

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Flexible Produktion durch Digitalisierung“

von Friedrich Peschke und Carsten Eckardt

Print-ISBN: 978-3-446-45746-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-46058-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45746-1>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Von CIM zur digitalen Fabrik .....	5
1.2 Das digitale Abbild .....	12
1.3 Serviceorientierung und operations model .....	20
1.4 Überblick zu Initiativen und Standards zu Industrie 4.0 .....	21
1.4.1 Die Entstehung der Initiative „Industrie 4.0“ .....	21
1.4.2 Die Plattform Industrie 4.0 .....	22
1.4.3 BITKOM .....	24
1.4.4 ZVEI .....	25
1.4.5 VDMA .....	26
1.4.6 SCI – deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0 .....	26
1.4.7 OPC Unified Architecture .....	28
1.4.8 ADAMOS – ein Standard im Maschinen- und Anlagenbau ..	28
1.4.9 PLCopen .....	29
1.4.10 PLCnext .....	30
1.4.11 VDW-Initiative „UMATI“ .....	32
<b>2 Herausforderungen im Zusammenhang mit Digitalisierung</b> ....	<b>37</b>
2.1 Digitalisierung der Organisation .....	45
2.1.1 Unternehmensgröße .....	48
2.1.1.1 Großunternehmen .....	49
2.1.1.2 Mittelstand .....	55
2.1.1.3 Klein- und Kleinstunternehmen .....	57
2.1.2 Herangehensweise .....	58
2.1.3 Industriesektor/Branche .....	61
2.1.4 Fazit .....	62
2.2 Digitalisierung und Geschäftsprozesse .....	63

2.3	Digitalisierung der Applikationen (IT) .....	72
2.4	Digitalisierung der Produktions-Infrastruktur .....	81
2.4.1	Produktionsanlagen .....	81
2.4.2	Operations Technology (OT)-Architektur .....	87
2.5	Interoperabilität und Sicherheit .....	90
2.5.1	Kommunikation im industriellen Umfeld .....	91
2.5.2	Informations- und Datensicherheit .....	102
<b>3</b>	<b>Lösungsansätze zur Entwicklung von Digitalisierungs-Use Cases .....</b>	<b>105</b>
3.1	Lösungsansätze am Produkt .....	110
3.2	Lösungsansätze am Produktionsprozess .....	124
3.2.1	Ansätze der Planung .....	133
3.2.1.1	Kundenbedarfe und Bedarfsplanung .....	134
3.2.1.2	Kapazitätsplanung und Ressourcenmanagement .....	135
3.2.1.3	Dynamische Feinplanung .....	137
3.2.2	Ansätze der Ausführung (Execution) .....	139
3.2.2.1	Fertigungstypologie .....	142
3.2.2.2	Dynamische Arbeitspläne .....	146
3.2.3	Ansätze der Überwachung (Monitoring) .....	147
3.2.3.1	Transparenz in der Produktion .....	147
3.2.3.2	Nachverfolgbarkeit .....	149
3.2.3.3	Data Analytics .....	152
3.2.4	Ansätze für Prognose und Verbesserung .....	153
3.2.5	Fallbeispiele .....	154
3.3	Lösungsansätze in der Produktionsinfrastruktur .....	156
3.3.1	Die Produktionseinheit .....	160
3.3.2	Die Fertigungslinie .....	162
3.3.3	Die hybride Fertigung .....	164
3.3.4	Die Montage .....	165
3.3.5	Unterstützende Methoden und Komponenten .....	172
<b>4</b>	<b>Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung von Digitalisierungs-Use Cases .....</b>	<b>177</b>
4.1	Elemente des Vorgehensmodells .....	178
4.2	Das SCOR®-Referenzprozessmodell .....	180
4.2.1	SCOR®-Prozesse .....	184
4.2.1.1	Subprozesse für die Planung (plan, sP3) .....	185
4.2.1.2	Subprozesse für die Produktion (make, sM3) .....	187
4.2.1.3	Subprozesse für Support (enable, sE) .....	190

4.2.2	SCOR®-Practices .....	193
4.3	Standard zur Integration von Unternehmens- und Betriebsleitebene, ISA95 (DIN EN 62264) .....	195
4.4	Technology Enabler .....	204
4.5	Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung von Digitalisierungs- Use Cases .....	206
4.5.1	Schritt 1 – Scoping (Umfangsdefinition) .....	209
4.5.2	Schritt 2 – Assessment (Bewertung) .....	211
4.5.3	Schritt 3 – Identification (Identifikation) .....	212
4.5.4	Schritt 4 – Selection (Auswahl) .....	215
4.6	Anwendungsbeispiel „Maschinendatenerfassung (MDE)“ .....	222
4.6.1	Schritt 1 – Scoping MDE .....	222
4.6.2	Schritt 2 – Assessment MDE .....	223
4.6.3	Schritt 3 – Identification MDE .....	224
4.6.4	Schritt 4 – Definition MDE .....	225
4.6.5	Fazit zum Anwendungsbeispiel .....	228
4.7	Erfahrungswerte und Use Cases aus der Literatur .....	230
4.7.1	Use Cases aus einer Studie zu Industrie 4.0 für den österreichischen Mittelstand .....	231
4.7.2	Use Cases für Werkzeugmaschinen aus UMATI .....	231
4.7.3	Use Cases aus dem Kooperationsprojekt Enterprise 4.0 ....	232
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>235</b>
5.1	Motivation .....	235
5.2	Vorliegendes Ergebnis .....	236
5.3	Handlungsbedarf und Ausblick .....	238
<b>6</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>241</b>
<b>Index</b>	<b>.....</b>	<b>247</b>

# Vorwort

Die Flexibilisierung der Produktion im Sinne von dynamischer Anpassungsfähigkeit eines Produktionssystems an volatile Rahmenbedingungen ist sicher eine der Hauptherausforderungen für die Industrie angesichts der immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und des stark steigenden Individualisierungsgrades von Produkten. Die Vision von Industrie 4.0 und *Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS)* adressiert insbesondere diesen Themenkomplex. Auch wenn viele grundsätzliche Konzepte und Überlegungen zu flexiblen Produktionssystemen und zur Realisierung der sogenannten „Losgröße 1“ nicht neu sind und im Rahmen von *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* bereits vor längerer Zeit entwickelt wurden, führt der rapide technologische Fortschritt der letzten Jahre dazu, dass auch die Umsetzung in greifbare Nähe rückt. Die Omnipräsenz von Internet und Cloud Services, die Verfügbarkeit einer schnellen Dateninfrastruktur und leistungsfähige Kleinstrechner haben das *Internet of Things (IoT)* möglich gemacht. Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens ermöglichen heute die softwaretechnische Umsetzung von Lösungen, die vor 20 Jahren noch nicht realisierbar waren. Ebenso hat sich eine Reihe von Standards auf unterschiedlichen Ebenen entwickelt und verbreitet, die für ein Miteinander unterschiedlicher Systemkomponenten unabdingbar sind. Es reift offenbar die Erkenntnis seitens der Softwarehersteller, dass geschlossene Ökosysteme und proprietäre Schnittstellen in eine Sackgasse führen.

