

SmartFactory^{KL} Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen

Whitepaper SF-1.2: 04/2018

smartFactory^{KL}[®]

Inhaltsverzeichnis

Abstract

Die Systemarchitektur für Industrie 4.0-Anlagen (I4.0-Anlagen) dient Anwendern als technologisches Lösungsmuster, um in ihrer diskreten, automatisierten Fließfertigung kundenindividuelle Produkte und eine langfristige Wandelbarkeit zu realisieren. Hierzu beschreibt die Systemarchitektur sowohl aus mechanischer, elektrotechnischer als auch informationstechnischer Sicht Ansätze zur Modularisierung von I4.0-Anlagen und spezifiziert Schnittstellen, mit denen eine herstellerunabhängige Umsetzung möglich ist. Die Systemarchitektur baut auf den Ergebnissen des vorherigen Whitepapers¹ auf und ergänzt diese um neue Bereiche. So werden z.B. die Rolle der Logistik und Modularisierung innerhalb der Fertigungsmodule weiter vertieft. Die Systemarchitektur wurde von der **SmartFactory^{KL}** und deren Partnern erfolgreich in der Praxis umgesetzt und erprobt.

Keywords

Mechatronische Wandelbarkeit; Individualisierte Massenproduktion; Inner- und überbetriebliche Vernetzung; Smart Factory; Industrie 4.0; Modulare Produktion

Autoren

Dennis Kolberg	Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V
Jesko Hermann	Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V
Florian Mohr	Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V

Co-Autoren

F. Bertelsmeier	Phoenix Contact GmbH & Co. KG
F. Engler	EPLAN Software & Service GmbH & Co. KG
R. Franken	IBM
P. Kiradjiev	IBM
M. Pfeifer	TÜV SÜD AG
D. Richter	TÜV SÜD AG
M. Salleem	DENSO Corporation
E. Schibli	Mettler Toledo
P. Staub-Lang	TÜV SÜD AG

1. Einleitung	04
2. Anforderungen	06
3. Architektur	09
4. Instanziierung	24
4.1. Produkt.....	25
4.2. Produktionsebene.....	27
4.3. Integrationsebene.....	32
4.4. IT-Systemebene	34
4.5. Versorgungsebene.....	36
5. Zusammenfassung und Ausblick	39
5.1. Zusammenfassung	39

1 siehe http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/08/SF_WhitePaper_1-1_DE.pdf

1. Einleitung

Der Markttrend zu kürzeren Lebenszyklen und einer höheren Variantenvielfalt bis hin zum kundenindividuellen Produkt stellt neue Anforderungen an die Produktion der Zukunft. Die jüngsten Entwicklungen zeigen, dass es sich bei diesen Megatrends nicht mehr nur um Zukunftsvisionen handelt, sondern sie schon heute relevant sind. Am Beispiel der Automobilindustrie ist dies mit steigenden Konfigurationsmöglichkeiten des PKWs und dem plötzlichen Ab- und Aufschwung von Diesel- und Elektromotoren zu beobachten. Dieser Wandel deckt sich mit den Erfahrungen der Technologie-Initiative **SmartFactory** e.V.. Die Beispiele zeigen, dass die Produktion der Zukunft in der Lage sein muss, sich zukünftig flexibel an heute noch unbekannte Anforderungen anzupassen.

Industrie 4.0 und Digitalisierung sind technologische Ansätze, um die zukünftig immer wichtigere Wandelbarkeit der Produktion zu realisieren. Durch die Dezentralisierung der Steuerungslogik, von einem zentralen System hin zu mehreren, kostengünstigen, kleineren Steuerungen, können Betriebsmittel selbstständig und unabhängig Prozesse ausführen, sowie Prozess- und Zustandsdaten verarbeiten. Die Dezentralisierung von Rechenleistung ermöglicht eine Modularisierung in der Produktion. Damit einhergehend werden nicht nur Umrüstvorgänge verkürzt, sondern auch die Rekonfiguration von I4.0-Anlagen bei neuen Produkten ermöglicht. Die durchgängige Vernetzung unter Verwendung einer gemeinsamen Sprache ist nicht nur die notwendige Voraussetzung für die Maschine-zur-Maschine-Kommunikation, sie schafft auch Transparenz über alle Produktionsprozesse hinweg und ermöglicht spätere Erweiterungen in der Produktion. Sowohl die Modularisierung als auch die durchgängige Vernetzung erfordern eine eindeutige Spezifikation von Schnittstellen, ohne die die Plug&Produce-Idee und zukünftige intelligente Fabriken, die Smart Factories, nicht realisierbar sind¹.

Da es sich bei Produktionsumgebungen um komplizierte Systeme handelt und das Zusammenspiel aus Organisation, Technik und dem Menschen zu komplexen Wechselwirkungen führt, bedarf es bei der Untersuchung der Schnittstellen einer ganzheitlichen Betrachtung aus Sichtweisen unterschiedlicher Domänen. Obwohl die Realisierung von Industrie 4.0 und Digitalisierung in der Produktion individuell zugeschnitten auf die jeweiligen Gegebenheiten und Zielsetzungen erfolgen muss, gibt es wiederkehrende Muster. Eine Systemarchitektur fasst diese Erfahrungen und Muster als Handlungsempfehlung zusammen.

Die im Folgenden vorgestellte Systemarchitektur (Version 2) der **SmartFactory**^{KL}

liefert auf Basis der mehrjährigen Erfahrung im **SmartFactory**^{KL} Partnerkreis Handlungsempfehlungen für die Realisierung modularer, flexibel wandelbarer I4.0-Anlagen. Sie betrachtet dabei die mechanischen, informationstechnischen und versorgungstechnischen Aspekte der Modularisierung und beschreibt Abhängigkeiten und Bausteine zur Realisierung. Als Weiterentwicklung des bestehenden Whitepapers (Version 1) schärft diese Version speziell die Grenzen der Elemente in der Systemarchitektur und vertieft die Rolle der Logistik.

Ferner hilft das Whitepaper, das technische Potenzial der Digitalisierung zur Lösung zukünftiger Produktionsanforderungen richtig einzusetzen. Kapitel 2 leitet zunächst die berücksichtigten Anforderungen her und spezifiziert diese. Kapitel 3 widmet sich anschließend der Architektur und insbesondere der Spezifikation der Schnittstellen. Kapitel 4 beschreibt die Realisierung der Architektur an der Industrie 4.0-Produktionsanlage der **SmartFactory**^{KL}. Im Ausblick in Kapitel 5 wird auf nächste Schritte und Wechselwirkungen zu anderen Konzepten eingegangen.

¹ Weyer, S.; Schmitt, S.; Ohmer, M.; Gorecky, D.: Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production system. INCOM, Ottawa, Canada, 2015

2. Anforderungen

Die **SmartFactory^{KL}** Systemarchitektur zielt darauf ab, zukünftige Entwicklungen einzubeziehen, um alle relevanten Anforderungen an eine I4.0-Anlage zu berücksichtigen. Dabei müssen die folgenden exogenen Trends für die Produktion der Zukunft berücksichtigt werden.

Die vom Markt geforderte steigende Individualisierung von Produkten führt in der Produktion zu immer kleineren Losgrößen und einer noch höheren Variantenvielfalt bis hin zur „Losgröße 1“. Beispiele für die Umsetzung einer kundenindividuellen Fertigung finden sich schon heute bei Adidas² oder mymuesli³. Dafür müssen neue Ansätze zur Materialflussteuerung und zur schnellen Anpassung von automatisierten Anlagen erarbeitet werden.

Der Trend zu immer kürzeren Produktlebenszyklen verstärkt diese Anforderungen. Die Kosten für das (Re-)Engineering und Umrüsten von Anlagen nimmt einen immer größeren Stellenwert ein.

Zuletzt bietet Industrie 4.0 und Digitalisierung in der Produktion vielfältige Potenziale für eine effizientere Produktion. Sinkende Hardwarekosten bei gleichzeitig kleineren Komponenten und höherer Leistung ermöglichen heute die Realisierung von Anwendungen, die sich vor einigen Jahren noch nicht wirtschaftlich umsetzen ließen.



Abbildung 1:
Trends, die die zukünftige
Produktion beeinflussen

Aus diesen drei exogenen Trends ergeben sich drei Zielkriterien, die eine übergreifende Lösung für die dargestellten Herausforderungen erfüllen müssen. Durch eine hohe Produktionsvariabilität lassen sich vielfältigere Produkte herstellen. Eine schnellere Anpassung auf kürzere Lebenszyklen und somit eine höhere Frequentierung von neuen Produkten erfordert eine wandelbare Produktionslinie. Und zuletzt ermöglicht die Vernetzung eine höhere Transparenz und somit eine Analysierbarkeit, die durch immer komplexere Produktionsnetzwerke erforderlich wird.

Aus diesen Zielkriterien werden im Folgenden die Anforderungen an eine Systemarchitektur für Smart Factories definiert. Dabei bezieht sich dieses Whitepaper auf sogenannte „Greenfield“-Anlagen, d.h. neu geplante Anlagen, im Stückgutbereich. In Bezug auf die bestehende herstellerübergreifende Industrie 4.0-Anlage der **SmartFactory^{KL}** wird ein besonderer Fokus auf Modularität und Architektur gesetzt. Die Betrachtung von Safety und Security, sowie deren Einordnung in RAMI 4.0 im Kontext der Systemarchitektur sind hierbei nicht Bestandteil dieses Whitepapers, sondern finden sich in weiteren Publikationen der **SmartFactory^{KL}**^{4,5}.

Zielkriterium 1: Hohe Produktionsvariabilität

Anforderung 1.1: Flexible Fertigungsfunktionalitäten

Die steigende Variantenzahl bis hin zu Losgröße 1 erfordert nicht nur eine Optimierung von Durchlaufzeit, Kosten und Qualität. Auch die Flexibilität der eingesetzten Fertigungstechnologien muss betrachtet werden, da Produktionssysteme nicht mehr nur auf wenige Varianten optimiert werden können. Zudem führt die Nachfrage nach Individualität nicht im gleichen Maße zu einer Steigerung der Preisbereitschaft. Bei vergleichbaren Kosten muss eine I4.0-Anlage eine höchstmögliche Funktionalität in ihren Produktionsfunktionalitäten bieten. Dies erfordert einen universellen Ansatz, der nicht nur die Fertigung von verschiedenen Varianten, sondern prinzipiell auch Produkten ermöglicht. Voraussetzung dafür ist ein schnelles Anpassen der I4.0-Anlage an variierende Parameter und geforderte Funktionalitäten.

