorgangs benötigt wird, sowie einen Bewertungsreferenzwert beibehalten. Dieser Bewertungsreferenzwert wird genutzt, um die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Routing-Alternativen sicherzustellen und ist in diesem Zusammenhang elementar im Routing-Prozess einer Production Order durch die Produktionsumgebung [25]. Abbildung 2 stellt exemplarisch eine Basis-Produktionsumgebung unter Berücksichtigung ihrer charakteristischen Eigenschaften dar. Die Abbildung beinhaltet alle Entitäten der Basis-Produktionsumgebung. Neben der Struktur der Waben, die die freie und ungerichtete Verkettung der Arbeitsstationen abbildet, werden mit Hilfe der Pfeile innerhalb einzelner Waben dargestellt, auf welchen Pfaden eine bestimmte Production Order auf Grundlage des entsprechenden Vorranggraphen durch die Basis-Produktionsumgebung gelenkt werden kann.

## Herausforderungen an die Unternehmensarchitektur

Der zuvor beschriebene Anwendungsfall zeigt den Handlungsbedarf in der Domäne der Unternehmensarchitekturen. Die IT-Landschaft wandelt sich von einem statischem Closed-World-Szenario hin zu einem dynamischem Open-World-Szenario [26]. Diese Transition fußt auf den neuen Anforderungen der Geschäftsfelder. Am Beispiel des CPPS lassen sich die folgenden Herausforderungen an die Unternehmensarchitektur ableiten:

Abbildung 3  
Herausforderungen an die  
Unternehmensarchitektur  
für ein CPPS

-  Integration von Mensch und Maschinen
-  Vernetzte und dezentrale Infrastruktur
-  Datenzentrierter und serviceorientierter Ansatz
-  Business Ecosystems: Unternehmensübergreifende Vernetzung
-  Agile und dynamische Weiterentwicklung

### INTEGRATION VON MENSCH UND MASCHINEN

Das Beispiel der CPPS zeigt die notwendige enge Kollaboration von Mensch und Maschine in den Wertschöpfungsketten. Klassische Unternehmensarchitekturen sehen den Menschen als Nutzer der IT-Systeme und Maschinen als Werkzeug zur Umsetzung. Der Fokus der Unternehmensarchitektur liegt auf den IT-Systemen. Dynamische Systeme, wie das CPPS, erfordern, dass Mensch und Maschine in die Unternehmensarchitektur integriert werden. Mensch, Maschine und IT-Systeme bilden ein Dreieck, um die dynamischen Aufgaben des Geschäftsprozesses abbilden zu können.

### VERNETZTE UND DEZENTRALE INFRASTRUKTUR

Die Verlagerung des Fokus von IT-Systemen hin zu dem Dreieck aus Mensch, Maschine und IT-Systemen, erfordert eine intensive Vernetzung der Infrastruktur. Diese Herausforderung wird durch die Dezentralisierung verstärkt. Das CPPS fertigt produktorientiert. Dies bedeutet, dass eine Vielzahl von Arbeitsstationen, Maschinen und Menschen vernetzt agieren und auf Bedarf der Fertigungsanforderungen skalieren müssen. Diese Skalierung hat zur Folge, dass die Infrastruktur nicht nur vernetzt, sondern auch verteilt sein muss. Die Unternehmensarchitektur muss der verteilten und vernetzten Infrastruktur Sorge tragen, um eine dynamische und skalierbare Wertschöpfungskette abbilden zu können.

## **DATENZENTRIERTER UND SERVICEORIENTIERTER ANSATZ**

Daten spielen in der zunehmenden Digitalisierung und somit auch in der Unternehmensarchitektur eine zentrale Rolle im Unternehmen [27]. Die Datennutzung ist nicht mehr auf ein IT-System begrenzt, sondern orientiert sich an den Geschäftsprozessen und verlangt nach einem grenzübergreifenden Standard zwischen IT-Systemen und Maschinen. Dieses gemeinsame Verständnis von Daten ist nicht nur für die Technologie wichtig, sondern auch für den Menschen. Die Unternehmensarchitektur ist dafür verantwortlich, dass dieser gemeinsame Standard für alle Beteiligten des oben beschriebenen Dreiecks verfügbar ist.