Im Vergleich zu früher sind also die technologischen Voraussetzungen vorhanden. Das Thema Industrie 4.0 ist breit in der Öffentlichkeit angekommen und die Bedeutung der Produktion für die Gesellschaft ist weit verbreitet anerkannt. Was sind also die Hürden bei der Umsetzung von Industrie 4.0? Sie sind vielschichtig. Industrie 4.0 wird stark aus der „Vogelperspektive“ heraus diskutiert. Themenfelder wie operative Exzellenz in der Produktion im Sinne einer graduellen Weiterentwicklung der Automatisierungstechnik hin zu Systemen mit autonomen und selbstoptimierenden Eigenschaften werden vermischt mit der Erschließung neuer und disruptiver Geschäftsmodelle auf Basis von IoT. Software- und Systemhäuser sowie Industrieausrüster bieten hervorragende Lösungen und Software-Pakete mit weit-

reichendem Funktionsumfang, aber die Komplexität und der Integrationsaufwand im speziellen betrieblichen Umfeld sind doch oft erheblich. Vor allem mangelt es bei vielen Industrieunternehmen jedoch an der notwendigen Reife im Hinblick auf Prozess- und Datenqualität. Vieles geschieht auf Zuruf bzw. mit informeller Kommunikation; „U-Boot“-Applikationen und persönliche „Arbeitsformate“ (MS Excel) sind schwierig zu eliminieren und damit wird der zu tätige Sprung für eine erfolgreiche Implementierung oft zu groß. Auch an die persönlichen Qualifikationen werden enorm hohe und interdisziplinäre Anforderungen gestellt, sowohl auf Seiten der Industrieunternehmen als auch auf Seiten der Lösungsanbieter. Der einmalige Wissensaufbau z. B. durch eine akademische Bildung reicht nicht aus, zukünftig ist die kontinuierliche Kompetenzerweiterung ein Muss, um die digitale Transformation in den Unternehmen Realität werden zu lassen. Der Mangel an Personalkapazität, welche mit den erforderlichen Kompetenzen ausgestattet ist, stellt ein wesentliches Umsetzungs- und damit Wachstumshemmnis dar und muss beseitigt werden.

Es sind unterschiedliche IT-Systeme wie PDM, ERP und MES mit unterschiedlichen inhaltlichen Anwendungsschwerpunkten, aber auch funktionalen Überlappungen im Einsatz, um das erforderliche Informationsmanagement über den gesamten Produktlebenszyklus abzudecken. Der Produktlebenszyklus ist jedoch nicht so eindimensional, wie er oft dargestellt wird. In den Unternehmen werden viele Produkte gleichzeitig entwickelt. Gleiche Komponenten werden in unterschiedlichen Produkten oder Produktvarianten verwendet. Was für den *Original Equipment Manufacturer (OEM)* eine Komponente ist, ist für den Zulieferer das Endprodukt. Das gleiche Produkt wird in unterschiedlichen Werken gefertigt mit unterschiedlichen Komponenten, die von lokalen Zulieferern kommen. Dementsprechend gibt es unterschiedliche Klassen von Informationen, die auf verschiedenartige Weise verarbeitet werden müssen. Im Engineering stehen oft modellhafte Beschreibungen von Artefakten im Vordergrund. In der Produktion werden auftragsbezogene Daten sowie Zeitreihendaten aus dem Produktionsprozess, teilweise im Millisekundenbereich, aufgenommen und verarbeitet. Diese werden entweder direkt zur Optimierung des Produktionsprozesses oder als Basisinformation für vor- und nachgelagerte Prozesse (z. B. Qualitätsdaten) herangezogen. In der Betriebsphase eines Produktes interessieren vor allem die Informationen, welche für Wartungs- und Serviceaktivitäten relevant sind. In diese fließt der individuelle Kontext bzw. die Umgebungsbedingungen, unter denen ein Produkt betrieben wird, mit ein. Sie gelten also nicht oder nur bedingt für eine Produktklasse, sondern nur für eine bestimmte Instanz eines Produktes. Oft verschwimmend dargestellt ist die Tatsache, dass ein Produktionssystem letztendlich auch ein komplexes Produkt ist, welches selbst entwickelt und produziert werden muss und in seiner Betriebsphase dazu dient, andere Produkte zu produzieren. Die Informationsverarbeitung im industriellen Umfeld bezogen auf Produktentwicklung, -herstellung und -betrieb

verschmilzt also einerseits, andererseits muss für die Umsetzung bzw. Implementierung von Industrie 4.0-Lösungen schon das komplexe Informationsgeflecht entwirrt werden, um jede Teilfunktion und jeden Teilprozessschritt zufriedenstellend zu realisieren.

Es gibt also keine generelle Industrie 4.0-Lösung für bestimmte Branchen oder Unternehmenstypen. Selbst Best Practices sind schwierig bzw. nur für überschaubare Ausschnitte zu identifizieren. Daraus und aus der oben beschriebenen Komplexität resultieren jeweils eine individuelle IT-Bebauung und eine Vielzahl unternehmensspezifischer Konzepte. Dessen muss man sich bewusst sein und es daher in die gestalterischen Aufgaben eines Unternehmens aktiv einbeziehen.

Das Buch trägt dazu bei, Klarheit in das skizzierte komplexe Themenfeld der digitalen Produktion zu bringen, und hilft daher Verantwortungs- und Entscheidungsträgern in den Bereichen Digitalisierung, IT, Operations, Automatisierung, Produktion und Engineering, Orientierung zu erlangen, um entsprechende Digitalisierungsanwendungsfälle zu identifizieren und die Grundlage für eine zielgerichtete Umsetzung zu schaffen.