Anforderung 1.2: Flexible Fertigungswege

Eine flexible Produktion bedeutet, dass nicht jedes Produkt alle Prozesse bzw. nicht alle Prozesse in einer gleichen Reihenfolge durchläuft. Neben den flexiblen Funktionalitäten erfordert die Produktindividualisierung auch flexible Materialflüsse. Dies bedingt u.a. eine Weitergabe von Informationen zwischen den

² siehe <http://www.adidas.de/personalisieren>

³ siehe <https://www.mymuesli.com>

⁴ http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/08/SF_WhitePaper_2-1_DE.pdf

⁵ http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2018/04/SF_WhitePaper_Safety_3-1_DE_XS-1.pdf

Fertigungsmodulen und eine flexible Anbindung der Logistik.

Zielkriterium 2: Schnelle Wandelbarkeit

Anforderung 2.1: Schnelle Umrüstung und Inbetriebnahme

Die kürzeren Lebenszyklen und kleinere Losgrößen führen zu vermehrten Umrüstvorgängen. Um dennoch wirtschaftlich produzieren zu können, muss die Produktionslinie ein schnelles Umrüsten, einfaches Parametrisieren neuer Anlagenabschnitte und eine automatische Inbetriebnahme ermöglichen. Hierbei ist die zuvor genannte Forderung flexibler Fertigungsfunktionalitäten zu berücksichtigen. Ein weiterer Grund, der eine agile I4.0-Anlage bedingt, sind zukünftige Funktionalitäten bzw. eine skalierbare Erweiterbarkeit, die heute ggf. noch nicht bekannt sind bzw. ist. Dies lässt sich z.B. mittels modularer Bausteine erreichen, die auf standardisierten Schnittstellen beruhen. Bei den Schnittstellen ist auf eine praxisorientierte Auslegung zu achten, die möglichst einfach einen Wechsel und eine Integration erlauben.

Anforderung 2.2 Individuelle Vernetzung von IT-Systemen

Die Umrüstung von physischen Anlagen hat ebenso Einfluss auf die IT-Systeme. Die angebundenen IT-Systeme sind so zu gestalten, dass sie mit geringem Aufwand in bestehende Umgebungen eingebunden werden können. Dem Anwender sollte ermöglicht werden, seine übergeordneten IT-Systeme nach seinem Bedarf zusammenzustellen und diese mit möglichst geringem Aufwand mit anderen IT-Systemen und der I4.0-Anlage zu vernetzen.

Zielkriterium 3: Transparente Produktion

Anforderung 3.1: Durchgehende Weitergabe von Informationen

Die steigende Variantenvielfalt und Umrüstbarkeit der I4.0-Anlage erhöht die Komplexität des Systems. Waren- und Informationsflüsse sind im stetigen Wandel und lassen sich schwer vorhersagen. Um dennoch die Übersicht und Kontrolle zu behalten, muss die I4.0-Anlage die Transparenz von Prozessen ermöglichen. Nur hierdurch ist eine rasche Fehleranalyse und -behebung sowie Optimierung möglich. D.h. alle relevanten Informationen vom Produktionsmodul bis zum IT-System müssen einsehbar sein und je nach Bedarf vorverarbeitet zur Verfügung stehen.

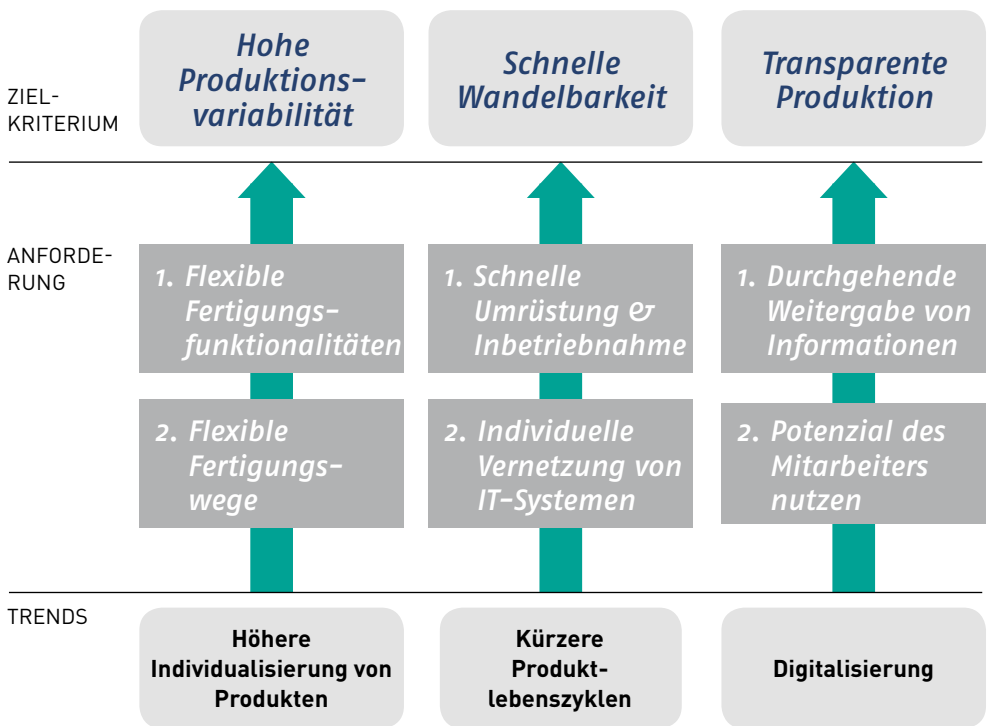
Anforderung 3.2: Potenzial des Mitarbeiters nutzen

Digitalisierung und Industrie 4.0 haben aus der CIM-Ära gelernt. Das Paradig-

ma der menschenleeren Fabrik ist überholt und der Mensch ist ein notwendiger, entscheidender und zentraler Bestandteil der zukünftigen Produktion. Er nutzt seine Stärken wie Erfahrung, Intuition und Flexibilität. Die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine und IT-Systemen erfordert eine durchgehende Weitergabe und Aufbereitung von Informationen in der Produktion. Dies ist die Grundlage dafür, dass der Mitarbeiter in einem komplexen System weiterhin Entscheidungen treffen kann. Umgekehrt wird er in komplexen Produktionsumgebungen durch Assistenzsysteme unterstützt, die seine Arbeit erleichtern.

Aus den Zielkriterien ergeben sich zusammenfassend sechs Anforderungen, die bei der Realisierung einer I4.0-Anlage zu berücksichtigen sind und in die Systemarchitektur einfließen. Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die Abhängigkeiten zwischen den Trends, Zielkriterien und Anforderungen. Sie bildet die Grundlage für die weitere Erarbeitung der **SmartFactory^{KL}** Systemarchitektur, welche im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

Abbildung 2:
Abhängigkeiten zwischen
Trends, Zielkriterien und
Anforderungen



3. Architektur

Die hier vorgestellte Systemarchitektur entwickelt den Architekturansatz einer I4.0-Anlage weiter⁶. Speziell werden hierbei die Möglichkeiten zur Modularisierung innerhalb von Fertigungsmodulen und IT-Systemen, sowie die Rolle der Logistik adressiert. Ergänzend zu diesem konzeptionellen Kapitel beschreibt Kapitel 4 eine praktische Umsetzung der Architektur in der Demonstrationsumgebung der **SmartFactory^{KL}**.

Zur Realisierung einer höchstmöglichen Wandelbarkeit verwendet die Systemarchitektur den Ansatz der Modularisierung. Ein Modul ist ein abstrakter Begriff für ein in sich abgeschlossenes System, welches selbstständig eine Funktionalität anbieten kann. Es ist gekennzeichnet durch klar definierte Schnittstellen und eine Beschreibung der angebotenen Funktionalitäten. Ferner ist anzugeben, aus welcher Klasse der Systemarchitektur es abgeleitet ist. Eine Klasse bezeichnet hierbei einen spezifischen Teil der Systemarchitektur (Abbildung 4).

Im Sinne des „Black-Box“-Ansatzes ist die genaue Realisierung der Funktion im Modul für die Verwendung nicht bekannt, sondern nur die Schnittstelle und deren Nutzung. Die Modularisierung ermöglicht es somit, I4.0-Anlagen flexibel zusammenzusetzen (Abbildung 3) und unterstützt so die Anforderungen nach flexiblen Fertigungsfunktionalitäten und schnellen Umrüstungen (Anforderung 1.1 und 2.1). Die Komplexität reduziert sich und Produktionsprozesse können, ähnlich wie in serviceorientierten Architekturen (SoA), orchestriert werden. Die Module werden hierbei im Sinne des ebenfalls aus der Informatik bekannten Separation of Concerns-Ansatzes, nach welchem für dedizierte Aufgaben dedizierte Lösungen zu erstellen sind, hergeleitet.

Abbildung 3:
Modularer Aufbau einer
I4.0-Anlage

Smarte Fabriken



Smarte Module



Smarte Objekte



Jedes Modul der Systemarchitektur verfügt hierbei, sofern möglich und sinnvoll, über eine eigene Intelligenz. Diese umfasst mindestens die Fähigkeit zur Selbstbeschreibung (z.B. Konfiguration, Stammdaten), bestenfalls aber eine Recheneinheit (z.B. PC oder SPS) zum selbstständigen Handeln. Mit dieser Intelligenz können Module ein schnelles Umrüsten und eine schnelle Inbetriebnahme unterstützen (Anforderung 2.1), indem sie Aktivitäten teilweise selbst durchführen. Auch unterstützt diese verteilte Intelligenz die Umsetzung von komplexen Fertigungsabläufen (Anforderung 1.2).

