



Wissenschaftliche
Gesellschaft für
Produktionstechnik

WGP-STANDPUNKT INDUSTRIE 4.0



»WGP-Standpunkt Industrie 4.0«

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP ist ein Zusammenschluss führender deutscher Professoren der Produktionstechnik. Sie vereinigt in der Bundesrepublik Deutschland rund 1300 Wissenschaftler und versteht sich als Organ zur Vertretung der Belange von Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Produktionstechnik im wissenschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Raum der Bundesrepublik Deutschland.

Die WGP hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Forschung und Lehre auf dem Gebiet der Produktionstechnik zu fördern und voranzutreiben. Dazu gehören die strategische Positionierung der universitären Forschung, Initiativen und Aktivitäten in der Gemeinschaftsarbeit von Wissenschaft und Industrie sowie die Beratung und Mitgestaltung bei der Initiierung von Forschungsprojekten und Rahmenprogrammen.

Die WGP unterstützt den Wissenstransfer von Forschungsergebnissen in die Industrie und entwickelt fachliche und methodische Studieninhalte weiter. Darüber hinaus arbeitet sie an der Reformierung der Ingenieurausbildung und fördert die Bedeutung der Produktion und Produktionswissenschaft in Politik und Gesellschaft.

Durch die Kooperation mit wissenschaftlichen Instituten, gesellschaftlichen und politischen Verbänden sowie der Industrie sollen Innovationen vorangetrieben, die Qualifizierung durch wissenschaftliche Ausbildung verbessert und der ingenieurwissenschaftliche Nachwuchs gefördert werden. Über Kommunikation und Kooperation im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld stärkt die WGP das öffentliche Bewusstsein für Produktion und Produktionswissenschaft.

Impressum

Herausgeber

Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V.
vertreten durch den Präsidenten Eberhard Abele, Technische Universität Darmstadt

Verantwortliche Autoren

Thomas Bauernhansl, Universität Stuttgart
Jörg Krüger, Technische Universität Berlin
Gunther Reinhart, Technische Universität München
Günther Schuh, RWTH Aachen

An diesem Standpunkt haben darüber hinaus die WGP-Professoren sowie deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mitgewirkt.

Inhalt

Management Summary	3
1 Warum dieser WGP-Standpunkt?	4
2 Begriffsbestimmung Industrie 4.0	6
2.1 Definition und Entwicklung	6
2.2 Nutzen und Potenziale	7
3 Handlungsfelder	10
3.1 Cyber-physische Systeme (CPS)	10
3.2 Cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen	16
3.3 Digitaler Schatten	23
3.4 Analytik	31
4 Handlungsempfehlungen	39
4.1 Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft	39
4.2 Handlungsempfehlungen für die Politik	41
4.3 Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft	42
5 Referenzen	43

Anhang

Management Summary

Der Begriff »Industrie 4.0« wird seit seiner Einführung im Jahr 2011 inflationär für alle möglichen Anwendungsfälle und Technologieentwicklungen genutzt, die vermeintlich einen Bezug zur **digitalen Transformation** der Produktion haben. Aufgrund der damit einhergehenden Verwässerung des ursprünglichen Konzepts herrscht insbesondere bei den kleinen und mittleren Unternehmen der deutschen Industrie Unsicherheit über die **relevanten technologischen Veränderungen** sowie **Potenziale** und **Risiken** durch Industrie 4.0.

Was ist neu?

Nicht die Digitalisierung der Produkte und ihrer Produktion ist das wirklich Revolutionäre an Industrie 4.0, sondern die Möglichkeiten der **Vernetzung technischer Systeme in Echtzeit**. Die damit entstehenden neuen **Business Ecosysteme** (also die partnerschaftliche, firmenübergreifende Vernetzung von produzierenden Unternehmen mit Zulieferern, Kunden oder ggf. auch Wettbewerbern) als Basis für neue, teils **disruptive Geschäftsmodelle**, die Integration des Kunden in die Produktentstehung und die wirtschaftliche **Verlagerung komplexitätsgetriebener Arbeitsinhalte** an Kunden und **serviceorientierte Wertschöpfungspartner**, können mit Fug und Recht als revolutionär bezeichnet werden.

Technologieseitig besteht die eigentliche Revolution in der **Verschmelzung der virtuellen mit der realen Welt** durch die **Nutzung von Echtzeitdaten**, der **Architekturveränderung technischer Systeme** hin zu hochvernetzten und **plattformbasierten Cyber-physischen Systemen** und der dadurch bewirkten Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide.

Ermöglicht wird dies insbesondere durch:

- die **horizontale Vernetzung**, also die Nutzung des **Internets der Dinge und Dienste** in Wertschöpfungssystemen,
- die **vertikale Integration**, also die Veränderung der Produktarchitektur – vom mechatronischen System zum **Cyber-physischen System** sowie durch
- die Nutzung von **strukturierten und unstrukturierten Echtzeit-Daten** zur Gestaltung und Optimierung komplexer Wertschöpfungssysteme.

Was ist der Nutzen?

Mit den neuen hochvernetzten Technologien und den darauf basierenden **serviceorientierten Geschäftsmodellen** sind in fast allen Bereichen der Wertschöpfung Einsparpotenziale durch eine **Steigerung der Gesamtproduktivität von bis zu 50 %** möglich. Vier Kernthesen für Wertschöpfungsmodelle der Zukunft beschreiben den Nutzen von Industrie 4.0:

- Die **optimale Verteilung der Wertschöpfung** im **Business Ecosystem**, das alle Wertschöpfungspartner und damit auch die Kunden **hierarchiearm integriert**, führt zu **niedrigeren Komplexitätskosten** und somit zu einer **höheren Gesamtmenge**.
- Die **optimale Verteilung der Funktionalitäten** (sog. Services, z. B. Maschinenfähigkeiten) in der **Cyber-physischen Systemarchitektur** führt zu **Skaleneffekten** und hoher **Funktionsdynamik** entlang des gesamten **Lebenszyklus** von technischen Systemen.
- Die **massendatenbasierte Prognose** von Zukünften auf Basis des **digitalen Schattens** der Realität legt die Grundlage für eine hohe Produktivität und **Agilität komplexer Wertschöpfungssysteme**.
- Die **verschwendungsfreie Einbindung** der Mitarbeiter durch **adaptive und selbstlernende Mensch-Maschine-Schnittstellen** sorgt für umfassende Akzeptanz im Arbeitssystem und legt die Basis für agile sowie **robuste und lernende Wertschöpfungssysteme**.

Was bedeutet dies für die Produktionstechnik?

Die **Vernetzung der Wertschöpfung** auf Basis **digitaler Technologien** und die daraus resultierenden **Veränderungen der Wertschöpfungssysteme** bedeutet für alle Produktionsverantwortlichen eine **Revolution**. Falsche Entscheidungen aufgrund fehlender Informationen und die unzureichende **Einschätzung von Risiken** und **Technologiepotenzialen** können zu **massiven Wettbewerbsnachteilen** führen und die langfristige **Existenz der betroffenen Unternehmen gefährden**.

Wie ist dieses Papier strukturiert?

Nach der Hinleitung zum Thema Industrie 4.0, die unter anderem begründet, warum dieser Standpunkt wichtig ist und warum er gerade jetzt erscheint, folgt eine **Begriffsbestimmung von Industrie 4.0** aus Sicht der **produktionstechnischen Forscher**. Nach der Definition und **historischen Entwicklung der digitalisierten Wertschöpfung** werden **Nutzen und Potenziale** aufgezeigt. Im Anschluss werden in Kapitel 3 die vier wichtigsten Handlungsfelder von den jeweiligen Experten aus der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik WGP vertieft behandelt: **Cyber-physische Systeme (CPS)**, **Cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen**, **Digitaler Schatten** sowie **Analytik**. Diese Abschnitte folgen alle der gleichen Struktur: Nach der Definition und Darstellung der Entwicklung des jeweiligen Handlungsfelds werden die Potenziale, der Stand der Technik und Forschungsbedarfe, die Migrationspfade für den Anwender sowie abschließend die Bezüge bzw. Schnittstellen zu den anderen Handlungsfeldern behandelt.