Wien, im März 2019

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard*

Dekan der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität Wien

Leiter des Forschungsbereichs Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung und der TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0

# 3

## Lösungsansätze zur Entwicklung von Digitalisierungs-Use Cases

Lösungsansätze zur Entwicklung von Digitalisierungs-Use Cases orientieren sich an neuen oder vorhandenen und neuartig einsetzbaren Technologien vor allem aus dem Informations- und Kommunikationsbereich. Diese werden dort im Produktionsprozess implementiert, wo sie einen messbaren Nutzen am Informations-, Material- bzw. Energiefluss ermöglichen. Planung und Steuerung des Produktionsprozesses sollen verbessert werden und durch zeitnahe Rückmeldungen mittels intelligenter Datenverarbeitung wird die Befähigung zur Selbstoptimierung angestrebt. Abhängig vom Produktionstyp soll das Operationsmodell flexibilisiert und die Wettbewerbsfähigkeit innerhalb der Wertschöpfungskette verbessert werden.

Durch eine serviceorientierte Applikationslandschaft und die Nutzung von Cloud-Plattformen werden Maschinen, Sensoren und weitere Produktionsobjekte unter Beachtung aller relevanten Sicherheitsanforderungen mit den IT-/OT-Systemen integriert.

Die Diskussion ausgewählter Lösungsansätze wird nachfolgend in drei Kategorien durchgeführt:

1. Mit dem Fokus auf den *Produktionsgegenstand, das Produkt*: Dazu werden die Aspekte des digitalen Abbilds, der intelligenten Komponente (CPS) und der Integration in eine IoT-Plattform beleuchtet.
2. Mit dem Fokus auf den *Produktionsprozess*: Dazu werden Möglichkeiten der Digitalisierung am Geschäftsprozessmodell, am operations model, explizit für die Phasen der Planung, der Ausführung, Überwachung und Verbesserung diskutiert.
3. Mit dem Fokus auf die *Produktionsinfrastruktur*: Dazu werden Digitalisierungsansätze an einer Produktionseinheit, einer Produktionslinie, unter Berücksichtigung des Produktionstyps betrachtet.

Durch die Anwendung neue Lösungsansätze und -bausteine werden

- die Informationsaufnahme am Shopfloor, deren Weiterleitung, Verarbeitung, Visualisierung und deren Rückführung in Geschäftsapplikationen hergestellt,



- eine zielgerichtete Integration von Mensch (Werker), Maschine (Werkzeugmaschine, Roboter, Transportsystem) und Produkt (Produktionsgegenstand) entlang des Wertschöpfungsprozesses verbessert bzw. erst ermöglicht,
- Ziele zur Steigerung der Effizienz und Flexibilität erreicht bzw.
- neue Servicemodelle ermöglicht.

Digitalisierung kann auf Basis von radikalen (disruptiven) Ansätzen erfolgen, wie z. B. mittels redesign von Geschäftsprozessen, -modellen und -architekturen. Im Gegensatz dazu beruhen inkrementelle Ansätze auf Anwendungsfällen (Use Cases) und orientieren sich an konkreten Anforderungen vom Shopfloor.

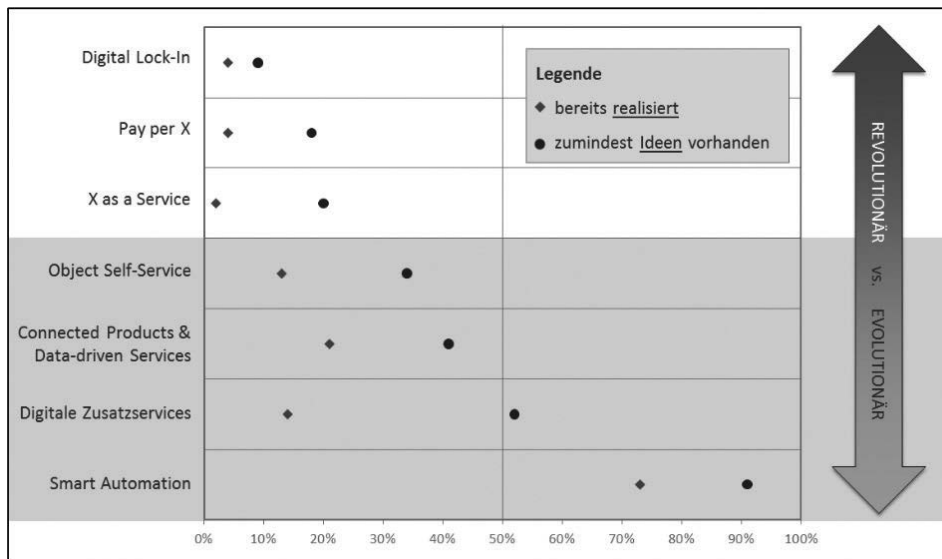
**Tabelle 3.1** Unterscheidung von Digitalisierungsansätzen

	Radikal/disruptiv	Inkrementell/iterativ
Ansatz	Greenfield, top-down	Brownfield, bottom-up
Vorgehen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Redesign von Prozessmodell, Geschäftsarchitektur</li> <li>▪ Neudefinition des Produkt-/Service-Portfolios</li> <li>▪ Einsatz neuer Technologien, Design neuer Systemarchitekturen und Layouts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ einzelne oder kombinierte Use Cases auf Basis von konkreten Anforderungen</li> <li>▪ Adaption bestehendes Prozessmodell, Geschäftsarchitektur</li> <li>▪ Anpassung des Produkt-/Service-Portfolios</li> <li>▪ selektive Technologieanpassung und -austausch</li> </ul>

Ein Beispiel für ein *disruptives Geschäftsmodell* stellt der Ansatz des Maschinenherstellers Trumpf Maschinen dar, welcher durch Akquisition des IoT-Plattformdienstleisters Axoom die Verarbeitung von Maschinendaten seiner Kunden als Service, z. B. für vorausschauende Instandhaltung, entwickelt hat. Damit hat Trumpf nicht nur sein Geschäftsmodell von Maschinenherstellung und Verkauf auf Wartung und Service umgestellt, sondern über die Akquisition einer Serviceplattform das Servicegeschäft auf Basis von Betriebsdaten erschlossen.

Als Beispiel für eine *inkrementelle Anwendung* kann an dieser Stelle die Anpassung des Produktionsprozesses durch die Installation von Sensorik angeführt werden. Damit wird die Erfassung von Betriebszuständen passiver Komponenten, wie z. B. eines Lagerbehälters oder eines Transportsystems, ermöglicht und eine Verbesserung der Prozessüberwachung und -steuerung herbeigeführt.