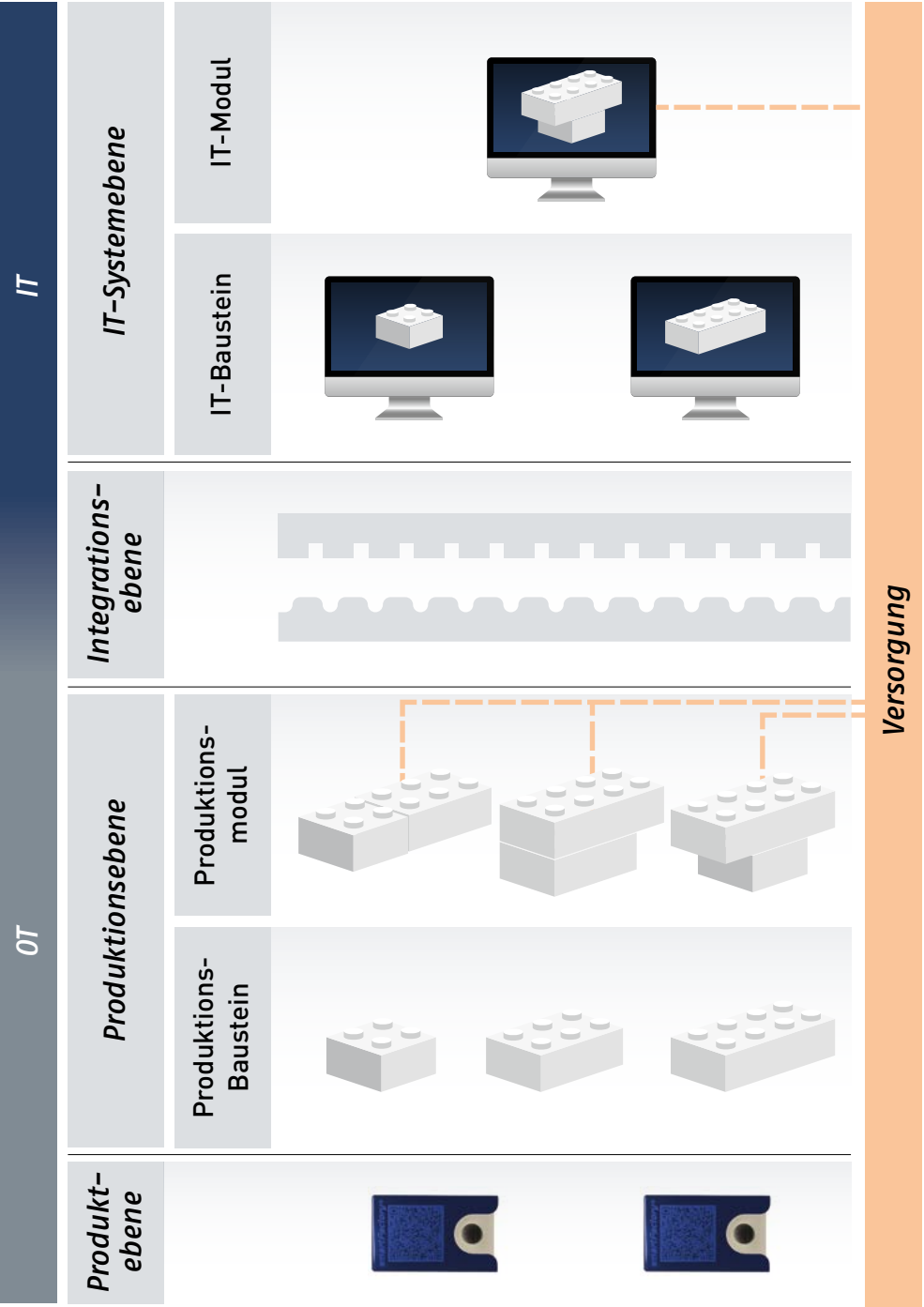
Die Systemarchitektur fokussiert speziell die Beschreibung der Schnittstellen zwischen den Modulen. Wie oben bereits erwähnt, werden Module nach ihrer Funktionalität beschrieben. Im Zusammenhang der Schnittstellenbetrachtung stehen Kommunikationsschnittstellen für den digitalen Austausch im Mittelpunkt, um die Forderung nach individueller Vernetzung und Informationsweitergabe (Anforderung 2.2 und 3.1) gerecht zu werden. Für den physischen Austausch sind die Modulschnittstellen ferner auch aus mechanischer Sicht zu spezifizieren. Die Versorgung der Module ist in einer Versorgungssicht beschrieben. Um das Potenzial des Menschen richtig zu nutzen, beschreiben die Module ferner in der Interaktionssicht den Austausch mit dem Menschen. Die Systemarchitektur spezifiziert Module somit ganzheitlich aus mehreren Sichten in einem „Steckbrief“ (Tabelle 1).

Modulspezifikation	[Name]
Klasse des Moduls	Beschreibung der zugrundeliegenden Klasse (z.B. IT-System, Fertigungsmodul)
Spezifikation „Funktionalität“	Beschreibung der vom Modul angebotenen Funktionalitäten
Spezifikation „Kommunikation“	Beschreibung der (digitalen) Interaktion/ Kommunikation mit der Umgebung (z.B. angebotene Services, verwendete Protokolle)
Spezifikation „Mechanik“	Beschreibung der physischen Interaktion mit der Umgebung (z.B. Übergabepunkte für Vor-material, Abmaß)
Spezifikation „Versorgung“	Beschreibung der notwendigen Versorgung für den Betrieb des Moduls (z.B. Leistungsaufnahme, benötigte Druckluft)
Spezifikation „Interaktion“	Beschreibung der Interaktionsmöglichkeiten mit dem Menschen (z.B. verwendete HMI, Benutzungsoberflächen)

Die **SmartFactory^{KL}**-Systemarchitektur gliedert sich in vier Hauptebenen, welche unterschiedliche Klassen von Modulen gruppieren. Zu diesen Hauptebenen gehören die Produktebene, die Produktionsebene, die Integrationsebene und die IT-Systemebene.

Tabelle 1:
Vorlage zur Spezifikation
von Modulen in der
SmartFactory^{KL}-
Systemarchitektur

Abbildung 4:
Überblick über die
SF-Systemarchitektur



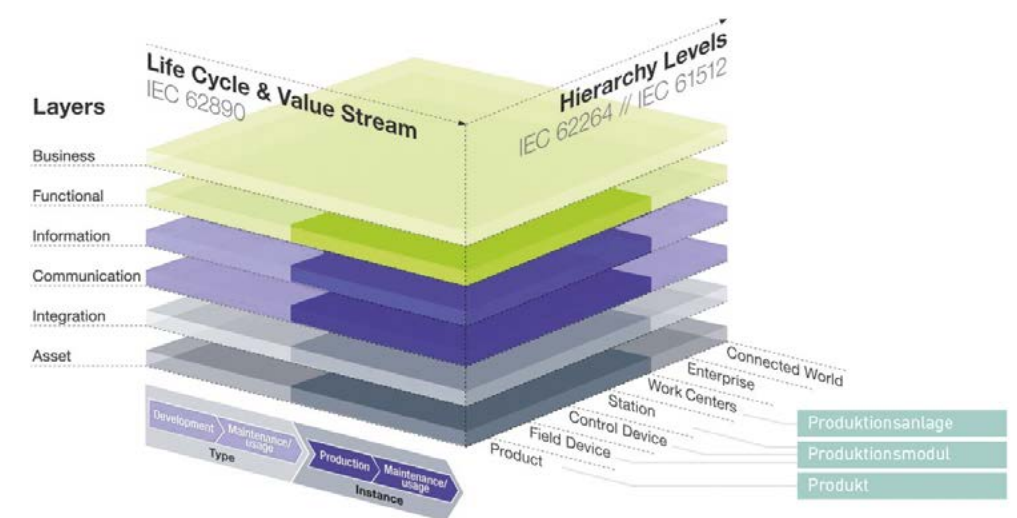
Die Produktebene umfasst alle Erzeugnisse des Produktionsprozesses. Konkret ist das zu fertigende Produkt die einzige Modulkategorie auf dieser Ebene. Die Produktionsebene fasst alle Arten von Modulen zusammen, die der Produktion des Produktes dienen. Diese Produktionsmodule können sowohl automatisierte Fertigungsanlagen, manuelle Arbeitsplätze als auch Logistiksysteme sein. Die Produktionsmodule lassen sich in Produktionsbausteine unterteilen, aus denen sie zusammengesetzt werden. Produktionsmodul und Produktionsbaustein bilden jeweils eine Unterebene der Produktionsebene. Die Integrationsebene ist das Bindeglied zwischen der physischen I4.0-Anlage und den übergeordneten IT-Systemen bzw. dem Shopfloor und der IT. Sie gruppiert alle Module, die die Kommunikationsverbindung herstellen wie z.B. Kommunikationsbusse. Die IT-Systemebene ist das digitale Pendant zur Produktionsebene. Sie umfasst alle IT-Module, die Dienste für die Produktion anbieten. Hierzu gehören z.B. MES, LVS oder ERP-Systeme. Da größere Softwareanwendungen in der Regel aus mehreren Diensten zusammengesetzt werden, gibt es auch hier eine weitere Unterebene. Die IT-Bausteine beschreiben jeweils die einzelnen Funktionalitäten.

Als Weiterentwicklung der ersten Version des Whitepapers ist die Versorgungsebene nicht mehr als eigenständige Ebene in diesem Modell vorhanden, sondern als Bindeglied aller Ebenen. Ihr Stellenwert als Querschnittsthema und Bindeglied aller Ebenen wird durch diese Darstellung noch weiter verdeutlicht. Zu den vermittelnden Komponenten gehören in der Produktion insbesondere Komponenten zur Versorgung der Fertigungsmodule und das Netzwerk in der IT. Des Weiteren werden die IT-Systemebene und die Produktionsebene weiter detailliert. Hierdurch ist es möglich, auch die Modularität und Schnittstellen innerhalb von Fertigungsmodulen und IT-Systemen zu spezifizieren. Zudem erlaubt es eine detailliertere Betrachtung der Funktionen, die die jeweiligen Produktionsmodule bzw. Produktionsbausteine anbieten. Eine verfeinerte Differenzierung zwischen wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Tätigkeit wird hierdurch realisiert.

In besonderen Maße ermöglicht der Ansatz, Logistiksysteme und verteilte I4.0-Anlagen zu beschreiben. Dabei kann es sich um ein Logistikmodul oder einen Logistikbaustein innerhalb eines Produktionsmoduls handeln. Folglich wird hierdurch eine verfeinerte Detaillierung von Funktionalitäten ermöglicht. Ein Logistikmodul bietet die Kernfunktionalität des Transports, während ein Logistikbaustein nur einen Teil eines Produktionsschrittes abbildet. Abbildung 4 fasst den Überblick über die Ebenen zusammen.

Abbildung 5:
Das RAM I4.0 – dargestellt
im dreidimensionalen
Modell – und die **SmartFactory^{KL}**
Systemarchitektur
für Industrie 4.0-Produktions-
anlagen sind zueinander
kompatibel.