Neben dem datenzentrierten Ansatz zeigt das Beispiel des CPPS eine weitere Anforderung auf: Die produktorientierte Fertigung über verteilte Stationen verlangt die Daten zielgerichtet. Das CPPS ist kein abgeschlossenes System, welches zentrale Eingabe-Daten erwartet und ein Ergebnis zurückspielt. Innerhalb der Wertschöpfungskette werden punktuell Dienste benötigt, die Daten verarbeiten, um das Ziel zu erreichen. Die Unternehmensarchitektur muss diesen Service-Gedanken integrieren. Monolithische IT-Systeme können dieser Anforderung nicht mehr gerecht werden [28].

## **BUSINESS ECOSYSTEMS: UNTERNEHMENSÜBERGREIFENDE VERNETZUNG**

Die drei zuvor genannten Herausforderungen beschreiben das unternehmensinterne Verhalten. Doch weder die Digitalisierung noch die Wertschöpfungsketten enden an der Unternehmensgrenze. Die Vernetzung der Unternehmen zeigt sich ebenfalls am Beispiel des CPPS. Informationen über den Produktionsstand z.B. können nicht nur für das eigene Unternehmen, sondern auch für Transportdienstleister oder Kunden (bzw. Partner) interessant sein. Gezielte Zugriffe auf Daten und Dienste können es ermöglichen, dass Unternehmen effizienter kollaborieren und die Vorteile der flexiblen Fertigung eines CPPS steigern können. Aus dieser Herausforderung lässt sich folgern, dass die Unternehmensarchitektur nicht an der Unternehmensgrenze endet, sondern eine Kollaboration ermöglicht. Dieser Schritt benötigt die Berücksichtigung weiterer Anforderungen in Bezug auf Datensicherheit und Datensouveränität [29].

## **AGILE UND DYNAMISCHE WEITERENTWICKLUNG**

Während die ersten vier Herausforderungen auf Eigenschaften des CPPS-Beispiels basieren, richtet sich diese Herausforderung an die Verwaltung der Unternehmensarchitektur. Systeme, wie das CPPS, sind nicht statisch in ihrer Entwicklung. Dienste

werden ausgetauscht, zusätzliche Technologien werden integriert und Prozessschritte werden optimiert. Diese Veränderungen erfolgen agil und den Bedürfnissen der Wertschöpfungskette untergeordnet. Dies hat zur Folge, dass auch die Unternehmensarchitektur keine statische mehr sein kann. Die Entwicklung der Unternehmensarchitektur muss folgerichtig einem agilen und dynamischen Vorgehensmodell folgen [30].

Die zuvor beschriebenen Herausforderungen zeigen die notwendige Transition der Unternehmensarchitektur im Allgemeinen auf. Im Folgenden werden Herausforderungen an konkrete IT-Systeme (am Beispiel von WMS und ERP) innerhalb der IT-Landschaft eines Unternehmens detailliert.

## Herausforderungen und Potenziale der Anbindung des CPPS an ein WMS

Das dargestellte cyberphysische Produktionssystem setzt seine Betrachtungsgrenzen mit dem Start sowie dem Abschluss eines Produktionsauftrages auf dem Shop Floor. Hierfür werden in der prototypischen Umsetzung einige Annahmen getroffen, die in der industriellen Praxis mit Hilfe der umgebenden IT-Infrastruktur zunächst noch geschaffen werden müssen.

### KONTINUIERLICHER UND ECHTZEITNAHER AUSTAUSCH DER BESTANDSINFORMATIONEN

Im Hinblick auf die Bestandsinformationen werden in dem vorliegenden CPPS-Szenario sortenrein beladene, intelligente Sekundärkomponenten-Ladungsträger (iSKL) vorausgesetzt. Diesen wird einmalig zum Aufsetzen des Szenarios die Materialnummer und Menge der in Ihnen enthaltenen Materialien bekannt gegeben. In der Praxis muss die Information der einzelnen Behälter über den aktuellen Bestand automatisiert erfolgen. Zudem müssen Entnahmen und Zuführungen von Materialien zu einem Behälter in Echtzeit erfasst und gebucht werden.