Auf Basis dieser Ansätze können Anwendungsfälle bzw. Szenarien entwickelt und bestehende Betriebsmodelle adaptiert werden. Marktuntersuchungen [Breitfuß 2017] zeigen in Bezug auf den Umsetzungsgrad von Digitalisierungsansätzen folgendes Bild 3.1.



Realisierungsgrad der Geschäftsmodellmuster

**Bild 3.1** Marktanalyse zu Realisierungsansätzen für Digitalisierung [Breitfuß 2017]

Das Bild 3.1 zeigt Realisierungsgrade von Digitalisierungsansätzen aus den Kategorien evolutionär bzw. revolutionär (radikal). Diese wurden als relative Häufigkeit von Unternehmen, welche das jeweilige Muster als Idee angedacht hatten oder bereits realisiert haben, dargestellt.

Darin weist der evolutionäre Ansatz „*smart automation*“ mit Abstand den höchsten Realisierungsgrad auf. Fast 75 % der befragten Unternehmen haben diesen Ansatz bereits realisiert und bei weiteren fast 20 % sind zumindest Ideen dafür vorhanden. Damit könnte man diesen als Einstiegsthema für Digitalisierung für die befragte Zielgruppe ansehen. Weitere umgesetzte, evolutionäre Ansätze folgen mit einem Abstand von ca. 40 % relativer Häufigkeit.

Auffällig ist auch der recht große Abstand zwischen den tatsächlichen Realisierungen und dem Vorhandensein von Ideen zum Ansatz für „*digitale Zusatzservices*“. Über 50 % der befragten Unternehmen denken demnach zwar über das Angebot digitaler Zusatzservices nach, realisiert wurden diese allerdings bisher nur bei rund 15 % der Unternehmen.

Generell lässt sich aus der Darstellung ablesen, dass die als revolutionär eingestuftten Ansätze einen deutlich geringeren Realisierungsgrad aufweisen als die als evolutionär eingestuftten Ansätze.

### Beispiele von Digitalisierungs-Use Cases

Nachfolgend wird eine Auswahl an Digitalisierungs-Use Cases aus [Breitfuß 2017] angeführt.

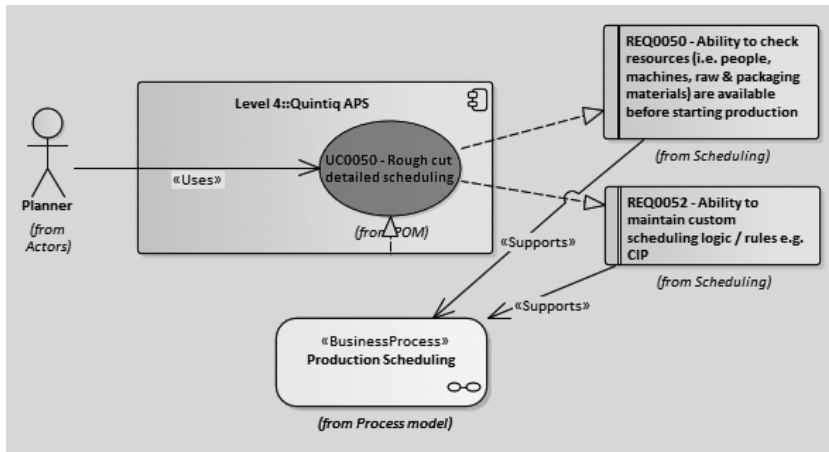
1. Big-data-getriebene Qualitätskontrolle: Ermittlung von Qualitätsproblemen und weniger Produktausfälle durch auf historischen Daten basierende Algorithmen
2. Selbstfahrende Logistikfahrzeuge: Vollautomatische Systeme für einen reibungslosen innerbetrieblichen Transport
3. Robotergestützte Produktion: Übernahme von Montage-, Verpackungs- und anderen Arbeiten durch flexible, humanoide Roboter
4. Simulation von Produktionsanlagen: Neuartige Softwarelösungen für die Simulation und Optimierung von Montageanlagen
5. Intelligentes Liefernetzwerk: Bessere Lieferentscheidungen durch die Überwachung des Liefernetzwerks
6. Vorausschauende Instandhaltung: Durchführung von Reparaturen, schon bevor es zum Ausfall einer Anlage kommt, dank remote monitoring
7. Maschinen als Dienstleistung: Bereitstellung einer Maschine einschließlich Instandhaltung
8. Sich selbst organisierende Produktion: Automatische Koordination und Optimierung der Auslastung durch die Montageanlage selbst
9. Additive Fertigung komplexer Teile: Erstellung komplexer Teile durch 3D-Drucker in einem Schritt, ohne dass eine spätere Montage erforderlich ist
10. Augmented reality: Virtuelle Unterstützung bei der Vorbereitung (Planung, Schulung) und Durchführung von Werker-Tätigkeiten

Die Auswahl zeigt unterschiedliche Handlungsfelder für Digitalisierung auf, von der Infrastruktur über Produktionstechnologien oder Datenservices.

### Beschreibungsformat Anwendungsfall (Use Case)

In der Disziplin der Software-Entwicklung versteht unter einem Use Case (Anwendungsfall) ein einzelnes UML-Element (Unified Modeling Language), welches die Anforderungen an ein einzelnes System (Software) erfasst. Jedes UML-Element repräsentiert ein Anwenderziel im Rahmen einer Interaktion mit diesem System. Im Use Case-Diagramm werden die funktionalen Systemanforderungen und die Beziehungen zwischen Akteuren und Use Cases grafisch dargestellt.

Bild 3.2 zeigt in vereinfachter Form einen Use Case, verortet mit einer Applikation „Qunitiq APS“ auf der Systemebene 4. Dieser wird von einem *Akteur* „Planner“ ausgeführt und unterstützt zwei Anforderungen, welche einem business process zugeordnet sind. Unter einem Akteur wird eine Rolle, Person oder Maschine verstanden, welche mit einem System interagiert.



**Bild 3.2** Vereinfachte Darstellung Use Case-Diagramm

Unter einem *Szenario* wird eine Kurzbeschreibung verstanden, welche darstellt, wer das System benutzt und welches Ergebnis damit erreicht werden soll. Es beinhaltet die einzelnen Schritte, welche durch einen Akteur durchgeführt werden mit jeweils einem Systemstatus und Ergebnis. Die Abfolge dieser Schritte wird als *Sequenz* bezeichnet und kann in einem Aktivitätsdiagramm grafisch dargestellt werden.