Bildquelle:
© Plattform Industrie 4.0



Die in Kapitel 2 hergeleiteten Anforderungen an eine Industrie 4.0-Systemarchitektur wurden im Folgenden bei der erarbeiteten Systemarchitektur berücksichtigt. Die Architektur beschreibt somit, wie Industrie 4.0-Technologien eingesetzt werden können, um agil auf neue Anforderungen zu reagieren. Für jede Ebene der Architektur und die darin enthaltenen Module wird beschrieben, welche Sichten (Funktionalität, Kommunikation, Mechanik, Versorgung, Interaktion etc.) zu betrachten sind.

Spezifikation Produktebene:



In der klassischen Massenproduktion steht die Verfügbarkeit digitaler Produktinformationen nicht im Fokus. Denn in deren Lebenszyklus werden nur wenige Varianten in vorab definierten Prozessen gefertigt. Mit steigender Produktvariabilität wächst jedoch die Bedeutung der Produktinformationen.

Voraussetzung für eine Produktion mit hoher Vari-

antenvielfalt oder für eine individuelle Produktion ist das digitale Hinterlegen der individuellen Auftragsparameter beim jeweiligen Produkt. Erst hierdurch können I4.0-Anlagen die jeweils benötigten Parameter auslesen und eine Prozessanpassung für den neuen Auftrag vornehmen (Anforderung 1.1). Aufgrund von unterschiedlichen Varianten bedarf es unter Umständen unterschiedlicher Fertigungsschritte und somit unterschiedlicher Materialflüsse (Anforderung A1.2).

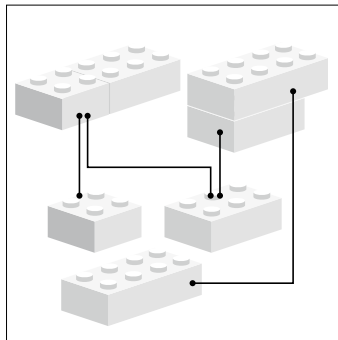
Diese Zuordnung zwischen Produkt und Produktdaten muss über den gesamten Produktionsprozess erhalten bleiben und sich ggf. erweitern und aktualisieren lassen. So entsteht ein digitales Abbild des Produktes (vgl. „Digital Twin“). Voraussetzung für die Weitergabe von z.B. produktbezogenen Ist-Fertigungsmaßen ist eine horizontale Vernetzung der I4.0-Anlage.

Für die Fertigung von Stückgut wird demnach eine Produktreferenz benötigt, die eine eindeutige Identifikation jedes Produktes ermöglicht. Auf Basis der festgelegten Prozessabfolge, die das Produkt durchläuft, wird so ein Abgleich von benötigten Fertigungsschritten und den angebotenen Services der I4.0-Anlage ermöglicht. Die I4.0-Anlagen nehmen dann die spezifischen Parametereinstellungen in Abhängigkeit zu dem Produkt vor. Die Produktreferenz bildet zudem die Voraussetzung für die Nachverfolgbarkeit innerhalb der Fabrik und der Speicherung von Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Produktes. Für die Spezifikation eines Moduls der Produktsicht ergeben sich somit nachstehende, zu spezifizierende Aspekte:

Tabelle 2:
Produktebene

Modulspezifikation	Produkt XY
Klasse des Moduls	Produkt
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Möglichkeit, Funktionalitäten direkt auf dem Produkt zu hinterlegen (Produktionsdaten für horizontale Integration, etc.)
Spezifikation „Kommunikation“	<ul style="list-style-type: none">Informationsmodell zur Beschreibung der Produkteigenschaften (Produktkonfiguration, -merkmale, Identifikationsnummer)Informationsmodell zur Beschreibung der Fertigungsschritte, inkl. deren Soll-Parameter (z.B. NC-Programme, Soll-Lagerdauer etc.)Informationsmodell zur Beschreibung der durchgeführten Fertigungsschritte, inkl. ggf. deren Ist-Parameter (z.B. Energieverbräuche, Ist-Toleranzen)
Spezifikation „Mechanik“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung der Außenmaße des Produktes für die Logistik (z.B. für Greifroboter, Werkstückträger etc.)Beschreibung der Position und Art zum Auslesen und Aktualisieren der Produktreferenz (z.B. Position eines QR-Codes oder RFID-Tags)
Spezifikation „Versorgung“	(in der Regel keine Versorgung des Moduls notwendig)
Spezifikation „Interaktion“	(in der Regel keine separate HMI zur Interaktion notwendig)

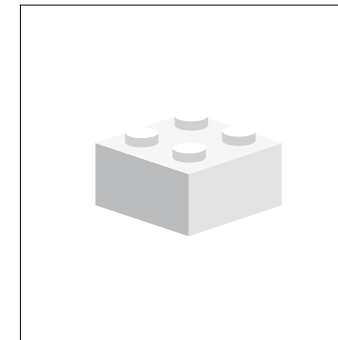
Spezifikation Produktionsebene:



Im Hinblick auf immer kürzere Lebenszyklen und mehr Varianten steigt die Bedeutung von wandelbaren I4.0-Anlagen. Insbesondere die schnelle, kostengünstige Umrüstung und Inbetriebnahme von I4.0-Anlagen führt zu hohen Anforderungen an die Produktionsmittel. Eine Lösung für die Problematik wird durch eine Modularisierung der I4.0-Anlage zu einem Produktionsmodul bzw. auf Basis von Bausteinen ermöglicht (Anforderung 2.1). Modularität setzt drei Aspekte voraus: Zunächst kapselt es eine spezifische Funktionalität. Um eine Wandelbarkeit der modularen I4.0-Anlage zu gewährleisten, muss das Modul durch eine standardisierte und modulare Schnittstelle definiert werden. Zur weiteren Abgrenzung erfordert das Modul eine Interaktion zwischen seinen modularen Bausteinen. Werden diese Anforderungen erfüllt, bietet Modularität die Voraussetzung, um einen neuen Produktionsprozess mit minimalem physischen Konfigurationsaufwand zu integrieren.

Die Grundlage für die zukünftige Produktion ist eine service-orientierte Architektur zum Abgleich des Service der Anlage und des zu fertigenden Produktes. Zur Umsetzung von flexiblen Fertigungsfunktionalitäten, benötigt jede Anlage zudem eine Selbstbeschreibungsfähigkeit (Anforderung 1.1). Diese stellt die Basis zur Bildung von Funktionalitäten dar, die automatisch als Dienst an die Produktion angebunden werden können. Weitere Einblicke hinsichtlich der Selbstbeschreibung bzw. Verwaltungsschale von I4.0-Anlagen werden in „Exemplarische Übertragung der RAMI 4.0-Verwaltungsschale auf die **SmartFactory^{KL}** Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen“ gegeben⁸.

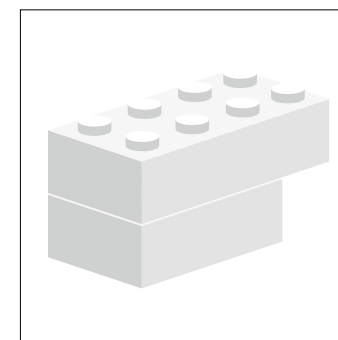
Spezifikation Produktionsbaustein:



Trotz der Einführung von cyber-physischen-Systemen in der Produktion und der einhergehenden Abkehr von der Automatisierungspyramide bestehen weiterhin logische Hierarchieebenen. Dabei besteht ein Produktionssystem auf unterster logischer Ebene aus einem intelligenten modularen Baustein. Ein solcher Baustein beschreibt nur ein Teil eines Produktionsprozesses und kann die Funktionalität eines Modules nicht vollständig erfassen. Er kapselt elementare Produktionsfunktionalitäten, wie beispielsweise den Verfahrensweg einer Linearachse. Dabei kann zwischen wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Funktionalitäten unterschieden werden. Wertschöpfende Tätigkeiten in Bezug auf die Produktion von Stückgütern sind Vorgänge wie Bohren oder Montieren-, wohingegen nicht-wertschöpfende Tätigkeiten beispielsweise logistische Vorgänge sind. Allgemein ist das Ziel in der Produktion, den Anteil von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten zu minimieren.

Für die Aggregation von Produktionsbausteinen zu übergeordneten Services müssen diese eine gewisse Selbstbeschreibungsfähigkeit besitzen. Es existiert sozusagen neben der eindeutigen Produktreferenz eine eindeutige Referenz bzw. Verwaltungsschale für den Produktionsbaustein. Diese enthält alle für die Produktion relevanten Informationen und meldet sich automatisch am übergeordneten System,

Spezifikation Produktionsmodul:



Die Definition des Produktionsprozesses entsteht auf einer höheren Hierarchieebene. Flexible und modulare Fabrikstrukturen bestehen auf der untersten Ebene aus der Kombination von mehreren Produktionsbausteinen (CPS). Werden die Produktionsbausteine zu einer Funktionalität aggregiert, handelt es sich um ein cyber-physisches Produktionsmodul. Es orchestriert einzelne elementare Produktionsfunktionalitäten zu einem übergeordneten Service. Diese instanziierten die auszuführenden spezifischen Fertigungs-, Montage-, Prüf- oder Handhabungsprozesse. Die Schnittstellen auf mechanischer, elektromechanischer und informationstechnischer

Ebene sind einheitlich standardisiert. Die übergreifenden Spezifikationen stellen dabei die interoperable Kombinationsfähigkeit der Produktionsmodule sicher. Um einen gesamten Prozess abzubilden, werden mehrere CPPM zu einem cyber-physischen Produktionssystem verkettet (Abbildung 4).

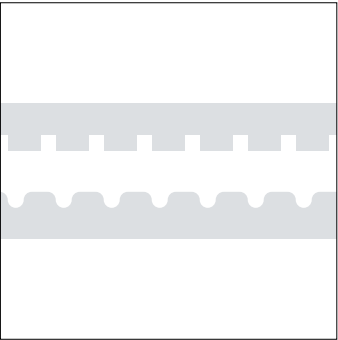
Die I4.0-Anlage muss die zugeordneten Produktionsparameter des Produktes erfassen und die benötigten Parametereinstellungen vornehmen können, um den jeweiligen Prozess durchzuführen. Dafür bieten die Module ihre Funktionalität als Service an und passen sich den erforderlichen Parametern des Produktes an. Sowohl CPS als auch CPPM lassen sich über Plug&Produce in Betrieb nehmen. Über das CPPM wird außerdem eine automatische Erkennung und Auswertung der Anlagen-Topologie ermöglicht. Die praktische Umsetzung von modularen I4.0-Anlagen erfordert neue Konzepte der Zertifizierung. Das Whitepaper „Safety an modularen Maschinen“ zeigt eine Lösung dieser Problematik auf⁹.