1 Warum dieser WGP-Standpunkt?

Das Suchwort Industrie 4.0 erzeugt etwa 25.500.000 Treffer bei Google. **458.000 Treffer** gibt es zu **Industrie 4.0-Studien** und Google Scholar liefert **54.700** entsprechende Ergebnisse. Es scheint, alle Welt stürzt sich auf das Thema – und verwässert es immer mehr. Die große Vielzahl von Veröffentlichungen zum Thema Industrie 4.0 ist häufig einseitig aus der **IT-Perspektive** verfasst. Eine Liste der wichtigsten Publikationen findet sich im Anhang dieses WGP-Standpunktes. Viele Studien fokussieren auf **Marktanalysen** oder sogenannten **Readiness-Checks**. Dabei ziehen die Autoren ihre Schlüsse aus Umfragen unter Marktteilnehmern, die sich noch kaum mit Industrie 4.0 befasst haben. So hat der **VDE Trendreport 2015** ermittelt, dass sich überhaupt nur etwa **10% der deutschen Unternehmen** bereits operativ mit Industrie 4.0 beschäftigen. Das bedeutet aber nicht, dass sie das Thema vollumfänglich durchdrungen haben oder gar grundsätzlich auf dem richtigen Weg sind. Zudem haben **viele Autoren** von Studien meist ein **konkretes Geschäftsinteresse**. Beratungsfirmen beispielsweise erhalten damit einen Einstieg für ihre Dienstleistungen.

Dieser **WGP-Standpunkt** soll ein **Weckruf** für die Unternehmen sein, die sich noch nicht ausreichend mit Industrie 4.0 beschäftigen, weil sie die **Dringlichkeit** noch nicht spüren, das **Vokabular** nicht verstehen und die **Potenziale** noch nicht erkannt haben. Wir wollen **Produktionstechnikern** in **kleinen und mittleren Unternehmen** verständlich vermitteln, was den **Kern von Industrie 4.0** ausmacht. Wer glaubt, er sei mit einer mit dem Internet verbundenen Maschine bereits in der Zukunft angekommen, täuscht sich. Industrie 4.0 ist keineswegs nur ein kurzer Hype. Die **digitale Vernetzung der Wertschöpfung ist für alle Produktionsverantwortliche** eine **Revolution**, die sie nicht verpassen dürfen.

Häufig angeführte Hürden für KMU sind **hohe Investitionen, Fachkräftemangel, fehlende Infrastruktur** und **mangelnde Datensicherheit**. Dagegen argumentiert die WGP:

- In Industrie 4.0 einzusteigen **kostet oft weniger** als gedacht; **bezahlt wird** meist nur, was tatsächlich auch **genutzt wird**; hohe Lizenzgebühren und teure Hardware können häufig entfallen.

Auch der Kauf eines komplett neuen Maschinenparks ist nicht nötig, da Stück für Stück kostengünstige Technologien nachgerüstet werden können, die häufig ihren Ursprung im Consumer-Markt haben.

- Ein **Fachkräftemangel im IT-Bereich** ist zwar absehbar, aber es gibt Lösungen. **Informatiker kosten** allerdings **Geld** und dies steht häufig **aufgrund mangelnder strategischer Fokussierung** nicht zur Verfügung, erfordert bereits jetzt strategische Maßnahmen. Das **Verharren im eigenen Kerngeschäft** ist **typisch für KMU**, zugleich aber auch die größte Bedrohung.
- **IT-Sicherheit** ist für KMU bereits heute ein **zentrales Thema**. Allerdings wird es nicht professionell adressiert. Die Vernetzung und Nutzung geeigneter Dienste, z. B. aus der Cloud eines professionellen Anbieters, eröffnet für viele KMU **neue Perspektiven** im Umgang mit Daten. Auch die **Bandbreiten** der heutigen Übertragungswege sind aufgrund der Möglichkeiten der **Datenverarbeitung** in wertschöpfungsnahen IT-Systemen zunächst **kein limitierender Faktor** in der Umsetzung von Industrie 4.0.

Wenn wir nicht schnell agieren, werden wir von denen überholt, die sich nicht vorwiegend mit den **Risiken**, z. B. der Datensicherheit beschäftigen, sondern die **Potenziale in den Vordergrund** stellen, z. B. durch neue Geschäftsmodelle. Beispielsweise arbeiten in den USA, speziell im **Silicon Valley**, viele Menschen an **disruptiven Geschäftsmodellen**, die im Wesentlichen auf der **neuartigen Auswertung und Nutzung von Daten**, insbesondere von **Kundendaten**, basieren.

Dabei hilft maßgeblich die offene Denkweise des »**Internet Camp**« [1], das in den USA stark ausgeprägt ist und sich durch internetbasierte Services stark am Kundennutzen orientiert. Die **Denkprozesse** sind dort **offener, schneller** und **risikoreicher** als in traditionellen produzierenden Unternehmen. Das zeigt sich auch im Zuge erster Umsetzungen wie z. B. NEST im Haushaltsbereich oder Googles Moonshot-Projekt in der Robotik, wobei vor allem die **Skalierbarkeit von digitalen Services** im Vordergrund steht. Auch **chinesische Unternehmen** tun sich im Jahr 2016 durch bisher **ungeahnte Innovationen** bei

gleichzeitigem **Pragmatismus** hervor [2]. China kommt dabei von der konservativen Seite des »**Machine Camp**« [1] und macht sich dabei seine **Spitzenposition** hinsichtlich der **M2M-Vernetzung** weltweit zunutze. Laut eines **Insight Reports** der **GSMA 2015** [3] ermöglicht die **Unterstützung durch die Regierung** und die dort erzielbaren **Economies of Scale** in China eine solche Entwicklung. Die Festlegung von **Standards** und deren **internationale Vermarktung** oder die Auswahl von **202 Städten als Piloten für Smart-City-Projekte** sind Beispiele. Insbesondere Start-ups aus den USA sehen das fertigungstechnische Know-how nicht als **Markteintrittsbarriere** in den produzierenden Markt, sondern als Chance für **neue Geschäftsmodelle**. Diese Sichtweise ist besonders für etablierte Produzenten in Deutschland eine Gefahr, denn die aktuell **hohe Marktkapitalisierung** erlaubt einen Markteintritt auf technologischer Augenhöhe.

Deutsche produzierende KMU sind gegenüber Industrie 4.0 noch zu zurückhaltend. Teilweise werden Chancen unterschätzt. Die Risiken hingegen werden eher überschätzt. Unternehmen verstecken sich vielfach hinter **Schutzbehauptungen** wie z.B., Industrie 4.0 sei nur etwas für **finanzstarke Konzerne** oder dass man sich den **notwendigen Datenschutz** ohnehin nicht leisten könne. Allerdings werden insbesondere von der Politik die verfügbaren **technischen Möglichkeiten** häufig überschätzt. Hier glauben viele, der heutige Stand der Technik sei ausreichend hoch und man müsse die Technik nur entsprechend einsetzen. Die WGP hält es daher für dringend notwendig, offene **Fragenstellungen aus Sicht der Produktionstechnik** zu adressieren und für die Produktionsverantwortlichen verständlich aufzubereiten. Die Begriffsbestimmung in Kapitel 2 soll Klarheit schaffen über die tatsächlichen Chancen und Risiken für Industrie 4.0 – und zwar aus produktionstechnischer Sicht. Eine realistische Kommunikation des Kerns von Industrie 4.0, des Nutzens der Technologien, des Potenzials, der Anwendungsgebiete und des Forschungsbedarfs aus Sicht der Produktionstechnik ist jetzt vordringlich, damit Fehlsteuerungen vermieden werden, das Thema Industrie 4.0 geerdet und den produktionstechnischen Unternehmen eine kompetente Orientierung geboten wird.