Am Use Case können verschiedene Sichten und Objekte verankert werden:

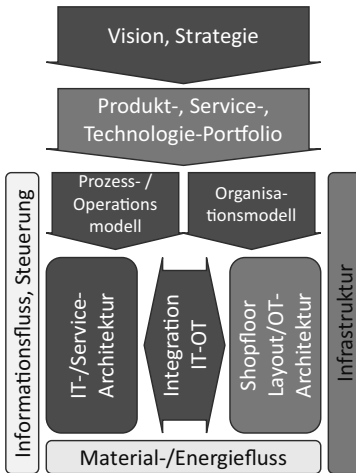
- Verortung in der Systemarchitektur (Ebenenmodell ISA95)
- Definition von Akteuren
- Definition von Anforderungen nach Zielgruppen
- Definition von Funktionsbausteinen (Applikationen)
- Definition von Prozesselementen (Referenzmodell SCOR®)

Die Ansätze zur Digitalisierung bedienen sich i. d. R. der Methoden der (modellbasierten) Software-Entwicklung, weshalb geeignete Formate für die Beschreibung von Digitalisierungs-Anwendungsfällen herangezogen werden.

Im Kapitel 4 „Vorgehensmodell“ wird eine Vorlage zur Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Digitalisierungs-Use Cases vorgestellt. Ausgehend vom Kernprozess werden dafür Anforderungen unterschiedlicher Zielgruppen erfasst und bewertet. Auf Basis von Lösungsansätzen am Produkt, Prozess und der Infrastruktur, durch Auswahl und Bewertung sog. Technology Enabler und practices (Methoden) werden Use Cases definiert und entsprechend ihrer Umsetzbarkeit priorisiert.

## ■ 3.1 Lösungsansätze am Produkt

Ausgehend von den genannten Herausforderungen und Hemmnissen steht das CPS bzw. die Industrie 4.0-Komponente im Mittelpunkt der Lösungsansätze am Produkt bzw. am Produktionsgegenstand. Mit Bezug auf eine generalisierte Geschäftsarchitektur Industrie 4.0 werden dazu folgende Felder betrachtet:



**Bild 3.3**

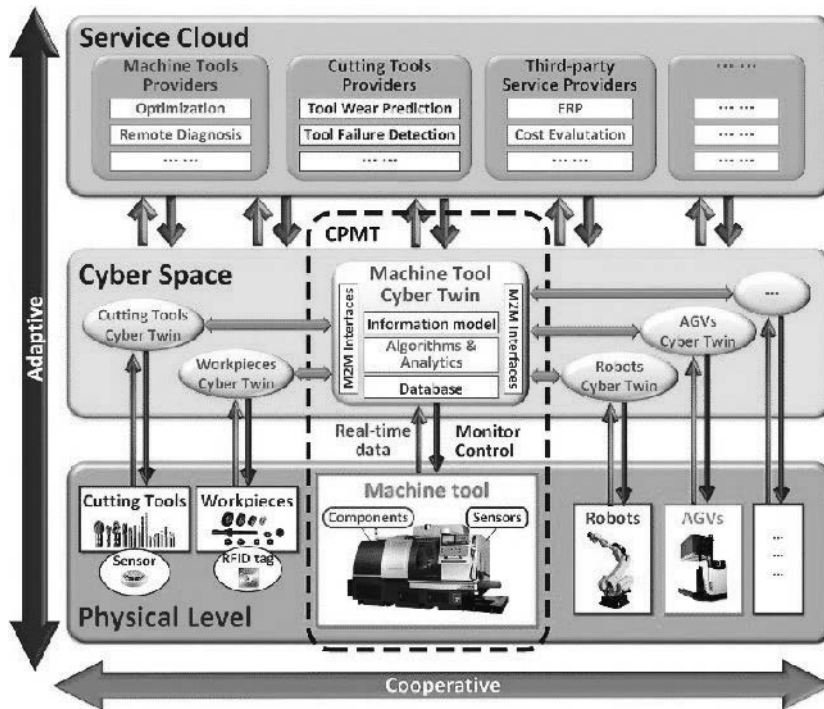
Generalisierte Industrie 4.0-Architektur

*Produkte* werden demnach in den Feldern des Portfolios, des Shopfloor und der Infrastruktur abgebildet. In einem Fall wird unter dem Produkt der Produktionsgegenstand (Werkstück) und im anderen Fall die Komponente der Produktionsinfrastruktur (Maschine, Sensor etc.) verstanden. Lösungsansätze zur Digitalisierung am Produkt können in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Ausrüstung des Produktes mittels Sensorik, Logik und Intelligenz → Digitalisierung, Industrie 4.0-Befähigung
- Anbindung bzw. Integration des Produkts in den Wertschöpfungsprozess oder in die Servicearchitektur (Plattform) → Aufbau eines CP(P)S

Nach dem Modell des digitalen Abbildes (Cyber/Digital Twin) lassen sich „Produkte“ in eine Servicearchitektur wie folgt integrieren, Bild 3.4.

Die adaptive Servicearchitektur wird zwischen dem Shopfloor, der Applikationsschicht (IIoT-Plattform) und der Service-Cloud aufgebaut. Das Werkzeug, das Werkstück, Handhabungsgeräte und die Werkzeugmaschine (Cyber Physical Machine Tool, CPMT) werden als digitales Abbild in der Applikationsschicht implementiert und über M2M-Schnittstellen miteinander integriert.