Modulspezifikation	z.B. Fräsmodul
Klasse des Moduls	Produktionsmodul
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Servicebeschreibung mit mindestens der angebotenen Funktionalität, erwarteten Eingangsparametern und ausgegebenen Ergebnissen
Spezifikation „Kommunikation“	<ul style="list-style-type: none">Informationsmodell zur Beschreibung der Produktionsmoduleigenschaften (Produktionsmodulkonfiguration, -merkmale, Identifikationsnummer)Informationsmodell zur Beschreibung der Fertigungsfunktionalität (z.B. Fertigungsbereich, -art etc.)Informationsmodell zur Beschreibung des Produktionsbausteins (z.B. Fertigungsbereich, -art etc.)Informationsmodell der ProdukteMechanismus zum Lese- und Schreibzugriff der ProduktreferenzMechanismus zum Erkennen der AnlagentopologieMechanismus zum Erkennen der Bausteintopologie

Tabelle 3:
Produktionsmodul

Modulspezifikation	z.B. Fräsmodul
Spezifikation „Mechanik“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung des Grundaufbaus des Produktionsmoduls (z.B. Außenmaße)Beschreibung der Position und Art zum Auslesen und Aktualisieren der Referenz für das Produktionsmodul (z.B. Position eines QR-Codes oder RFID-Tags)
Spezifikation „Versorgung“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung der benötigten Versorgungs- und Managementfunktionen (z.B. Druckluft)Beschreibung von Übergabepunkten für die Produkte
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Vereinheitlichte Mensch-Maschine-Schnittstelle zum Mitarbeiter, fest verbaut oder mobil zugänglich. Diese ermöglicht die Steuerung des Moduls, sowie den Abruf von Statusinformationen

Spezifikation Integrationsebene:



Die Vernetzung aller Maschinen und besonders aller IT-Systeme untereinander stellt in einer herstellerübergreifenden Anlage eine große Herausforderung dar. Die Realisierung einer transparenten Produktion setzt jedoch voraus, dass alle Systeme miteinander kommunizieren können (Anforderung 3.1). Zwischen IT-Systemen und Produktionsmodul übernimmt deshalb die integrierende Informationsschnittstelle eine standardisierende Funktion. Das System basiert auf dem Prinzip der serviceorientierten Architektur: Der Nutzer eines Dienstes abonniert die Informationen, die von einem Dienstanbieter publiziert werden. Äquivalent zu dem Prinzip der I4.0-Komponenten wird ein Servicekontrakt zwischen interagierendem Dienstanbieter und –nutzer geschlossen. Dies ermöglicht die Vernetzung vom Feldgerät bis zum übergeordneten IT-System und somit die vertikale Integration der Produktion. Zusätzlich symbolisiert die Integrationsebene den Übergang zwischen Automatisierung und IT-Welt. Sie fungiert als zusätzliche Ebene der IT-Sicherheit und agiert als Vermittlungsstelle bzw. Broker für den Austausch der Informationen/Datenpakete.

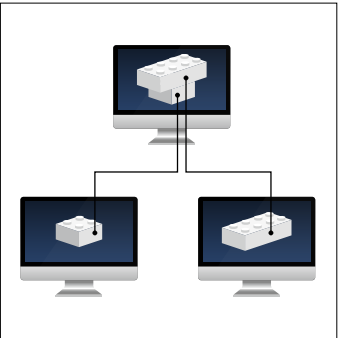
9 http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2018/04/SF_WhitePaper_Safety_3-1_DE_XS-1.pdf

Alle relevanten Informationen und Einstellparameter werden in einem einheitlichen Repräsentationsschema zusammengefasst. Somit wird sichergestellt, dass keine Vielzahl an proprietären Schnittstellen zwischen Informationsanbieter (Modul) und Informationsnutzer (IT-System) entsteht. Je nach Bedarf können die IT-Systeme auf Informationen zugreifen und Einstellparameter lesen oder schreibend verändern. Ein Industrie 4.0 konformes Modul tauscht demnach unter anderem Statusinformationen und historische Daten mit den übergeordneten IT-Systemen wie dem MES aus. Dies erfordert einen Zugriff auf Produktions- und IT-Ebene, sowie eine einheitliche semantische Beschreibung der Module und Produkte.

Modulspezifikation	
Klasse des Moduls	Integrationsebene
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Standardisierung der DatenformateSicherheitsschnittstelle (Firewall)Vermittlungsstelle/Broker für Informations-/Datenpaketaustausch
Spezifikation „Kommunikation“	<ul style="list-style-type: none">Informationsmodell des ProduktionsmodulsInformationsmodell der ProduktreferenzInformationsmodell der VersorgungsmoduleKommunikationsmodul zum Lese-/Schreibzugriff aus der ProduktionsebeneKommunikationsmodul zum Lese-/Schreibzugriff aus der IT-Ebene
Spezifikation „Mechanik“	<i>(in der Regel nicht notwendig, da die verwendete Hardware untergeordneten Einfluss auf die Integrationsschnittstelle hat)</i>
Spezifikation „Versorgung“	<i>(in der Regel ist die Stromversorgung der Hardware standardisiert, sodass keine separate Spezifikation notwendig ist)</i>
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung je für Benutzerrolle

Tabelle 4:
Integrationsebene

Spezifikation IT-Systemebene:



Die zukünftig geforderte Wandelbarkeit benötigt nicht nur einen modularen Ansatz in der Produktion. Auch die mit ihr verbundenen IT-Systeme müssen sich über die Nutzungsdauer stetig an neue Anforderungen anpassen lassen. Dies umfasst zum einen den Austausch bzw. die Aktualisierung bestehender Software durch neuere Versionen (z.B. eine Aktualisierung des MES); zum anderen die nachträgliche Integration von spezialisierten Diensten, die mit den bestehenden Systemen interagieren müssen (z.B. die Nutzung von KI zur Produktionssteuerung).

Voraussetzung für die schnelle, flexible Anpassung der IT-Landschaft ist auch hier ein modularer Ansatz mit herstellerunabhängigen, offenen Kommunikationsschnittstellen und Informationsmodellen. Erst hierdurch kann der Austausch mit der I4.0-Anlage und anderen IT-Systemen gewährleistet werden. Die Integrationsebene nimmt hierbei eine besondere Rolle ein, da sie die u.a. proprietären Schnittstellen in ein einheitliches Format konvertieren kann. Auch verfügt sie über die Möglichkeit, durch entsprechende Regelwerke Daten zwischen den IT-Systemen zu vermitteln.

Die IT-Systemebene unterscheidet zwei Klassen von Modulen, die ihr zugeordnet sind:

Spezifikation IT-Baustein:

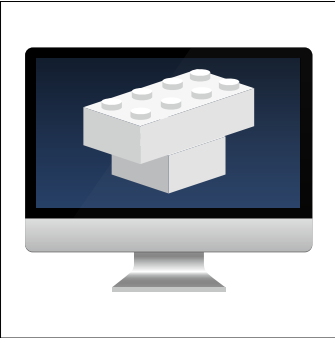


IT-Bausteine kapseln, ähnlich wie Produktionsbausteine der Produktionsebene, elementare Dienste. Für jedes IT-System muss nicht nur die Funktionalität bekannt sein, sondern auch eine Spezifikation der angebotenen Dienste und ausgetauschten Nachrichten.

In der Praxis finden sich IT-Systeme eher in selbstentwickelten Lösungen, die neben den bestehenden Systemen erstellt wurden. Diese eignen sich speziell, um individuelle Probleme im Unternehmen zu lösen. Hierzu gehören z.B. Planungswerkzeuge für spezielle Logistikprozesse. Ansonsten dienen die IT-Systeme

der Systemarchitektur der logischen Gruppierung von Funktionalitäten im IT-Modul. Zum Beispiel bestehen heutige ERP-Systeme i.d.R. aus mehreren einzelnen IT-Systemen wie der Materialdisposition, Personalverwaltung, Controlling.

Spezifikation IT-Modul:



IT-Module aggregieren einzelne Funktionalitäten der IT-Systeme zu einem Gesamtsystem wie z.B. ERP-System oder MES-System. Auch für diese Art ist eine standardisierte Beschreibung der Schnittstellen und einheitliche Kommunikation unerlässlich. IT-Module können hierbei sowohl in der eigenen IT-Infrastruktur installiert sein als auch Cloud-Dienste sein, die über das Internet genutzt werden und an die Integrationsschnittstelle angebunden sind.

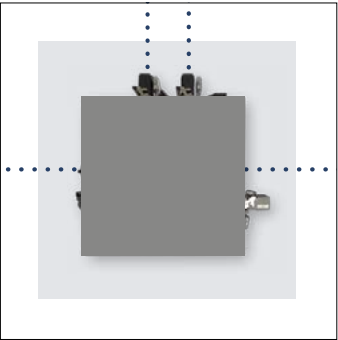
Für die Spezifikation des Moduls der IT-Systemebene ergeben sich nachstehende, zu spezifizierende Aspekte:

Modulspezifikation	z.B. „ERP-System“ oder „Bestandsplanung“
Klasse des Moduls	IT-Modul oder IT-System
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Servicebeschreibung mit mindestens der angebotenen Funktionalität, erwarteten Eingangsparametern und ausgegebenen Ergebnissen
Spezifikation „Kommunikation“	<ul style="list-style-type: none">Technische Beschreibung der angebotenen Dienste (z.B. verwendetes Protokoll, Adresse des Dienstes, Übergabeparameter, Rückgabewerte)Informationsmodell der ausgetauschten Daten (z.B. Attribute eines Datenpaketes, Einheiten von Werten)
Spezifikation „Mechanik“	(in der Regel nicht notwendig, da die verwendete Hardware untergeordneten Einfluss auf die Wandelbarkeit der Software hat)

Tabelle 5:
IT-Systemebene

Modulspezifikation	z.B. „ERP-System“ oder „Bestandsplanung“
Spezifikation „Versorgung“	(in der Regel ist die Stromversorgung der Hardware standardisiert, sodass keine separate Spezifikation notwendig ist)
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung von Benutzungsoberflächen des Moduls und je Benutzerrolle verfügbare Funktionalitäten

Spezifikation Versorgungsebene (Querschnittsthema)



Eine schnelle Wandelbarkeit insbesondere im Hinblick auf den Austausch von Modulen erfordert eine standardisierte, modulare Infrastruktur (Anforderung 2.1). Inbegriffen sind Versorgung- und Managementfunktionen, dazu zählen die Energieversorgung, die Druckluftversorgung, das Datenrouting ebenso wie eine übergreifende Steuerung der Sicherheitsfunktionen. Erst durch die zusätzliche Standardisierung der Produktionsinfrastruktur ist ein Plug&Produce Paradigma umsetzbar, welches

einen schnellen Wechsel von Modulen zur Anpassung an neue Produkte bzw. Produktvarianten ermöglicht. Somit ist eine übergreifende Betriebsbereitschaft sichergestellt.