Abbildung 4  
Bestandsinformationen in den Systemebenen

	Administrationsebene	ERP	Gesamtbestandsübersicht (Materialnummer und Menge)
	Prozessebene	WMS	Gesamtbestandsübersicht und Bestandsübersicht auf Lagerplatzebene (Materialnr. u. Menge pro Lagerplatz)
	Steuerungsebene	CPPS	Bestand pro Behälter (Materialnummer und Menge pro Behälter)

Die Bestandsverwaltung auf Lagerplatz- und somit auch auf Behälterebene liegt in der Regel in der Verantwortung eines Warehouse Management Systems (WMS). Während das ERP-System einen Überblick über den Gesamtbestand eines Materials im Unternehmen bietet (Materialnummer & Menge), kennt das WMS jeden einzelnen Bestandsquant mit Materialnummer, Menge und unter Umständen weiteren identifizierenden Merkmalen (z.B. Chargennummer, MHD, Seriennummer). Ein kontinuierlicher und echtzeitnaher Austausch der Bestandsinformationen zwischen WMS und CPPS ist daher unerlässlich. Dabei sind insbesondere die folgenden Prozesse betroffen:

- Wareneingang
- Lagerinterne Umlagerungen
- Produktionsversorgung
- Warenausgang



Abbildung 5  
Exemplarischer Prozessablauf im Wareneingang unter Einbindung des CPPS

## DYNAMISCHE RESERVIERUNGSLOGIKEN

Neben den Informationen über die Bestandshöhe im Behälter ist zudem die korrekte Reservierung der Bestände für die durch das CPPS gesteuerte Produktion von entscheidender Bedeutung. Anders als in einem rollierend planenden Manufacturing Execution System (MES) ändern sich die Prioritäten und Zeitpunkte der Bedarfe in der durch das CPPS gesteuerten Produktion permanent. Es entsteht eine hochdynamische Bedarfssituation für das Lager, welche flexibler und ebenfalls sehr dynamischer Reservierungslogiken im WMS bedarf.

## ECHTZEITNAHE BEDARFSAUSLÖSUNG

Das CPPS Szenario geht vereinfacht von einer jederzeit bestehenden Verfügbarkeit der benötigten Materialien aus. Die benötigte frühzeitige Bedarfsauslösung zur Erfüllung heute üblicher Wiederbeschaffungszeiten steht jedoch im direkten Gegensatz zu der dynamischen Planung durch das CPPS. Die Gewährleistung der Materialverfügbarkeit im CPPS Szenario stellt daher noch große Herausforderungen dar. Es müssen unternehmensübergreifende Nachschubstrategien geschaffen werden, die ad hoc auf Bedarfe aus der Produktion reagieren können. Hierfür ist eine informatorische Vernetzung der Supply Chain Partner untereinander unabdingbar. Methoden wie Lieferanten-Kanban oder Vendor Managed Inventory (VMI) könnten hierbei unterstützen. Wertschöpfungsnetzwerke in denen nicht nur ein Lieferant

manuell auf Bestellanfragen reagiert, sondern wiederum viele verschiedene Softwareagenten verschiedener Lieferanten und Werke echtzeitnah auf Lieferanfragen antworten stellen Ansätze dar, der dynamischen Bedarfssituation auch über die Unternehmensgrenzen hinweg zu begegnen.

---

Um eine Ad-hoc Bearbeitung von Kundenaufträgen im CPPS zu ermöglichen, muss auch die dahinterstehende Lieferkette dezentral und echtzeitnah agieren. Startpunkt ist das unternehmenseigene ERP-System, welches befähigt werden muss, eigenständig Entscheidungen zu treffen und Bestellungen unmittelbar auszulösen.

---

## Herausforderungen und Potenziale der Verbindung eines dezentralen CPPS mit einem zentralen ERP-System

In der beschriebenen CPPS-Planungsumgebung besitzen Aufträge bereits Wissen über Bearbeitungszeiten, eventuelle Vorranggraphen, Stücklisteninformationen und weitere Auftragsinformationen. All diese Informationen liegen aktuell in Modulen von ERP-Systemen oder in eingesetzten Expertensystemen wie PPS-Systemen. Der Ort der Informationshaltung muss hier eindeutig festgelegt sein, um Redundanzen und Versionskonflikte zu vermeiden. Verantwortlichkeiten, Aktualisierungsregelungen und Echtzeitnähe der Datenweitergabe müssen im Rahmen der Schnittstellenspezifikation zwischen Service Unit des CPPS und ERP-System festgelegt werden.