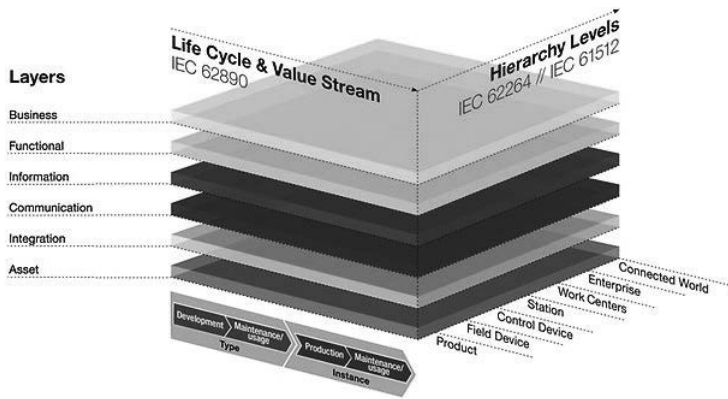


**Bild 3.4** Servicearchitektur für eine digitalisierte Werkzeugmaschine (CPMT) [Liu/Xu 2017]

Über Sensoren, tags und gateways werden Prozessdaten in Echtzeit an die Applikationsschicht gemeldet. Die Plattform verwaltet das Datenmodell des digitalen Abbildes, stellt Analysefunktionen und die zentrale Datenbasis (data lake) bereit. Weitere Services von Werkzeug- oder Maschinenlieferanten werden aus der Service-Cloud bezogen und über die Plattform bereitgestellt. Auf Basis der Auswertungen werden Steuerungs- bzw. Korrekturbefehle an den Shopfloor zurückgesendet.

### Aufbau einer Industrie 4.0-Komponente

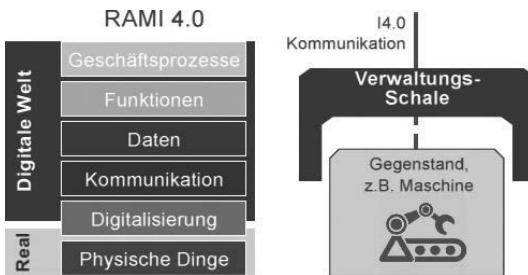
Für die Entwicklung eines CPS bzw. für die Industrie 4.0-Befähigung existierender Produkte werden geeignete Strukturen und Spezifikationsrahmen benötigt. Wie bereits angeführt, stellt die Komponentenspezifikation aus dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0, DIN SPEC 91345) dafür einen geeigneten Beschreibungsvorschlag bereit.



**Bild 3.5** RAMI 4.0 [Plattform Industrie 4.0 und ZVEI]

Das Referenzarchitekturmodell wird grafisch als Würfel dargestellt, in welchem die Dimensionen Spezifikationsebene, Lebensphasenmodell nach IEC 62890 und Hierarchieebenen nach IEC 62264/61512 aufgespannt werden. Auf Basis dieser Dimensionen werden die Voraussetzungen für eine digital vernetzte Kommunikation zwischen Produktionsobjekten definiert.

Eine *Industrie 4.0-Komponente* wird darin wie folgt definiert, Bild 3.6:



**Bild 3.6**  
Industrie 4.0-Komponente [Plattform Industrie 4.0 und ZVEI]

- Eine Komponente besteht aus einer digitalen Verwaltungsschale und einem realen physischen Objekt.
- Die Verwaltungsschale dient als Übersetzer in der Kommunikation der Komponente mit ihrer Umgebung und stellt einen Datenspeicher bereit.
- Der Informationsaustausch einer Komponente mit ihrer Umgebung erfolgt über einen Kommunikations-Layer.

Jede Komponente verfügt über eine eigene Verwaltungsschale. In dieser werden sämtliche Informationen und Funktionalitäten in Teilmodellen beschrieben. Mehrere Komponenten können zu einer Einheit mit einer gemeinsamen Verwaltungsschale verbunden werden.



Zusammenfassung RAMI 4.0-Verwaltungsschale:

- Die Verwaltungsschale ist eine generische Möglichkeit, Informationen für Industrie 4.0-Use Cases zusammenzustellen,
- ist skalierbar und erweiterbar und erstreckt sich über alle Phasen der Komponenten (asset)-Lebenszyklen – vom Design über den Betrieb bis hin zur Instandhaltung.

Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 bildet damit die Grundlage für die Entwicklung von intelligenten bzw. smarten Produkten bzw. von Cyber Physical Production Systems (CPPS).

### Cyber Physical System (CPS)

Laut [Capgemini 2014] zeichnen sich CPS dadurch aus, dass diese Funktionen und Eigenschaften auf Basis von erweiterter Konnektivität mit ihrer Umgebung aufweisen.

Die Fähigkeit zur Selbstverwaltung und -steuerung wird als eine Voraussetzung für dezentrale Entscheidungsprozesse und autonome Betriebsmodelle angesehen. CPS sind mit Sensoren ausgestattet, welche Informationen über aktuelle Betriebs- oder Umgebungszustände für eine weitere Verarbeitung bereitstellen.

Sensordaten werden an Aktuatoren übertragen, welche selbstgesteuerte Aktionen ausführen. Durch die Konnektivität und erweiterte Kommunikationsfähigkeiten werden CPS befähigt, mit anderen Geräten, wie z. B. Maschinen, Robotern, Transportsystemen, Akteuren, Informationen auszutauschen, Steuerungsbefehle zu erhalten bzw. Rückmeldungen zu liefern.

Darüber hinaus sind CPS in der Lage, ihre Funktionen an bestimmte Bedingungen aus der Umwelt oder abhängig vom Prozess selbständig anzupassen. Durch Konfiguration kann beispielsweise eine selbstoptimierende Instandhaltung realisiert werden.



CPS lassen sich anhand folgender Kriterien klassifizieren:

- die Möglichkeit des Zugriffs auf Zustandsinformationen (Status, Ort, Eigenschaften) eines Produktionsgegenstandes,
- die Fähigkeit, mit anderen „Akteuren“, wie z. B. Maschinen, Transportsystemen, Programmen, Werkern etc., Daten auszutauschen bzw. zu kommunizieren (M2M, HMI, Product to process communication),
- die Verfügbarkeit von Rechenleistung und Datenspeichern zur Selbststeuerung und -überwachung, zur Dateninterpretation und zum Wissensaufbau (*machine learning*),
- die Verfügbarkeit von Intelligenz zur autonomen Funktionsanpassung und Konfiguration auf Basis externer und interner Daten und
- die Konnektivität für einen kontinuierlichen Datenaustausch als Grundlage für Analyse, Prognose und kontinuierliche Verbesserung eines Produktionssystems.



Mithilfe von CPS können digitale Servicemodelle (value based services) entwickelt werden.

### **Modellbildung für Industrie 4.0 [Schleipen 2016]**

Im VDI-GMA Fachausschuss 7.21 „Industrie 4.0“ wird in Arbeitsgruppen unter Berücksichtigung von bestehenden Normen und Standards aus den Bereichen IKT und Produktion an einem einheitlichen Verständnis und an einem Referenzarchitekturmodell gearbeitet. Dieses Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0, kurz RAMI 4.0, wurde mit der DIN SPEC 91345 weiterentwickelt und dient der Architekturbeschreibung für Industrie 4.0. Auf Basis dieses Modells können branchen- oder unternehmensspezifische Modelle entwickelt werden.