Tabelle 6:
Versorgungsebene

Modulspezifikation	Z.B. Druckluft
Klasse des Moduls	Versorgungsebene
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Versorgung der Produktionsmodule mit benötigten EingangsgrößenDatenroutingSteuerung der Sicherheitsfunktionen
Spezifikation „Kommunikation“	<ul style="list-style-type: none">Firewall auf physischer EbeneInformationsmodell VersorgungsmedienDatenaustausch
Spezifikation „Mechanik“	<ul style="list-style-type: none">Anschluss an die Produktionsmodule

4. Instanziierung

Modulspezifikation	Z.B. Druckluft
Spezifikation „Versorgung“	<ul style="list-style-type: none">Medien
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung von Benutzerrolle

Zusammenfassend hat das vorangegangene Kapitel die **SmartFactory^{KL}**-Systemarchitektur vorgestellt und die einzelnen Ebenen sowie zu spezifizierende Aspekte je Ebene beschrieben. Insbesondere die Beschreibung von Kommunikationsschnittstellen nimmt auf allen Ebenen eine besondere Rolle ein, da sie für die Digitalisierung der Produktion und Realisierung einer modularen, wandelbaren I4.0-Anlage unerlässlich ist. Die Kommunikation muss daher durchgängig vom Produkt bis zur IT-Systemebene in der Cloud möglich sein; d.h. die durchgängige vertikale Integration ist unerlässlich.

Die Spezifikation der Versorgung und mechanischer Schnittstellen spielt insbesondere in der Produktionsebene und Produktebene eine große Rolle, da hier physische Objekte ausgetauscht werden. Auf allen anderen Ebenen ist sie untergeordnet, da die Gestaltung und Versorgung von z.B. Server-Hardware weitestgehend standardisiert ist und keinen Einfluss auf die Modularität der Softwaredienste hat.

Als Weiterentwicklung der ersten Version des Whitepapers vertieft diese Version die zu spezifizierenden Elemente und identifiziert Klassen (vgl. Typen bzw. Rollen) von Modulen je Ebene, um die für eine echte Modularität notwendigen Bausteine besser zu beschreiben. Durch diesen Ansatz ist es nun auch möglich, neben Produktionsmodulen Logistikmodule zu spezifizieren und so nicht nur einzelne I4.0-Anlagen, sondern ganze Fertigungshallen mit mehreren Linien zu modularisieren.

Die **SmartFactory^{KL}** zeigt mit der weltweit ersten herstellerübergreifenden I4.0-Anlage, wie hochgradig wandlungsfähige Fertigung bis hin zu Losgröße 1 effizient realisiert wird, egal, ob in einer vorhandenen Produktion oder im Greenfield. Einheitliche Standards der Schnittstellen ermöglichen eine herstellerübergreifende Anbindung von Produktionsmodule, Logistiksystemen, Versorgungsinfrastruktur und IT-Systemen.

Neben einer vollautomatisierten Anlage wurde eine manuelle Montagestation, der „Handarbeitsplatz“, integriert. Dadurch gelang es, das wichtige Thema „Arbeit der Zukunft“ in die Demonstration zu integrieren und die Entwicklung der Interaktion zwischen Mensch und Maschinen vorzustellen. Damit werden folgende zentrale Themen umgesetzt: Plug&Produce, Predictive Maintenance, skalierbare Automatisierung und Unterstützung des Werkers. Zudem präsentiert sich die I4.0-Anlage seit 2017 erstmals in einem komplett neuen Layout: aufgeteilt in mehrere Fertigungsinseln sowie dem frei stehenden Handarbeitsplatz. Verbunden sind die Inseln über ein flexibles Transportsystem, das die zu fertigenden Produkte von Station zu Station verteilt. Durch diesen Schritt wurde gezeigt, dass der Ansatz der **SmartFactory^{KL}** nicht nur für eine Produktionslinie gilt, sondern durch die entkoppelte Logistik auch mehrere Standorte übertragen werden kann.

Abbildung 6:
Die **SmartFactory^{KL}** Anlage
2018

Bildquelle: A. Sell



Im Folgenden wird die zuvor vorgestellte Systemarchitektur am Beispiel der **SmartFactory^{KL}** Pilotanlage angewendet und um detaillierte Spezifikationen angereichert.

Die Spezifikation ist eine Evolution der ersten Version des Whitepapers.

4.1. Produkt



Die I4.0-Anlage der **SmartFactory^{KL}** fertigt ein personalisiertes Visitenkartenetui. Die Konstruktion in vier Bauteile (Bodenplatte, Haltefeder, Deckel und Inlay) erlaubt vielfältige Individualisierungsmöglichkeiten. Zunächst kann die Farbe des Deckels ausgewählt und das Produkt durch eine Gravur der Bodenplatte sowie der Laser-Gravur auf dem Metalldeckel kundenindividuell zusammengestellt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, individuelle Inlays einzulegen.

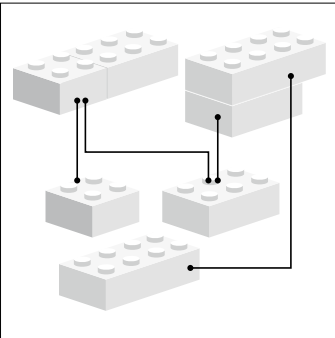


Abbildung 7:
Personalisiertes
Visitenkartenetui (links) als
Produkt der **SmartFactory^{KL}**
Pilotanlage mit einzelnen
Bauteilen: Bodenplatte,
Haltefeder, Inlay und
Deckel (rechts)

Tabelle 7:
Instanziierung der
Produktebene in
der **SmartFactory^{KL}**

Spezifikation des Produktes	
Modulspezifikation	Visitenkartenetui
Klasse des Moduls	Produkt
Spezifikation „Funktionalität“	„Digitales Produktgedächtnis – RFID“ <ul style="list-style-type: none">Ermöglicht die Weitergabe von Informationen zwischen den Produktionsmodulen und somit die horizontale Integration der I4.0-Anlage
Spezifikation „Kommunikation“	„SF-Informationsmodell für Produkte“ <ul style="list-style-type: none">Informationen u.a. zu Auftragsnummer, Auftragsdatum, Fertigungsstatus, Priorität, Fertigungsschritte, Verbrauchte Energie pro Modul, Dauer der Bearbeitungsschritte, Deckelfarbe, Kundendaten für QR-Code (Laser-Gravur) und Gravur-Boden Mechanismus zum Lese- und Schreibzugriff auf das digitale Produktionsgedächtnis <ul style="list-style-type: none">Die kundenindividuellen Produktparameter werden bei Auftragseingang im digitalen Produktgedächtnis hinterlegt.Siemens MDS D460 – ISO 15693, 2048 Byte UserspeicherASCII Zeichensatz mit 128 Zeichen
Spezifikation „Mechanik“	RFID-Tag (13,56 Mhz) <ul style="list-style-type: none">Der RFID-Tag ist fest im Masterbauteil des Produktes (Bodenplatte) integriert. Dabei wurde die Positionierung fest definiert
Spezifikation „Versorgung“	RFID wird über Induktion mit Energie versorgt
Spezifikation „Interaktion“	–

4.2. Produktionsebene



Zur Herstellung des individuellen Visitenkartenetuis werden bedarfsorientiert bis zu zehn verschiedene Produktionsmodule zu einem Produktionsprozess verkettet. Dabei kapseln die Module verschiedene Produktionsschritte von Handhabung über Qualitätskontrolle bis hin zur Logistik. Neben den automatisierten Modulen ermöglicht das Handarbeitsmodul, jede der Funktionen der einzelnen Module zu ersetzen und unterstützt den Werker bei der Ausführung seiner Aufgaben. Die Anlage unterteilt sich

in vier verschiedene Produktionslinien und wird durch das fahrerlose Transportsystem verbunden. Dies zeigt, dass die Industrie 4.0 Anlage auch als verteiltes System funktionsfähig ist. Das digitale Produktgedächtnis fungiert als Mittel zur Integration für die horizontale Vernetzung zwischen den Anlagenabschnitten.



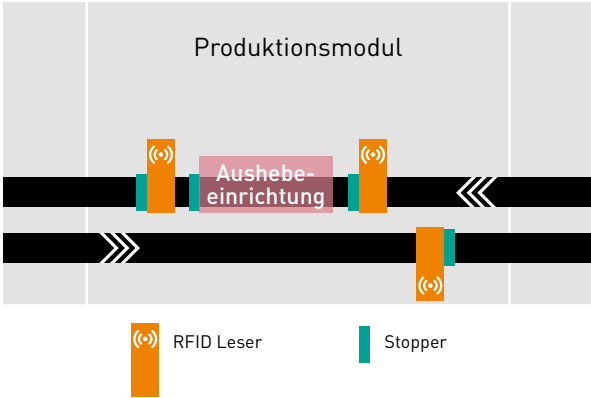
Abbildung 8:
Der Produktionsprozess für die Herstellung des Visitenkartenetuis besteht derzeit aus bis zu acht verschiedenen Produktionsmodulen.