Ein grundlegender Unterschied zwischen der klassischen, zentralen Auftrags- und Produktionsplanung in ERP- oder PPS-Systemen und des im CPPS dargestellten dezentralen Planungsansatzes liegt in der Langfristigkeit der Planung. Im klassischen zentralen Planungsfall wird, unter bestmöglicher Einbeziehung von bekannten Unsicherheiten, ein möglichst vorausschauender Plan für die Zukunft entwickelt. Durch diesen in die Zukunft festgeschriebenen Plan lassen sich Kapazitätsauslastungen und Auftragsstatus zu bestimmten Zeitpunkten – zumindest theoretisch – vorhersagen. Weitere Planungen können so abgeleitet und wechselseitige Einflüsse oder Engpässe identifiziert werden. Die dezentrale CPPS-Planung basiert auf reaktiven Ansätzen, welche auf Basis von ad-hoc Entscheidungen eine möglichst reaktive und dynamische Planung realisieren sollen. Die einzelnen Entscheidungsentitäten verfolgen lokale Ziele und nutzen die ihnen zur Verfügung stehenden lokalen Informationen. Hierdurch entsteht eine Kurzsichtigkeit in der Planerstellung, wodurch keine Prognosen möglich sind.

Ein Einsatz der dezentralen Planungsansätze und die damit einhergehende Anpassung der zentralen IT-Architekturen führt auch in Bezug auf die Konzeption der Zusammenarbeit mit dem ERP-System – dem weiterhin zentralen IT-System der Planung und Steuerung von Unternehmensressourcen und -informationen – zu großen Herausforderungen. Beispielhaft werden folgend Herausforderungen aus den Bereichen der allgemeinen Auftragssteuerung, der Mitarbeiterplanung, der Instandhaltungsplanung und dem Beschaffungswesen dargestellt:

### **KUNDENKOMMUNIKATION UND AUFTRAGSANNAHME**

Direkt zu Beginn der Auftragsanfrage und -übermittlung von einem Kunden erwartet dieser eine Bestätigung oder Korrektur der angefragten Fertigstellungszeitpunkte. Eine solche, bisher auf Basis einer in die Zukunft prognostizierten Kapazitätsauslastungen basierende, Zu- oder Absage ließe sich aufgrund der Kurzfristigkeit der dezentralen Planung nicht unmittelbar tätigen. Da kein langfristiger Maschinenbelegungsplan durch die kurzfristigen Planungshorizonte entsteht, müssen neue Abstimmungsformen mit Lieferanten ausgearbeitet oder neue Prognosemöglichkeiten entwickelt werden.

### **HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE MITARBEITERPLANUNG**

Die Planung der Mitarbeiter, welche durch ihre begrenzten Kapazitäten auch in der nicht vollständig automatisierten Wertschöpfung weiterhin als Engpass wirken, kann nicht mehr langfristig anhand der Produktionsplanung durchgeführt werden. Stattdessen müssen in der Theorie auch die Mitarbeiter anhand der dynamisch entstehenden Pläne eingesetzt und zugeteilt werden. Dies erfordert sowohl in Bezug auf zeitliche als auch fähigkeitsbezogene Gesichtspunkte eine erhöhte Flexibilität von Mitarbeitern und Planungen.

### **FUNKTIONSBEREICH DER INSTANDHALTUNGSPLANUNG**

Häufig wird auch die Instandhaltungsplanung als Bestandteil eines ERP-Systems integriert. Sind keine langfristigen Kapazitätsauslastungen oder Produktionspläne bekannt, ist auch die Planung von (präventiven) Instandhaltungszeitpunkten erschwert. Entweder müssen hier regelmäßig Kapazitäten statisch geblockt werden oder die Instandhaltung an sich muss über Ansätze der prädiktiven – also der intelligenten und zustandsbasierten Wartungsplanung – selbst in einen gewissen Grad der dezentralen Selbststeuerung überführt werden.