RAMI 4.0 basiert auf bereits existierenden internationalen Standards, wie z. B. der IEC 62264. Dabei werden der Lebenslauf und die Architektur von Produktionsobjekten (assets) mit organisatorischen Hierarchien dreidimensional in Relation gesetzt, Bild 3.5.

Auf der vertikalen Achse des RAMI 4.0 sind die sechs Ebenen der Repräsentation von Industrie 4.0-Objekten verankert. Diese werden wie folgt unterschieden:

- **Business:** Geschäftsmodelle und der sich daraus ergebende Geschäftsprozess. Hier wird die Integrität der Funktionen in der Wertschöpfungskette sichergestellt.
- **Functional:** Laufzeit- und Modellierungsumgebung für Dienste, welche Geschäftsprozesse unterstützen.
- **Information:** Laufzeitumgebung für die Ereignis(-vor-)verarbeitung.
- **Communication:** Vereinheitlichung der Kommunikation unter Verwendung eines einheitlichen Datenformats.
- **Integration:** Bereitstellung der rechnerverarbeitbaren Informationen der Assets.
- **Asset:** Repräsentation der Realität, beispielsweise technischer Gegenstand (z. B. Maschine).

Da es für Industrie 4.0 aktuell keinen einheitlichen, allumfassenden Standard gibt und RAMI 4.0 selbst bereits auf unterschiedlichen Standards basiert, werden noch weitere Standards benötigt. Unter anderem sind dies:

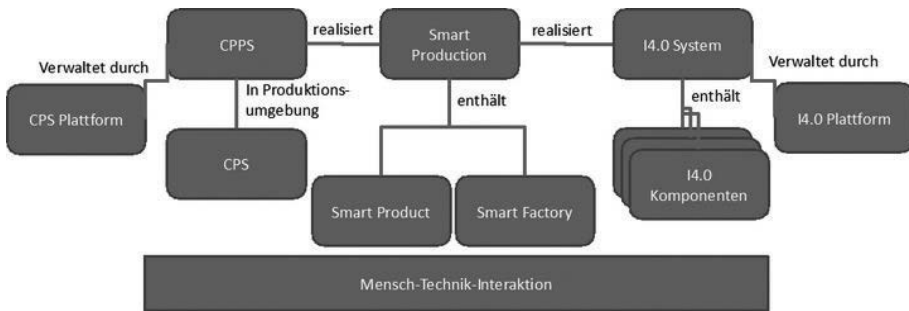
- **OPC UA (IEC 62541)** für die Kommunikationsschicht zwischen Shopfloor und Geschäftsapplikationen und
- **AutomationML (IEC 62714)** für das systems engineering der Produktionsobjekte.

Diese beiden Standards sind für den größtmöglichen Grad an Interoperabilität zwischen Objekten ausgelegt und weisen zur Harmonisierung mit weiteren Standards folgende Merkmale bzw. Hilfen auf:

- OPC UA bietet mit den companion specifications eine Möglichkeit, andere Standards in ein einheitliches Informationsmodell zu integrieren. Dabei kann zwischen Modelldefinition und -mapping unterschieden werden:
  - OPC UA definiert Informationsmodelle für die allgemeine Beschreibung von Geräten.
  - OPC UA definiert mapping-Regeln zur Transformation von AutomationML-Modellen in ein OPC-UA-Informationsmodell.
- OPC UA stellt mit Hilfe von node sets die Basis für das Informationsmodell zur Verfügung. Mit Beispielcodes und Programmierhilfen werden Entwickler unterstützt. Darüber hinaus wird ein conformance test tool (CTT) bereitgestellt.
- AutomationML bietet verschiedene Möglichkeiten an, um Verbindungen zu anderen Standards zu schaffen:
  - AutomationML unterstützt die Integration anderer Dateiformate z. B. für Logik oder Geometrie und definiert normative Regeln, wie dies zu realisieren ist.
  - AutomationML unterstützt die Verlinkung externer Beschreibungen, z. B. Dokumentationen in Form von PDF oder alternative Geometrieformate wie STEP, und definiert in einer Best Practice Recommendation, wie dies zu realisieren ist.
  - AutomationML bietet die Möglichkeit, Attributen eine externe Semantik zuzuordnen. Regeln hierfür sind in einem whitepaper beschrieben.
- AutomationML stellt mit Bibliotheken die Basis für die Datenmodellierung zur Verfügung. Durch Bereitstellung eines grafischen AML-Editors und Programmierschnittstellen in Form einer AML-Engine werden Entwickler bei ihrer Arbeit unterstützt. Nach abgeschlossener Modellierung gibt es weitere Unterstützung durch das AML-Testcenter des Fraunhofer IOSB.

Der Aufbau und die Arbeitsweise einer Industrie 4.0-Komponente ist in der *DIN SPEC 91345* als Referenzmodell für technische Gegenstände (Assets) bzw. für deren virtuelle Repräsentationen in Industrie 4.0-Systemen bzw. CPPS enthalten. Damit kann der Produktionsgegenstand mit all seinen relevanten Eigenschaften und Aspekten in allen Phasen des Lebenszyklus durch eine Industrie 4.0-Komponente repräsentiert werden. In Bild 3.7 sind die wesentlichen Begriffe dazu dargestellt.

- Ein *smart product* ist ein hergestelltes Produkt, ein Artikel oder Halbzeug bzw. der Produktionsgegenstand selbst, welcher in einer *Smart Factory* die Fähigkeit zur Vernetzung und zur intelligenten Interaktion mit anderen Produktionsteilnehmern aufweist [Schleipen 2016]. Das *digitale Abbild* ist Teil der Produktintelligenz und kann auf dem Produkt selbst, aber auch räumlich entfernt davon implementiert sein. In RAMI 4.0 werden weitere Begriffe unterschieden, Bild 3.7.