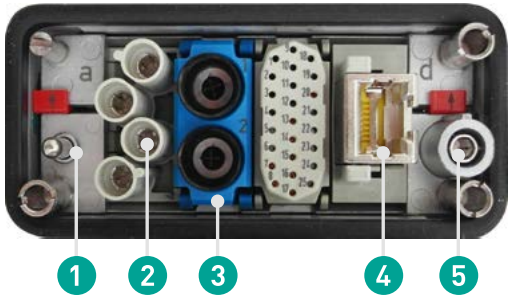
Spezifikation der Produktionsmodule	
Modulspezifikation	
Klasse des Moduls	Produktionsmodul
Spezifikation „Funktionalität“	„SF-Produktionsmodul“ <ul style="list-style-type: none">Lagerung der Werkstückträger, Gravierung der Bodenplatte, Einlegen der Haltefeder, Verpressen des Deckels, Lasern des Deckels, Wiegen des Produktes, optische Kontrolle des gelaserten QR-Codes, Einlegen des Inlays

Tabelle 8:
Instanziierung der Produktionsebene in der SmartFactory^{KL}

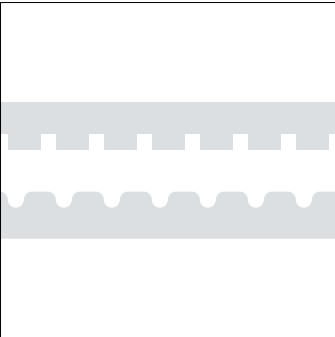
Modulspezifikation	
	„SF-Transportsystem“ <ul style="list-style-type: none">Modulares Transportsystem mit zwei umlaufenden Förderbändern, Schleusenvorrichtung und definierten Übergabepunkten für die Produkte:<ol style="list-style-type: none">Geöffnete Schleuse: Weiterreichen des ProduktsGeschlossene Schleuse: Umlenkung von Vorlauf- auf Rücklaufband „Handarbeitsplatz“ <ul style="list-style-type: none">Manuelle Montagestation, die die Funktionen der Produktionsmodule ersetzen kann und den Werker durch innovative Technologien unterstützt „SF-Logistikmodul“ <ul style="list-style-type: none">Robotino – Fahrerloses Transportsystem<ol style="list-style-type: none">Scannen der Umgebung via LaserscannerSteuerung über MES-System „SF-Schnittstellenmodul“ <ul style="list-style-type: none">Docking Station<ol style="list-style-type: none">Verbindung zwischen Logistikmodul und FertigungsmodulKontaktloses Laden des SF-Logistikmoduls „SF-Safetyfunktion“ <ul style="list-style-type: none">Not-HaltSchleuse-LinksSchleuse-RechtsSchutztür

Modulspezifikation	
Spezifikation „Kommunikation“	„SF-Informationsmodell für Produktionsmodule“ <ul style="list-style-type: none">Module verfügen über genau einen öffentlich verfügbaren OPC UA Server. Dieser bildet ein einheitliches, definiertes InformationsmodellInformationen u.a. zu: Eigenschaften, Produktionsstatus, Betriebszustand, Topologie (Nachbarschaftsmodule) sowie Ressourcenbedarf und -verbrauch des Produktionsmoduls.beschreibt eine flache Liste von Daten, deren Typen zu IEC 61131-3 und gängigen Hochsprachen (C#, C++) kompatibel sind
	„SF-Informationsmodell für Produkte“ <p>Vgl. Spezifikation des Produktes</p>
	„SF-Anlagen-Topologie-Erkennung“ <ul style="list-style-type: none">Baugruppe aus einem RFID-Leser, RFID-Tag sowie zwei Näherungsschaltern zur Erkennung und eindeutigen Identifizierung der benachbarten Produktionsmodule
	
	<ul style="list-style-type: none">Informationsmodell zur Beschreibung der Fertigungsfunktionalität (z.B. Fertigungsbereich, -art etc.)Informationsmodell zur Beschreibung des Produktionsbausteins (z.B. Fertigungsbereich, -art etc.)Informationsmodells der Produkte

Modulspezifikation	
	„SF-Produktverfolgung“ <ul style="list-style-type: none">Basiert auf RFID (13,56 Mhz)Beim Einlaufen des Produktes in ein Produktionsmodul werden alle Produktparameter auf dem digitalen Produktgedächtnis ausgelesenVor dem Verlassen des Moduls wird das digitale Produktgedächtnis u.a. hinsichtlich des Fertigungsstatus aktualisiertInformationsmodells der Produkte
	
	„SF-Grundaufbau“ <ul style="list-style-type: none">Modulmaße [m]: L 1,20 B 0.80 H < 1,90
Spezifikation „Mechanik“	

Modulspezifikation	
Spezifikation „Versorgung“	<p>„SF-Modularbuchse“</p>  <p>1 Schutzleiter 2 400V Drehstrom 3 Druckluft 4 Industrial Ethernet 5 Schutzleiter</p>
Spezifikation „Interaktion“	<p>„SF-Augmented Reality-Anwendung“</p> <ul style="list-style-type: none">Über die Datenbrille werden dem Werker Informationen in die Brille projiziert, die durch künstliche Intelligenz auf den Bedarf des Werkers zugeschnitten und vorverarbeitet sind.

4.3. Integrationsebene



Der Integrationsebene obliegt die Aufgabe, die Daten der Produktionsmodule, die über die Versorgungsebene bereitgestellt werden, zu sammeln und zu aggregieren. Somit wird ein beidseitiger Austausch zwischen Produktionsebene (Automatisierungstechnik) und IT-Systemen ermöglicht. Betriebs- und Produktdaten aus der Produktionsebene werden über ein einheitlich festgelegtes Kommunikationsprotokoll erfasst, angereichert und strukturiert in der Integrationsschnittstelle abgelegt.

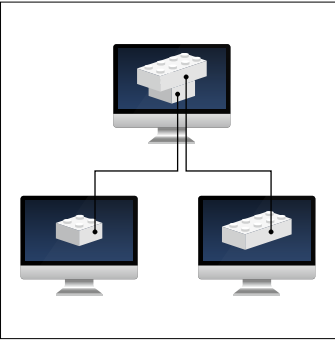
Die Informationsversorgung der höhergelegenen IT-Systemebene folgt dem Grundprinzip einer serviceorientierten Architektur: Dabei können beliebige Informationen von der Informationsschnittstelle publiziert und von den IT-Systemen nach Bedarf abonniert werden, ohne dass zwischen den Produktionsmodulen (Informationsanbieter) und den IT-Systemen (Informationsnutzer) eine Vielzahl von individuellen 1:1-Schnittstellen implementiert werden müssen.

Spezifikation der Versorgungsmodule																			
Modulspezifikation																			
Klasse des Moduls	Integrationsebene																		
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">• Standardisierung der Datenformate• Sicherheitsschnittstelle (Firewall)• Vermittlungsstelle/Broker für Informations-/Datenpaketaustausch																		
Spezifikation „Kommunikation“	<p>Kommunikationsprotokolle (im OSI-Referenzmodell):</p> <ul style="list-style-type: none">• Transportebene: Ethernet• Anwendungsebene: OPC UA (IEC 62541) <table><tr><td rowspan="3">Anwendungsschicht</td><td>7</td><td>Anwendung (Application)</td><td rowspan="3">OPC UA</td></tr><tr><td>6</td><td>Darstellung (Presentation)</td></tr><tr><td>5</td><td>Sitzung (Session)</td></tr><tr><td rowspan="4">Transportschicht</td><td>4</td><td>Transport</td><td rowspan="4">Ethernet</td></tr><tr><td>3</td><td>Vermittlung (Network)</td></tr><tr><td>2</td><td>Sicherung (Data Link)</td></tr><tr><td>1</td><td>Bitübertragung</td></tr></table> <p>Kommunikationsprotokolle: Vielzahl von Kommunikationsprotokollen möglich, z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none">• MQTT• RESTful-WebService• SOAP-Webservice	Anwendungsschicht	7	Anwendung (Application)	OPC UA	6	Darstellung (Presentation)	5	Sitzung (Session)	Transportschicht	4	Transport	Ethernet	3	Vermittlung (Network)	2	Sicherung (Data Link)	1	Bitübertragung
Anwendungsschicht	7		Anwendung (Application)	OPC UA															
	6		Darstellung (Presentation)																
	5	Sitzung (Session)																	
Transportschicht	4	Transport	Ethernet																
	3	Vermittlung (Network)																	
	2	Sicherung (Data Link)																	
	1	Bitübertragung																	

Tabelle 9:
Instanziierung der
Integrationsebene in
der SmartFactory^{KL}

Modulspezifikation	
	„SF-Informationsmodell für Produktionsmodule“ vgl. Spezifikation des Produktionsmodules „SF-Informationsmodell für Produkte“ vgl. Spezifikation des Produktes
Spezifikation „Mechanik“	(in der Regel nicht notwendig, da die verwendete Hardware untergeordneten Einfluss auf die Integrationsschnittstelle hat)
Spezifikation „Versorgung“	(in der Regel ist die Stromversorgung der Hardware standardisiert, sodass keine separate Spezifikation notwendig ist)
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung je für Benutzerrolle

4.4. IT-Systemebene



Gekapselte, heterogene Softwarebausteine der IT-Systemebene ermöglichen die dynamische Überwachung, Steuerung, Planung, Analyse und Simulation der I4.0-Anlage. In der **SmartFactory^{KL}** Pilotanlage sind unter anderem folgende IT-Systeme implementiert: Auftragsplanung (ERP), Auftragssteuerung (MES), Anlagen-Engineering (PLM), Datenerfassung und Datenanalytik (Cloud) sowie Fernüberwachung/-wartung. Die **SmartFactory^{KL}**-Cloud hat als übergeordnete Cloud-Lösung Zugriff auf unterschiedliche IT-Systeme unterschiedlicher Hersteller. Dies erlaubt beispielsweise die I4.0-Anlage auf Anomalien zu prüfen (Abbildung 4).