## **BESTELLABWICKLUNG UND LIEFERANTENKOMMUNIKATION**

Die bereits im Kapitel der WMS-Herausforderungen beschriebene Herausforderung der Kommunikation mit Lieferanten stellt auch auf der ERP-Systemebene eine Herausforderung dar, da die Bedarfe hier in Anfrage- und Bestellprozessen inklusive der Abbildung der finanzbuchhalterischen Anforderungen umgesetzt werden müssen. Hier müssen neue Konzepte für die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit auf Basis der dezentralen Planungssysteme erarbeitet werden.

Besonders in Bezug auf die Kunden- und Lieferanteninteraktion müssen für eine erfolgreiche Umsetzung der dezentralen Planungs- und Steuerungskonzepte neue Abstimmungs- und Kommunikationsregelungen entwickelt werden. Da die dezentralen Steuerungssysteme gerade für kundenindividuelle Fertigungsumfelder geeignet sind, ist auch der hier häufig sehr viel engere Kundenkontakt im Vergleich zu einer Lagerfertigung explizit mit zu berücksichtigen. Schnell ergeben sich an dieser Stelle auch Herausforderungen der Datensouveränität, da eine erhöhte mögliche Transparenz über Auftragsfortschritte und Ressourcenauslastungen nicht in allen Geschäftsbeziehungen gewünscht sind.

# Ausblick

Um die Vorteile des CPPS auch in der Praxis umfassend zu nutzen, sind ein Umdenken in Management und IT-Ebene sowie eine Anpassung der IT-Infrastruktur notwendig. Der modulare Aufbau der IT-Systemlandschaft eines Unternehmens wird sich in den nächsten Jahren noch stärker durchsetzen und über die Unternehmensgrenzen hinaus zu einer modularen Supply Chain IT-Systemlandschaft zusammenwachsen. Dabei ist es nicht mehr entscheidend, ob eine Funktionalität originär einem ERP, einem WMS oder einem TMS zuzuordnen wäre. Entscheidend ist, dass jedem Unternehmen genau die Kombination an Funktionalitäten zur Verfügung steht, die für ihren Anwendungsfall benötigt wird. Es wird ein Subset an Funktionalitäten entstehen, die für das Unternehmen den größtmöglichen Nutzen bringen. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, dass Funktionalitätsblöcke / Module verschiedener Anbieter sich auf einfache Art und Weise zusammenschließen lassen, um gemeinsam die Best-of-Breed Lösung darzustellen. Themen wie gemeinsame Plattformen, Open Source Lösungen und Schnittstellen müssen in diesem Kontext weiter erforscht, standardisiert und in die industrielle Praxis überführt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Eds.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Hrsg: Springer Vieweg. Fachmedien. Wiesbaden.
- [2] Kersten, W.; Seiter, M.; See, B.; Hackius, N.; Maurer, T. (2017): Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management: Chancen der digitalen Transformation. Hrsg: DVV Media Group GmbH. Hamburg.
- [3] Arndt, H. (2013): Supply Chain Management. Optimierung logistischer Prozesse. Hrsg: Springer Gabler. Lehrbuch. Wiesbaden.
- [4] VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) (2013): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation.
- [5] Bauernhansl, T. (2017): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Handbuch. Hrsg.: Springer Vieweg. Wiesbaden. S. 1-31
- [6] ten Hompel, M.; Henke, M. (2017): Logistik 4.0 – Ein Ausblick auf die Planung und das Management der zukünftigen Logistik vor dem Hintergrund der vierten industriellen Revolution. In: Handbuch Industrie 4.0. Allgemeine Grundlagen. Hrsg.: Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg. S. 247-268
- [7] Koren, Y. (2010): The Global Manufacturing Revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems. Buch. Hrsg.: Wiley. Hoboken, NJ. S. 38
- [8] Christopher, M.; Holweg, M. (2017): Supply chain 2.0 revisited: a framework for managing volatility-induced risk in the supply chain. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 47 (1). Aufsatz in Zeitschrift. Hrsg.: Emerald. S. 2–17.
- [9] Stich, V.; Reschke, J.; Holtkemper, D.; Kraut, A.; Pause, D.; Marek, S. (2020): Digitalisierung der Supply-Chain. In: Logistik - die unterschätzte Zukunftsindustrie. Strategien und Lösungen entlang der Supply Chain 4.0. Buchkapitel. Hrsg.: Springer Gabler. Wiesbaden. S. 17–32.
- [10] Daniluk, D.; Holtkamp, B. (2015): Logistics Mall—A Cloud Platform for Logistics. In: Cloud Computing for Logistics. Buchkapitel. Hrsg.: Springer International Publishing.
- [11] Böhmer, M.; Schmidt, M.; Weißenberg, N. (2015): Seamless Interoperability in Logistics: Narrowing the Business-IT Gap by Logistics Business Objects. In: Cloud Computing for Logistics. Buchkapitel. Hrsg.: Springer International Publishing.
- [12] Das, T. K.; Manas R. M. (2011): A Study on Challenges and Opportunities in Master Data Management. In: International Journal of Database Management Systems 3 (2), Aufsatz in Fachzeitschrift. S. 129–139.
- [13] <https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/>
- [14] Schemm, J. W. (2009): Zwischenbetriebliches Stammdatenmanagement. Business Engineering. Buch. Hrsg.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg.