**Bild 3.7** Begrifflichkeiten RAMI 4.0 [Schleipen 2016]

- Ein Cyber Physical Production System (CPPS) ist dabei definiert als ein CPS, welches in der Produktion eingesetzt wird. Ein Cyber Physical System (CPS) ist ein „System, das reale (physische) Objekte und Prozesse verknüpft mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze. Optional nutzt ein CPS lokal oder entfernt verfügbare Dienste, verfügt über Mensch-Maschine-Schnittstellen und bietet die Möglichkeit zur dynamischen Anpassung des Systems zur Laufzeit“.
- Ein Industrie 4.0-System ist ein „System aus Industrie 4.0-Komponenten und Komponenten geringerer CP-(communication presentation)-Klassifizierung, das einem bestimmten Zweck dient, definierte Eigenschaften aufweist und standardisierte Dienste und Zustände unterstützt. Das System kann als Komponente in einem weiteren Industrie 4.0-System auftreten. Das Industrie 4.0-System muss eine Relation zur Industrie 4.0-Plattform definieren“.
- Eine Industrie 4.0-Komponente ist ein „weltweit eindeutig identifizierbarer kommunikationsfähiger Teilnehmer bestehend aus Verwaltungsschale und Asset mit digitaler Verbindung eines Industrie 4.0-Systems, der dort Dienste mit definierten QoS-(quality of service)-Eigenschaften anbietet. Die Industrie 4.0-Komponente bietet für ihre Dienste und Daten einen der Aufgabe angemessenen Schutz. Eine solche Industrie 4.0-Komponente kann ein Produktionssystem, eine einzelne Maschine oder Station oder auch eine Baugruppe innerhalb einer Maschine repräsentieren“.
- Die *Verwaltungsschale* der Industrie 4.0-Komponente ist eine virtuelle digitale und aktive Repräsentanz einer Industrie 4.0-Komponente im Industrie 4.0-System. Eine Verwaltungsschale enthält das Manifest und den Komponenten-Manager.
  - Das Manifest ist ein extern zugänglicher definierter Satz von Metainformationen, der Auskunft über die funktionalen und nicht funktionalen Eigenschaften der Industrie 4.0-Komponente gibt.

# Index

## A

activity groups 182  
ADAMOS 28  
Aktivitätsgruppen 197  
Anforderungen (Requirements) 80  
Ansätze der Ausführung 139  
Ansätze der Planung 133  
Ansätze der Überwachung 147  
Ansätze für Prognose und Verbesserung 153  
Anwendungsbeispiel „Maschinendatenerfassung (MDE)“ 222  
AutomationML 120  
Automatisierungspyramide 15

## B

Begrifflichkeiten 116  
Best Practice 193  
Bitkom 24

## C

Cloud 76  
Computer Integrated Manufacturing (CIM) 5  
Cyber Physical System (CPS) 1, 113

## D

Data Analytics 152  
Datenformat 99  
Datenstruktur 101

Datentyp 99

digitale Fabrik 4  
Digitalisierungsansätze 106  
Digitalisierungsroadmap 179, 221  
Digitalisierungs-Use Cases 69  
digital leadership 43  
Digital Shadow 12  
Digital Twin 12  
dynamische Werkerführung 82

## E

edge computing 78  
Empfehlungen 238  
Empfehlungen für Digitalisierungsvorhaben 11  
engineer-to-order (ETO) 182  
Erfahrungswerte 230  
Erfolgspfade 42

## F

Fertigungsinfrastruktur 81  
Fertigungslinie 162  
Funktionales Hierarchiemodell 196  
Funktionsgruppen 200

## G

Gegenüberstellung 8  
Geschäftsprozessmodell 63, 127  
Grundbausteine 14

**H**

Handlungsbedarf 238  
Herangehensweise 58  
Herausforderungen 41, 80  
Hilfsmittel 44  
horizontale Integration 16  
human machine interfaces 2

**I**

Industrial Internet of Things 38  
Industrie 4.0 21  
Industrie 4.0-Komponente 111  
Interaktionspunkt 130  
interdisziplinäres Vorgehen 118  
Internet of Things (IoT) 76  
Interoperabilität 85  
ISA95 74

**K**

Kapazitätsplanung 135  
Kommunikationssysteme 93  
Konvergenz 39  
Kooperationsmodelle 52  
Kräftenetz 46

**L**

Lösungsansätze 105, 178  
Lösungsansätze am Produkt 110  
Lösungsansätze am Produktionsprozessmodell 124  
Lösungsansätze in der Produktionsinfrastruktur 156

**M**

Methoden (practices) 183  
Mittelstand 48  
Modellbildung 114  
Modularisierung 84  
Montage 165  
Multi-Plattform-Architektur 87

**O**

OPC UA 28  
operations management 68, 128  
optimierte Produktionslogistik 19  
Organisationstyp 65

**P**

Phasenmodell 177  
Plattform Industrie 4.0 22  
PLCnext 30  
PLCopen 29, 121  
practices *siehe* Methoden 132, 179  
Produktionseinheit 160  
Produktionsinfrastruktur 156  
Produktionstyp 65, 129, 142  
Produktionsversorgung 172  
Produktvarianz 40  
Prozesse 183  
Prozesskategorien 182  
Prozessreferenzmodell SCOR® 179  
Prozesstyp 181

**R**

Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI) 21, 111  
Referenz- bzw. Reifegradmodelle 67

**S**

SCADA 75  
Schritt 1 – Scoping 209  
Schritt 2 – Assessment 211  
Schritt 3 – Identification 212  
Schritt 4 – Selection 215  
SCI 4.0 27  
SCOR® *siehe* Prozessreferenzmodell SCOR® 126  
Security by Design 104  
Sensoren 122  
serviceorientierte Systemarchitektur (SOA) 18  
Sicherheit 91

smarte Fabrik 3, 4  
Standard zur Integration von Unter-  
nehmens- und Betriebsleitebene *siehe*  
ISA95 179  
Subprozesse 182, 184  
Subprozesse für die Planung 185  
Subprozesse für die Produktion 187  
Subprozesse für Support 190  
Supply Chain 180  
Systemarchitektur 72

## T

Technologiesubstitution 48  
Technology Enabler 37, 123, 132, 179,  
204  
ToGAF 73  
Transformationsprozess 60  
Treiber 39

## U

UMATI 32  
Unternehmensarchitektur 72

Unternehmensgröße 48  
Use Case (UC) 108  
Use Cases aus der Literatur 230  
Use Case-Vorlage 217

## V

value based services (VBS) 131  
VDMA 26  
Vernetzung 84  
vertikale Integration 16  
virtuelles Produktionsnetzwerk 4  
Vorgehensmodell 206  
Vorlage 179

## W

Wertschöpfungskette 70  
Wirkungsraum 45

## Z

ZVEI 25