2 Begriffsbestimmung Industrie 4.0

2.1 Definition und Entwicklung

Was verstehen wir Produktionswissenschaftler unter Industrie 4.0? Der Kern der vierten industriellen Revolution ist das **Internet der Dinge** und die neuen Möglichkeiten, Ressourcen, Dienste und Menschen in der Produktion auf **Basis Cyber-physischer Systeme in Echtzeit** zu vernetzen. Nicht die Digitalisierung ist also das Revolutionäre, sondern die Möglichkeiten der **Vernetzung technischer Systeme in Echtzeit** sowie das, was uns die IT heute und zukünftig bietet, nämlich die **Kommunikation** und **Datenhaltung per Internettechnologien** sowie die **exponentielle Steigerung der Rechenleistung**.

Drei technologische Möglichkeiten revolutionieren die Produktionstechnik durch:

- die **horizontale Vernetzung**, also die Nutzung des **Internets der Dinge und Dienste** in Wertschöpfungssystemen,
- die **vertikale Integration**, also die Veränderung der Maschinenarchitektur – vom mechatronischen System zum **Cyber-physischen System** sowie
- die **Echtzeit-Optimierung** komplexer Wertschöpfungssysteme auf Basis der **Verarbeitung von Massendaten** und der darauf basierenden **Prognose von Zukünften**.

Die **Digitalisierung der Wertschöpfung** hat mit der **NC-Technik** schon vor über 50 Jahren begonnen, aber erst die oben genannten Möglichkeiten begründen, dass Industrie 4.0 tatsächlich eine Revolution ist.

In Abbildung 2.1 sind die wesentlichen Bausteine von **Cyber-physischen Systemen** dargestellt, die die Kerntechnologie von Industrie 4.0 ausmachen. Wichtige Strukturelemente für diese neue Produktarchitektur von technischen Systemen sind eine **innovative Benutzerschnittstelle** zur Einbindung der Menschen, der **digitale Schatten** als **virtuelles Echtzeitabbild der Realität**, mehrwertgenerierende **Softwaredienste**, cloudbasierte **Plattformen**, die die Kommunikation unterstützen und eine Life-Cycle-Umgebung für die physischen Systeme und Softwaredienste bieten, sowie **Analytik** auf Basis von **Big Data** und **maschinellem Lernen**, die Daten aus dem **Internet of Everything** (Menschen, Dinge und Dienste) nutzen. Diese Bausteine der vierten industriellen Revolution werden in Kapitel 3 von Experten der WGP jeweils ausführlich erläutert und beschrieben.

Die **Digitalisierung der Produktion** hat eine lange Historie. Anfang der 1960er Jahre begann die Entwicklung der (Computerized Numerical Control-) **CNC-Technologie**. In den 1970ern kamen **CAD** (Computer-aided Design) und **ERP** (Enterprise Resource Planning) hinzu.

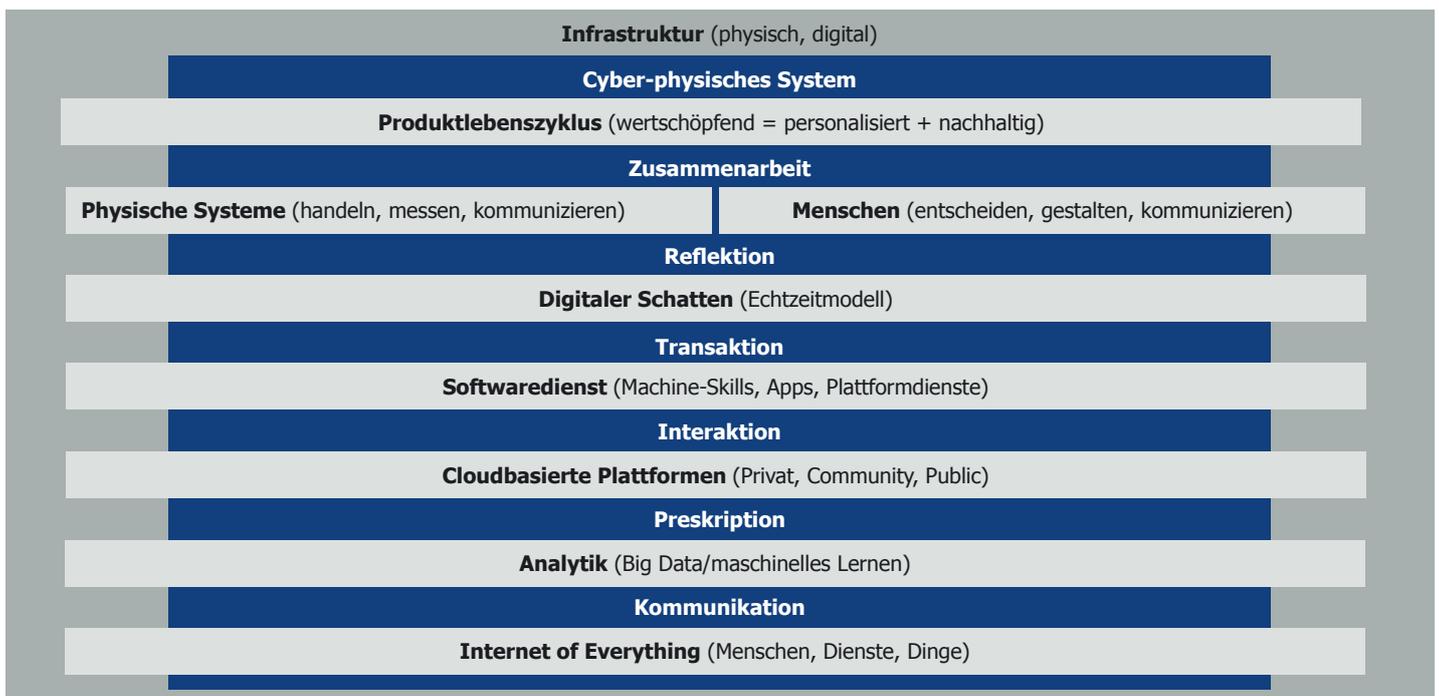


Abb. 2.1 Bausteine der Industrie 4.0. ©Fraunhofer IPA

Erste Ansätze der Industrie 4.0 finden sich bereits in **CIM** (Computer Integrated Manufacturing) aus den 1980er Jahren. Damals fehlte allerdings noch die passende Technologie und man glaubte, alles müsse zentral gesteuert werden. In der damaligen Vision wurde der Mensch aus der Fabrik aktiv entfernt.

Mit den folgenden Jahrzehnten kamen immer rascher neue Technologien dazu: das **Internet, WLAN, High Performance Computing** und schließlich **Big Data**. Erst diese Technologien führen zu grundsätzlich neuen Möglichkeiten in der Vernetzung und Datenverarbeitung und damit in die Vierte Industrielle Revolution. Die wichtigsten Schritte dieser Entwicklung sind in Abb. 2.2 dargestellt.

Die Abbildung zeigt, dass **Informations- und Kommunikationstechnologien** der Produktionstechnik vorausziehen. Der **Vernetzungsgrad** steigt seit der Jahrtausendwende rasant an. In der Produktion

wird das insbesondere durch die Nutzung von Cyber-physischen Systemen und durch den digitalen Fabrikbetrieb getrieben. Trends wie das Internet der Dinge, die **App- und die Cloud-Orientierung** dringen aus dem Informations- und Kommunikations-(IuK-) Bereich ebenfalls in die Produktionswelt ein und beflügeln die Vernetzung weiter. Nur die rasant steigende Rechenleistung, permanent **wachsende Internetbandbreiten** und **Mobilität der eingesetzten Technologien** bzw. Endgeräte ermöglichen diese Entwicklung.