- [15] Schmidt, A. (2010): Entwicklung einer Methode zur Stammdatenintegration. Buch. Hrsg.: Logos Berlin. Berlin.
- [16] Bischoff, J; Taphorn, C; Hegmanns, T; Prasse, C; Henke, M; ten Hompel, M; Döbbeler, F; Fuss, E; Kirsch, C; Mättig, B. (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- [17] Mößmer, H. E.; Schedelbauer, M.; Günthner, W. A. (2007): Die automobiler Welt im Umbruch. In: Neue Wege in der Automobillogistik. S. 3-15. VDI-Buch. Hrsg.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg.
- [18] Roth, A. (Hrsg.) (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. 1. Aufl. Buch. Hrsg.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg.
- [19] Günthner, W.A. (2010): Fazit. In: Internet der Dinge in der Intralogistik. Buchkapitel. Hrsg.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. S. 349-351.
- [20] Lobo, F.A. (2017): Sind Produktionssysteme bereit für Industrie 4.0?. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (1-2). Zeitschriftartikel. Hrsg.: Carl Hanser Verlag. München. S. 94-97.
- [21] Henke, M.; ten Hompel, M. (2014): Logistik 4.0 In: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Fachmedien. Hrsg.: Springer Vieweg. Wiesbaden. S. 612-624.
- [22] Scholz-Reiter, H.; Rekersbrink, H.; Freitag, M. (2006): Kooperierende Routingprotokolle zur Selbststeuerung von Transportprozessen. In: Industrie Management 22 (3). Zeitschriftartikel. S. 7-10.
- [23] Windt, K.; Böse, F.; Phillip, T. (2008): Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24 (4). Zeitschriftartikel. Hrsg.: Elsevier. S. 572-578.
- [24] Smajic, H. (2007): Agentenbasierte Konfiguration verteilter Steuerungssysteme, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme. Dissertation. Hrsg.: Shaker. Bochum.
- [25] Zeidler, F.; ten Hompel, M. (2019): Beitrag zur Selbststeuerung cyberphysischer Produktionssysteme in der auftragsbezogenen Fertigung. Dissertation. Hrsg.: Praxiswissen. Dortmund.
- [26] Zimmermann, A.; Schmidt, R.; Sandkuhl, K.; Jugel, D.; Bogner, J.; Möhring, M. (2018): Evolution of Enterprise Architecture for Digital Transformation. In: IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Workshop (EDOCW). Konferenzartikel. Stockholm. S. 87-96.
- [27] Otto, B.; Weber, K. (2011): Data Governance. In: Daten- und Informationsqualität. Buchkapitel. Hrsg.: Vieweg + Teubner Verlag. Wiesbaden. S. 277-295.
- [28] Alwadain, A.; Fielt, E.; Korthaus, A.; Rosemann, M. (2016): Empirical insights into the development of a service-oriented enterprise architecture. In: Data & Knowledge Engineering Nr. 105. S. 39-52.
- [29] Otto, B.; ten Hompel, M.; Wrobel, S. (2019): International Data Spaces. In: Digital Transformation. S. 109-128. Hrsg.: Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg.
- [30] Hanschke, S.; Ernsting, J.; Kuchen, H. (2015): Integrating Agile Software Development and Enterprise Architecture Management. In: 48th Hawaii International Conference on System Sciences. Konferenzartikel. Kauai, HI. S. 4099-4108.