Abbildung 9:
IT-Systeme in
der **SmartFactory^{KL}**

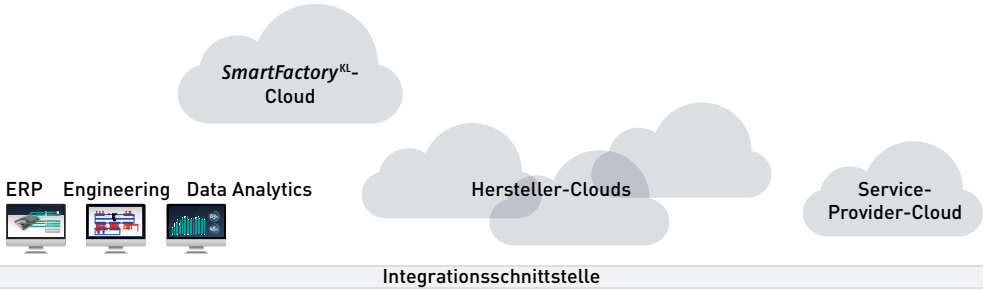
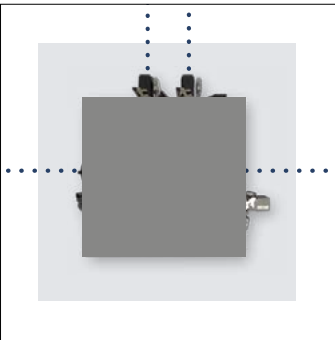


Tabelle 10:
Instanziierung der
IT-Ebene in
der **SmartFactory^{KL}**

Spezifikation der IT-System-Schnittstelle	
Modulspezifikation	
Klasse des Moduls	IT-Modul oder IT-System
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Servicebeschreibung mit mindestens der angebotenen Funktionalität, erwarteten Eingangsparametern und ausgegebenen Ergebnissen
Spezifikation „Kommunikation“	„SF-Informationsmodell für Produktionsmodule“ <ul style="list-style-type: none">Vgl. Spezifikation des Produktionsmodules „SF-Informationsmodell für Produkte“ <ul style="list-style-type: none">Vgl. Spezifikation des Produktes Kommunikationsprotokolle zum Lese- und Schreibzugriff: <ul style="list-style-type: none">Vgl. Spezifikation der IntegrationsschnittstelleInformationsmodell der ausgetauschten Daten (z.B. Attribute eines Datenpaketes, Einheiten von Werten)
Spezifikation „Mechanik“	(in der Regel nicht notwendig, da die verwendete Hardware untergeordneten Einfluss auf die Wandelbarkeit der Software hat)
Spezifikation „Versorgung“	(in der Regel ist die Stromversorgung der Hardware standardisiert, sodass keine separate Spezifikation notwendig ist)

Modulspezifikation	
Spezifikation „Interaktion“	<ul style="list-style-type: none">Beschreibung von Benutzungsoberflächen des Moduls und je Benutzerrolle verfügbare Funktionalitäten

4.5. Versorgungsebene



Die Versorgungsebene ermöglicht eine standardisierte Anbindung und Versorgung der Produktionsmodule. Aktuell existieren vier herstellerspezifische, aber untereinander kompatible Versorgungsmodule, die die angeschlossenen Produktionsmodule über den „SF-Modularstecker“ mit Druckluft und Drehstrom versorgen, an das Sicherheitskonzept anbinden und die Kommunikation zwischen Produktions- und Integrationsebene mittels Ethernet ermöglichen.

Spezifikation der Versorgungsmodule	
Modulspezifikation	Versorgungsmodul und Modularstecker
Klasse des Moduls	Versorgungsebene
Spezifikation „Funktionalität“	<ul style="list-style-type: none">Versorgung der Produktionsmodule mit benötigten MedienDatenrouting zwischen Versorgungsmodulen und ProduktionsmodulenSteuerung der Sicherheitsfunktionen
Spezifikation „Kommunikation“	„SF-Informationsmodell für Versorgungsmodule“ <ul style="list-style-type: none">Informationen über Medien, wie bspw. Energieverbrauch

Tabelle 11:
Instanziierung der Versorgungsebene in der SmartFactory^{KL}

Modulspezifikation	Versorgungsmodul und Modularstecker
Spezifikation „Mechanik“	„SF-Modularstecker“ <ul style="list-style-type: none">1 Schutzleiter2 Industrial Ethernet3 Druckluft4 400V Drehstrom5 Schutzleiter
	„SF-Versorgungsmodul“ <ul style="list-style-type: none">Die Versorgungsmodule ermöglichen die Skalierbarkeit der I4.0-Anlage. Neue Produktionsmodule können flexibel integriert und entfernt werden.
	Spezifikation „Versorgung“ <ul style="list-style-type: none">400V DrehstromDruckluftEthernet Spezifikation „Interaktion“ <ul style="list-style-type: none">Beschreibung für jede Benutzerrolle

Die Spezifikation der Systemarchitektur erlaubt nun einen Abgleich zwischen dem Idealmodell und der Implementierung der SmartFactory^{KL}. Hinsichtlich der Produktebene bietet die I4.0-Anlage der SmartFactory^{KL} eine Lösungsmöglichkeit der horizontalen Vernetzung durch das digitale Produktgedächtnis. Dies erlaubt einen vollkommen dezentral gesteuerten Produktionsprozess. Andere Lösungsansätze

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung

Dieses Whitepaper beschreibt die Weiterentwicklung der **SmartFactory^{KL}**-Systemarchitektur für I4.0-Anlagen. Die Systemarchitektur unterstützt Anwender dabei, in einer Greenfield-Umgebung ihre I4.0-Anlage zu konzipieren und zu realisieren. Durch eine durchgängige Modularität und Spezifikation von Schnittstellen lässt sich eine I4.0-Anlage herstellerunabhängig aufbauen. Ferner wird so die notwendige Wandelbarkeit für die zukünftigen Marktforderungen nach immer kürzeren Lebenszyklen und individuellen Produkten realisiert.

Durch die exemplarische Realisierung mit den Partnern der **SmartFactory^{KL}** konnte die Machbarkeit gezeigt und die Architektur evaluiert werden. Die bei der Umsetzung der in der **SmartFactory^{KL}** vorgenommenen Standardisierungen und Best-Practices wurden in diesem Whitepaper zur Erläuterung vorgestellt.

Als Weiterentwicklung der ersten Version des Whitepapers adressiert diese Version speziell die Rolle des Menschen und die der Logistik in der Systemarchitektur. Hierzu definiert es zu spezifizierende Aspekte je Ebene, um die Interaktionen zwischen Mensch, IT und Maschine zu ermöglichen. Ferner vertieft es den Produktionsbaustein „Logistik“, um auch den produktionslinienübergreifenden Materialaustausch zu standardisieren. Des Weiteren betrachtet es die bestehende Spezifikation der ersten Version, in dem es u.a. die Struktur von Produktionsmodulen standardisiert.

Die Standardisierung der Struktur innerhalb von Produktionsmodulen ist hierbei ein in Zukunft zu vertiefendes Themenfeld. D.h. konkret sind die Arten und Schnittstellen von Produktionsbausteinen zu detaillieren, um so Wandelbarkeit auch innerhalb von Fertigungsmodulen zu schaffen. Diese Form der Modularisierung unterstützt weniger den schnellen Austausch von Fertigungsmodulen, sondern den Engineering-Prozess neuer Module.

Zukünftige Arbeiten werden die für die Kommunikation notwendigen Schnittstellen und deren Informationsmodelle weiter vertiefen. Die Produktionsmodule der **SmartFactory^{KL}** stellen Industrie 4.0-Komponenten dar. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Realisierung der Verwaltungsschale ein im **SmartFactory^{KL}** Partnerkreis wichtiges Thema¹⁰. Als mögliche Hardware für einheitliche Schnittstellen demonstrierte die **SmartFactory^{KL}** bereits auf der Hannover Messe 2018 sogenannte Edge-Devices, mit der sich auch bestehende Anlagen digital integrieren lassen. Mit der Modularisierung von I4.0-Anlagen ergeben sich des Weiteren auch Fragen hinsichtlich der Sicherheit sich ändernder I4.0-Anlagen, welche ebenfalls Bestandteil der aktuellen Arbeiten im **SmartFactory^{KL}** Partnerkreis sind¹¹.

der horizontalen Integration durch direkte Kommunikation zwischen den Modulen wären ebenfalls möglich. Eine Abweichung zwischen der erarbeiteten Systemarchitektur und der I4.0-Anlage stellen die Produktionsbausteine der Produktionsebene dar. Bisher werden die Funktionen direkt auf der Ebene der Cyber-physischen-Produktionsmodule gekapselt. Eine Modularisierung der Produktionsmodule auf Basis von Bausteinen (CPS) stellt neue Anforderungen an die I4.0-Anlage. Die **SmartFactory^{KL}** zeigt eine prototypische Implementierung dieser gekapselten Funktionalität auf Modulebene. In einem nächsten Schritt müsste dieser Ansatz verfeinert und auf die Ebene der Produktionsbausteine übertragen werden. Für diese muss definiert werden, welche spezifischen Funktionalitäten und Selbstbeschreibungsfähigkeiten die Bausteine bereitstellen müssen, damit ein übergeordneter Service des Moduls entsteht. Für eine Rekonfigurierbarkeit der I4.0-Anlage fehlt zudem eine standardisierte Schnittstelle auf dieser Ebene, ebenso wie eine fest definierte Interaktion zwischen den Produktionsbausteinen. Hinsichtlich der Produktionsmodule sind des Weiteren flexiblere Service-Architekturen vorstellbar, die eine erhöhte Fertigungstiefe ermöglichen können. Hervorzuheben sind die Bediensysteme der Produktionsmodule, die momentan noch herstellerabhängig und uneinheitlich sind. Die Lösung durch den Einsatz von Augmented Reality und KI bietet eine Hilfestellung für den menschlichen Werker in der Produktion um diese Problematik zu umgehen. Hinsichtlich der Versorgungs-, Integrations- und IT-Ebene bietet die I4.0-Anlage bereits eine Vielzahl von Umsetzungsmöglichkeiten. Besonders hervorzuheben ist die Umsetzung der modularen IT-Systeme, die eine Cloud-to-Cloud-Kommunikation ermöglicht und somit die Voraussetzung für die Aggregation von Informationen in einer solchen Form schafft, wie es die jeweilige Person benötigt.

¹⁰ http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2017/11/SF_WhitePaper_2-1_DE-1.pdf

¹¹ http://smartfactory.de/wp-content/uploads/2018/04/SF_WhitePaper_Safety_3-1_DE_XS-1.pdf

Versionshistorie

Whitepaper SF-1.2: 04/2018

Herausgegeben von

Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V.

Trippstadter Straße 122

67663 Kaiserslautern

T +49(0) 631 20575-3401

F +49(0) 631 20575-3402

Die Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V. (**SmartFactory^{KL}**) ist ein gemeinnütziger Verein des öffentlichen Rechts, eingetragen im Vereinsregister Kaiserslautern.

Vereinsregisternummer: VR 2458 Kai

Vorstand

Prof. Dr. Dr. h.c. Detlef Zühlke,
Technologie-Initiative SmartFactory KL e.V. (CEO)
Andreas Huhmann, HARTING AG & Co. KG
Dr. Thomas Bürger, Bosch Rexroth AG
Dr. John Herold, Belden Electronics GmbH

Wissenschaftlicher Koordinator

Dr.-Ing. Achim Wagner

T +49 (0)631 20575-5237

M achim.wagner@smartfactory.de