2.2 Nutzen und Potenziale

Der Nutzen von Industrie 4.0 liegt in **hochflexiblen, wandlungsfähigen Wertschöpfungssystemen**, die es erlauben, Wertschöpfung dorthin zu transferieren, wo sie am besten erbracht werden kann. Dies senkt die **Komplexitätskosten** insbesondere bei der **individualisierten Produktion** und es entstehen neue Wirtschaftlichkeitspotenziale.

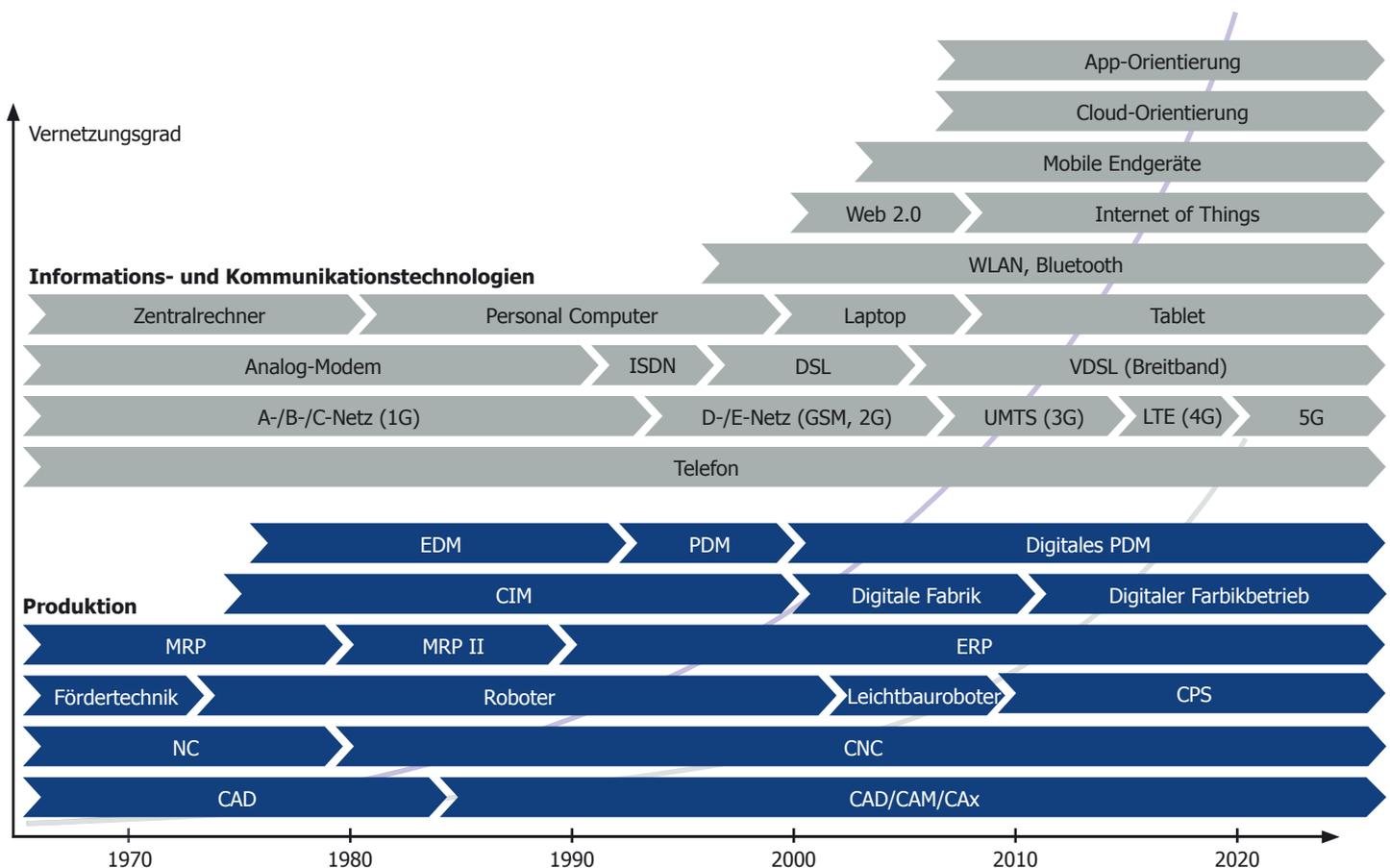


Abb. 2.2 Die Digitalisierung der Produktion und IT-Technologie im Zeitverlauf ©Fraunhofer IPA

Das allgemeine Zielsystem der industriellen Wertschöpfung in Bezug auf Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität und Nachhaltigkeit bleibt auch im Rahmen von Industrie 4.0 bestehen. Sehr wohl gibt es aber höhere Anforderungen der Wertschöpfung: an die **Geschwindigkeit**, an die **Wirtschaftlichkeit**, an die **Flexibilität** sowie die **Wandlungsfähigkeit** und die **Nachhaltigkeit**.

Industrie 4.0 erweitert den Lösungsraum für die wirtschaftliche und nachhaltige **Wertschöpfungssystemgestaltung** auf allen und zwischen den Ebenen, vom **Prozess bis zum Business Ecosystem**, das alle Wertschöpfungspartner und die Endkunden optimal integriert. Diese Möglichkeit ist neu: Durch diese Vernetzung auf Basis von Plattformen, die sowohl die horizontale wie die vertikale Integration ermöglichen, können etwa Arbeitsumfänge oder Funktionalität von Maschinen flexibel in diesem System erzeugt und verteilt werden.

Die folgenden Kernthesen für Wertschöpfungsmodelle der Zukunft beschreiben den Nutzen von Industrie 4.0:

- Die optimale **Verteilung der Wertschöpfung im Business Ecosystem**, das alle Wertschöpfungspartner und somit auch die Kunden **hierarchiearm** integriert, führt zu **niedrigen Komplexitätskosten** und somit zu einer **höheren Gesamtmarge**.
- Die optimale **Verteilung der Funktionalitäten** (sog. Services) in der **Cyber-physischen System-Architektur** führt zu **Skaleneffekten** und hoher **Funktionsadaptivität** entlang des gesamten Lebenszyklus von technischen Systemen.
- Die **massendatenbasierte Prognose** von Zukunftsszenarien auf Basis des **digitalen Schattens** der Realität legt die Grundlage für eine **hohe Produktivität** und **Agilität** komplexer Wertschöpfungssysteme.
- Die **verschwendungsfreie Einbindung** der Mitarbeiter durch **adaptive und selbstlernende Mensch-Maschine-Schnittstellen** sorgt für umfassende **Akzeptanz im Arbeitssystem** und schafft die Basis für **agile, robuste und lernende Wertschöpfungssysteme**.

Neue Technologien und neue Geschäftsmodelle lassen es also zu, **Aufgaben zum Kunden zu delegieren**, ihn an der Wertschöpfung mitarbeiten zu lassen und die **Wertschöpfungspartner** (Lieferanten, Serviceprovider, ...) effektiver einzubinden. Das Produkt kann zum

Informationsträger werden und dadurch sämtliche Phasen seines **Lebenszyklus** autonom begleiten. Man spricht hierbei vom **Produktgedächtnis**. Auch dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten zur Gestaltung und Optimierung der Wertschöpfung.

Mit den neuen **echtzeitfähigen Technologien** und **serviceorientierten Geschäftsmodellen** entstehen in fast allen Bereichen der Wertschöpfung große Einsparpotenziale. Experten wie SEW Eurodrive-Geschäftsführer Johann Soder sprechen von einer möglichen Steigerung der **Gesamtproduktivität** von bis zu **50 %** durch Industrie 4.0.

Bestandskosten können u. a. durch die Supply-Chain-übergreifende Nutzung von Echtzeitdaten über Bestandsmengen um bis zu **40 %** gesenkt werden. **Fertigungs- und Logistikkosten** haben ein Kostensenkungspotential von **10 % – 30 %**, u. a. durch den Einsatz von smart wearables an Produktionsarbeitsplätzen oder durch den Einsatz von Analytics-Methoden zur Steigerung der Gesamteffizienz. Bei den **Komplexitätskosten** also den Kosten, die hauptsächlich in den indirekten Bereichen entstehen, sind durch die Einbindung der Kunden in die Wertschöpfung, die Nutzung von umfassenden Service-Angeboten und die Dezentralisierung sowie De-Hierarchisierung von Wertschöpfungsverantwortung sogar bis zu **70 %** Kosteneinsparung möglich. Aufgrund des **Prosumer-Modells** (der Kunde ist hier nicht nur Konsument, sondern auch Produzent) werden Aufgaben vom Kunden übernommen, für die vorher das produzierende Unternehmen zuständig war. Damit können weitere Kosten reduziert werden (vgl. Abb. 2.3).

Ein Beispiel hierfür ist die Plattform von **Local Motors** [4], die ähnlich einem Social Network funktioniert und einen ganz neuen Ansatz verfolgt: Die Konsumenten können Entwürfe für Autoteile oder auch für das ganze Fahrzeugdesign hochladen und von der Community bewerten lassen. Das am besten bewertete Produkt wird dann im 3D-Druck produziert. Der Konsument kann so im Sinne eines **Co-Working** in die Produktion eingreifen und das Produkt personalisieren.

Everything as a Service, das XaaS-Konzept, führt darüber hinaus dazu, dass es »**Komplexitätsbündler**« gibt, die sich auf ein Thema konzentrieren und hier besondere Kompetenzen aufbauen. Sie bieten entsprechende Services an, etwa **Einkaufsplattformen**, die den günstigsten und den besten Lieferanten auswählen und die Bestellung

übernehmen, sodass produzierende Unternehmen dies selbst nicht mehr übernehmen müssen. Dennoch kann das Unternehmen **Skaleneffekte** nutzen. Insgesamt wird das **tayloristische Prinzip der Trennung von ausführender Arbeit und Wissensarbeit**, mit Industrie 4.0 aufgehoben.

Das Wissen wird mit Industrie 4.0 direkt an die Linie gebracht. Mitarbeiter werden wieder umfassend entscheidungskompetent (ggf. mit Hilfe von Assistenzsystemen) und konzentrieren sich auf hochwertige Aufgaben wie **Entscheiden** und **Gestalten**. Industrie 4.0 bringt so gesehen die Kompetenz der Ingenieure und Ingenieurinnen zurück in die direkte Wertschöpfung und wertet den Produktionsarbeitsplatz auf.

Ein weiteres **tayloristisches Prinzip**, nämlich **Band und Takt**, wird ebenfalls in Teilen abgelöst, weil Industrie 4.0 **unterschiedliche Takte und flexible Vernetzung** erfordert, um eine hohe Variantenvielfalt wirtschaftlich produzieren zu können.

Zudem sind signifikante Einsparungen im **Qualitäts- sowie Instandhaltungsbereich** möglich. Mit Hilfe von **echtzeitnahen Qualitätsregelkreisen** können beispielsweise Produktionsausschuss reduziert oder Anfahrverluste vermieden werden. Durch die Umsetzung von **Predictive Maintenance** kann die Verfügbarkeit von Produktionssystemen deutlich gesteigert und Kosten für die Ersatzteilversorgung deutlich reduziert werden.

Kosten	Effekte	Potenziale
Bestandskosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Reduzierung Sicherheitsbestände ■ Vermeidung Bullwhip- und Burbidge-Effekt 	-30 bis -40 %
Fertigungskosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verbesserung OEE ■ Prozessregelkreise ■ Verbesserung vertikaler und horizontaler Personalflexibilität ■ Einsatz von Smart Wearables 	-10 bis -30 %
Logistikkosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erhöhung Automatisierungsgrad (milk run, picking, ...) ■ Smart Wearables 	-10 bis -30 %
Komplexitätskosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erweiterung Leistungsspannen ■ Reduktion trouble shooting ■ Prosumer Model 	-60 bis -70 %
Qualitätskosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Everything as a Service (XaaS) ■ Echtzeitnahe Qualitätsregelkreise 	-10 bis -20 %
Instandhaltungskosten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Optimierung Lagerbestände Ersatzteile ■ Zustandsorientierte Wartung (Prozessdaten, Messdaten) ■ Dynamische Priorisierungen 	-20 bis -30 %

Abb. 2.3 Wirtschaftliche Potenziale von Industrie 4.0 ©Fraunhofer IPA ergänzt durch Fraunhofer IPT

3 Handlungsfelder

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Handlungsfelder aus Sicht der Produktionstechnik beschrieben und die **Forschungsbedarfe** benannt sowie zeitlich eingeordnet. Zudem sollen **Rahmenbedingungen** aber auch **Grenzen** aufgezeigt werden.

3.1 Cyber-physische Systeme (CPS)

3.1.1 Definition und Entwicklung

CPS sind als Weiterentwicklung **mechatronischer Systeme** zu verstehen. Mechatronische Systeme sind eine Fusion aus Elementen der Mechanik, Elektronik und Informatik. Die drei Disziplinen werden somit als integriertes Funktionsmodell betrachtet, deren Restriktionen und Anforderungen schon bei der Entwicklung zu beachten sind [6]. CPS als **nächste Stufe der Technologieintegration** können zusätzlich die physikalischen Daten, etwa die Zustandsdaten einer Werkzeugmaschine oder die Dimensionen eines Bauteils lokal oder mit Hilfe von **spezifischen Softwarediensten** auf **Plattformen** häufig unter Nutzung des sog. **Digitalen Schattens** (vgl. Kap. 3.3) verarbeiten und über Netzwerke Informationen oder zusätzliche Funktionalitäten (Softwaredienste) anderen CPS, Computern oder Anwendern oder auch dem

Benutzer bzw. dem CPS zur Verfügung stellen. Somit sind die **Funktionalitäten** eines CPS nicht mehr zwingend **an dessen Physis** gebunden. Je nach notwendiger **Rechenleistung**, **Geschwindigkeit** der Kommunikationsnetze sowie der **Sicherheitsanforderungen** können **bestehende Funktionalitäten** (z. B. die Bahnplanung von Robotern) oder **neue Funktionalitäten** (z. B. die dynamische und markerlose Navigation von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) über Plattformen angeboten werden. Dies ermöglicht die Nutzung von **Skaleneffekten** aber auch die einfache Pflege oder sogar Neuentwicklung von Funktionen während des Betriebs von CPS (s. Abbildung 3.1.1) [5, 8].

CPS können also generell als **physische Artefakte** angesehen werden, die von einem **eingebetteten Computersystem** kontrolliert, überwacht, koordiniert und in **Netzwerke integriert** werden. Ihre **Interaktion zwischen der physischen und der digitalen Welt ist von elementarer Bedeutung** [6].

Als **Cyber-physische Systeme (CPS)** werden auch eingebettete Systeme bezeichnet, die um die Möglichkeit der Vernetzung erweitert werden, um so in **Verbindung mit Internettechnologien** den Rahmen

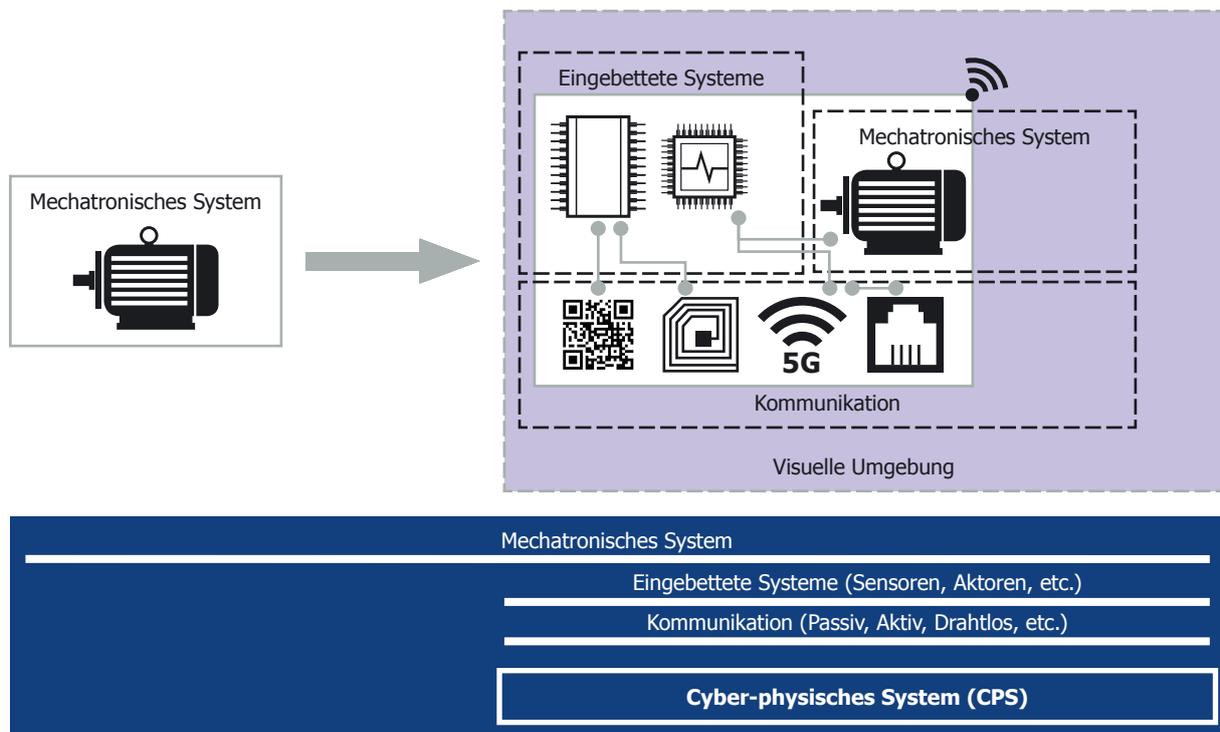


Abb. 3.1.1 Elemente eines Cyber-physischen Systems (CPS)

für eine **neue Architektur technischer Systeme** zu schaffen (siehe auch Abb. 2.1). CPS sind für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche, wie etwa **Mobilität, Medizintechnik, Produktion** und **Energetechnik** relevant. Sie stellen eine **Fusion der realen mit der virtuellen Welt** dar [7, 8, 9, 10].

Andere Definitionen lauten: Cyber-physische Systeme sind vernetzte und kollaborative Computersysteme, die interaktiv in die physische Welt und ihre Prozesse eingebunden sind. Sie nutzen gleichzeitig internetbasierte Datenverarbeitungs- und Datenbasis-Dienste. Die potenzialstiftende Eigenschaft von CPS ist demnach nicht die reine Digitalisierung der Komponente und die Ausstattung mit Software, sondern vor allem die **ständige plattformbasierte Vernetzung integrierter Sensoren und Aktoren** durch **lokale** oder **globale** Netzwerke mit anderen CPS (**»System of Systems«**) [11].

So können neue Funktionalitäten realisiert werden, wie etwa die Kommunikation eines intelligenten Werkzeugs mit der Maschinensteuerung und dem Werkstückträger, um **Werkzeugverschleiß zustandsbasiert** festzustellen und vor dem Werkzeugwechsel noch vorhandene **Verschleißreserven** zu nutzen. CPS sind aber nicht nur untereinander verbunden, sondern können über entsprechende **Nutzerschnittstellen**, Eingaben, Anfragen oder Anweisungen von Menschen erhalten, durch Sensoren und Aktoren **Daten aus der Umwelt** erfassen oder ggf. **unstrukturierte Daten**, z. B. aus dem Internet, nutzen [6].

Neben der reinen Erfassung ist auch eine **Weiterverarbeitung der Daten** direkt im CPS möglich. Eine weitere wichtige Eigenschaft von CPS ist die **Fähigkeit der Selbstbeschreibung**, die gerade in der Kommunikation mit anderen CPS elementar ist [8, 12, 13].

Zur Fähigkeit der **Selbstbeschreibung** ist vor allem das **Wissen über den eigenen Zustand** (z. B. Bearbeitungsfortschritt oder Qualitätsdaten) oder auch die **Kenntnis der eigenen Fähigkeiten** zu zählen. Des Weiteren kann die Selbstbeschreibung auch **Informationen über die Umwelt** bzw. den **Systemkontext** enthalten. Ein CPS wie etwa eine Werkzeugmaschine hat dann Kenntnis darüber, ob es ein bestimmtes Produkt fertigen kann, und kommuniziert dies entsprechend an das intelligent vernetzte Produkt [14].

Die Übertragung und Integration Cyber-physischer Systeme in die Produktionswelt führt zum Entstehen von **Cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS)**. Sie bestehen aus **flexiblen, autonomen** und **sich selbstkonfigurierenden Produktionsressourcen**, die untereinander und mit Produkten (sogenannten **smart products**, also Produkten mit CPS-Architektur) kommunizieren und situationsspezifische Entscheidungen treffen können. Dadurch wird eine durchgängige Betrachtung im Fertigungsprozess vom Produkt über die Produktionsmittel hin zum Produktionssystem möglich. Auch werden die dafür **benötigten Daten nicht mehr zwangsweise auf den verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide abgelegt** oder weiterverarbeitet, sondern sind dort gespeichert bzw. werden dort genutzt, wo sie aus Sicht einer flexiblen und effizienten Produktion benötigt werden [6, 15, 16, 17, 18] (vgl. Abb. 3.1.3).

Ebenso verhält es sich mit Entscheidungen im Produktionsprozess, die nicht zentral getroffen werden müssen, sondern durch die Kommunikation der einzelnen Elemente des CPPS **dezentral** getroffen werden können. Daraus folgt eine **Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide**. Die Feldebene, die hohe Echtzeitanforderungen stellt, bleibt zwar noch bestehen, doch die Funktionen der darüber

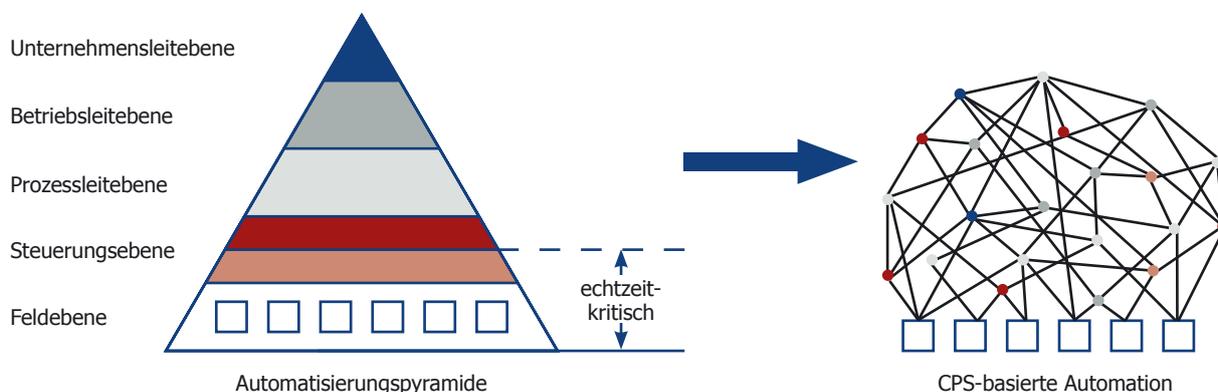


Abb. 3.1.2 Auflösung der Automatisierungspyramide [16]

liegenden Ebenen müssen nicht mehr streng hierarchisch strukturiert sein. Vielmehr entsteht ein **Netz aus verschiedenen Elementen**, die Funktionalitäten bereitstellen und als Gesamtheit das Automatisierungssystem darstellen (s. Abbildung 3.1.2 [16] und Abbildung 3.2.2).

Über **Plattformen** als Teil der CPS können Dienstleistungen und Anwendungen zur Verfügung gestellt sowie Menschen und Systeme vernetzt werden. Aufbauend auf den durch die CPS zur Verfügung gestellten Daten, können über Plattformen beispielsweise **Datenanalysen als Dienste** angeboten werden, die eine **Optimierung entlang der Wertschöpfungskette** erlauben. Neben solchen Anwendungen (oder auch Diensten), die als unkritisch im Hinblick auf ihre Echtzeitanforderung einzustufen sind, ist es in Zukunft auch denkbar, echtzeitkritische Anwendungen, wie etwa die **Maschinensteuerung eines Bearbeitungszentrums als Dienst über eine Plattform** ablaufen zu lassen. Durch die Verlagerung der Rechenkapazitäten in eine solche Plattform kann die zur Verfügung stehende **Rechenleistung zielgerichtet** und situationsabhängig **skaliert** werden [18, 19, 20].

3.1.2 Potenziale

Deutschland ist weltweit führender Fabrikaurüster [19] und behauptet sich als Produktionsstandort gegenüber Niedriglohnländern durch **Facharbeiter, Flexibilität, Qualität und Stabilität** [21]. Dieser Wettbewerbsvorsprung muss durch die Einführung **neuartiger und innovativer Produktionsverfahren** gesichert werden [22]. **CPPS** sind für Deutschland eine **Chance**, die **industrielle Produktion in Deutschland zu halten** und weiter auszubauen, indem neue **Marktanforderungen** hinsichtlich **Personalisierung** und **Nachhaltigkeit** erfüllt werden [23].

Neben den beschriebenen wirtschaftlichen Potenzialen ergeben sich mögliche **Qualitätsverbesserungen durch CPS** in der Produktion. **Intelligente Werkzeugmaschinen** in Kombination mit einem **intelligenten Produkt** können das **Qualitätsergebnis** eines Prozesses entscheidend verbessern. So können produktspezifische Parametrierungen des NC-Codes zu Beginn eines Bearbeitungsvorgangs durchgeführt werden, da das Produkt in der Lage ist, seinen aktuellen Zustand an die Werkzeugmaschine zu kommunizieren. Weiterhin ist es durch die ständige Erfassung der Umweltbedingungen mittels Sensoren möglich, Anpassungen während des technologischen Prozesses vorzunehmen. Solche Anpassungen können z. B. durch »Rattern« bei der Fräsbearbeitung notwendig werden [14, 24].

Auch **Flexibilitätpotenziale** können durch die Realisierung von CPPS erschlossen werden. So ist eine **situative Produktionssteuerung** durch die **genaue Kenntnis** der **Produktionsauslastung** und

des **Fertigungszustandes** der einzelnen Produkte möglich [14, 25]. Dies wiederum ermöglicht **kürzere** Durchlaufzeiten und eine **präzise Termineinhaltung**.

Kundeninnovierte Produkte können Impulse für **neuartige Geschäftsmodelle** geben. So entstehen Produkte innerhalb von **kurzlebigen, hochdynamischen Netzwerken mit unterschiedlichsten Stakeholdern**. Jedoch findet in dieser Zusammensetzung eine Kooperation einzelner Stakeholder nur für eine kurze Zeitspanne statt [12]. Davon ausgehend können CPPS auch als **Impulsgeber für neue Technologien** dienen. Durch die Bereitstellung der Daten und Dienste entstehen neue Anforderungen bspw. an die Kryptografie, um einer zentralen Anforderung der IT-Security gerecht zu werden [19].

3.1.3 Stand der Technik und Forschungsbedarfe

Cyber-physische Systeme sind **zentrale Befähiger** einer **vernetzten Produktion**. Durch die daraus resultierenden CPPS können Produktionsnetzwerke flexibler und produktiver gestaltet werden. Eingebettete Systeme eröffnen die Möglichkeit der Kommunikation über Systemgrenzen hinweg mit Subsystemen und anderen CPS. Um diese Funktionalitäten zu gewährleisten, müssen die CPS mit **diversen Kommunikationsschnittstellen** ausgestattet werden [10, 11].

Abbildung 3.1.4 zeigt vier Entwicklungsstufen auf dem Weg zu intelligent vernetzten Systemen. Angefangen mit **passiven Elementen** wie **QR-Codes** oder der Verwendung von **RFID**, die der Identifikation von Bauteilen dienen, werden als **zweite Stufe** der Entwicklung **Aktoren und Sensoren** definiert, die zur **Steuerung** und **Messung** benutzt werden können. Auf der **dritten Stufe** stehen Systeme, die aus **intelligent vernetzten Komponenten** bestehen. Die **höchste Stufe** stellen schließlich CPS dar, die über die **lokale intelligente Datenverarbeitung** hinaus auch die **Fähigkeit** besitzen, mit anderen CPS **übergeordnete Systeme** zu bilden, deren Eigenschaften über die Summe der Eigenschaften der untergeordneten Systeme hinaus geht (**Systems of Systems**).

Aktuelle Entwicklungen in Industrie und Forschung

Im Folgenden werden drei bereits umgesetzte CPS beschrieben, davon ein System im Montagebereich und zwei Systeme im Fertigungsbereich.

Anwendungsbeispiel 1: CPS-Fahrerloses Transportsystem

Am **Fraunhofer IPA** wurde in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ein **CPPS für die Intralogistik** entwickelt. Die Transportsysteme kommunizieren über eine **cloudbasierte Plattform** (VFK/Kapitel 3.2) und pflegen dort auf Basis ihrer Sensorinformationen den **digitalen Schatten** des Intralogistikumfelds. Die so entstandene **digitale Karte**

der Fabrik wird auf **Plattformebene** genutzt, um einen **Navigationsdienst** zur **Lokalisierung** und **Steuerung** der **Transportsysteme** zu etablieren. Der Navigationsdienst ermöglicht somit, vergleichbar mit dem Softwaredienst »Google Maps«, die fahrerlosen Transportsysteme (FTS) **effizient** durch das **Fertigungsumfeld** zu **navigieren**. Zudem kann der **physische Teil der FTS** im Sinne eines **Client** sehr leichtgewichtig gestaltet werden, da alle **rechenintensiven Dienste** zentral **in der Cloud** erfolgen. Zudem erlaubt die **Architektur des CPPS Transportleistung als Dienst** anzubieten, d. h. der Anbieter von FTS verkauft zukünftig nicht mehr das physische System, sondern transportiertes Volumen.

Anwendungsbeispiel 2: CPS-Spannzeug

Innerhalb des **Forschungsprojektes CyProS** wurde ein **CPS-Spannzeug** entwickelt. Dieses Spannzeug mit **integrierter Sensorik** regelt die **angelegte Spannkraft** und verhindert dadurch **Spannkraftverluste** im Betrieb. Die Sensorik schafft eine **Produkt-Maschine-Kommunikation**. Durch den Einsatz von **RFID-Technologie** und die Anbindung an ein zentrales **MES-System** über einen **OPC-**

UA-Server, erfolgt die **vertikale und horizontale Integration** mehrerer CPS zu einem Cyber-physischen Produktionssystem. Dieses System befindet sich in der **Lernfabrik für vernetzte Produktion** am **Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik** in Augsburg [14].

Anwendungsbeispiel 3: CPS-Werkzeug

Innerhalb des **Projektes BazMod** wurde die Entwicklung von **CPS-Werkzeugen** erforscht. Durch den Einsatz von **Elektronik in den Werkzeugen** kann der **Zustand des Werkzeuges** über Sensoren gemessen werden. Diese Daten können genutzt werden, um eine **werkzeugangepasste Maschinenparametrierung**, z. B. der Drehzahl oder des Vorschubs, durchzuführen. Weiterhin können Erkenntnisse über die **Werkzeugbelastung** und den **Zustand des Werkzeuges** gewonnen werden. Diese Erkenntnisse können in **valide Prognosen** überführt werden und bieten Arbeitsplanern eine **Entscheidungsunterstützung**. Dieses Wissen stellt eine Voraussetzung der **teilautonomen Werkzeugplanung** dar. Dadurch kann Materialbruch frühzeitig erkannt und vermieden werden. Einen Schritt weiter gehen **CPS mit**

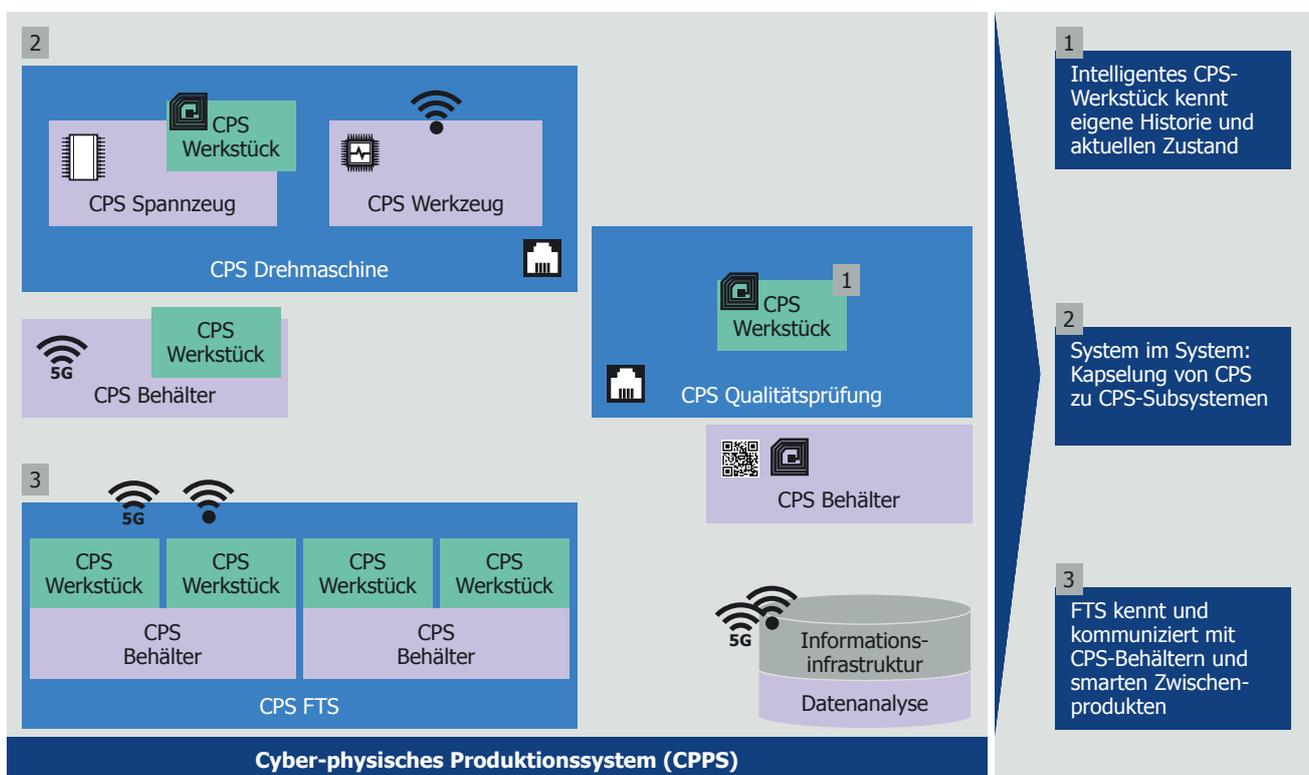


Abb. 3.1.3 Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS)

autonomen Aktoren. Diese im Werkzeug **integrierten Aktoren** können genutzt werden, um **Vibrationen** und **Verschleiß** zu **kompensieren**. Dies wiederum führt zu einer **längeren Lebensdauer** von Werkzeugen und Maschinen. Die Kommunikation zwischen Werkzeug und Maschinensteuerung wurde durch **im Werkzeug integrierte Micro-Controller** abgebildet. Als **Kommunikationsschnittstellen** diente neben **Serial Peripheral Interface (SPI)**, **Controller Area Network (CAN)** und **Universal Serial Bus (USB)** auch die **drahtlose Kommunikation** über **Bluetooth** [14].

Damit lassen sich **frühzeitig Rückschlüsse** auf den **Maschinenzustand** und mögliche **Abweichungen im Produktionsplan** ziehen. Die so in die Produktionsplanung und -steuerung überführten Erkenntnisse führen zu **geringeren Stillständen** und **Störungen** im Fertigungsbetrieb. **Intelligente Werkzeuge** eröffnen durch Sensoren, Aktoren und Kommunikationsschnittstellen valide Zustandsinformationen während des Betriebs. Es können neue Geschäftsmodelle und durch **Vernetzung von CPS unterschiedlicher Hersteller** über eine **Plattform** völlig neue **Business Ecosystems** entstehen [13, 14, 24].

Forschungsbedarfe

Die riesige Menge an automatisch generierten Daten, die durch die hohe Anzahl an Sensoren und Aktoren erzeugt werden, müssen **in Echtzeit** verarbeitet werden. Dies wiederum bedarf einer **hohen Rechenleistung** und **fortschrittlicher Daten-Analyse-Techniken** (siehe Kap. 3.4). Um die **durchgängige Echtzeitfähigkeit** der CPPS sicherzustellen, sind möglichst **einheitliche Kommunikationsprotokolle** wie ein **internationaler Industrial-Ethernet-Standard**, basierend auf **TCP/IP** notwendig. Um das Potenzial unternehmensübergreifend

der CPPS auszuschöpfen, sind darüber hinaus **international gültige Protokolle** und **Kommunikationsstandards** nötig. Ferner müssen **automatisierte Entscheidungen** über die Informationsweitergabe entwickelt werden, um die **hohe Informationstransparenz** auch dem Produktionsnetzwerk zur Verfügung zu stellen und so die Potenziale im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung auszuschöpfen [14].

Sicherheit (Security und Safety)

Risiken und **Sicherheitsaspekte** müssen bei der Einführung von hoch vernetzten und automatisch kommunizierenden Systemen berücksichtigt werden. Diese stellen **kritische Erfolgsfaktoren** für die Realisierung von CPPS dar. Insbesondere die **Daten-, Informations- und Kommunikationssicherheit** bedarf besonderer Betrachtung. Maßnahmen wie das Einrichten von **Firewalls, redundanten Ausfallsystemen** und dynamischer Selbstüberwachung müssen im Hinblick auf CPPS weiterentwickelt werden [27].

Die **Vernetzung der Produktionssysteme** macht Unternehmen von außen angreifbar. Um diesen Risiken und den Befürchtungen der Unternehmen zu begegnen, bedarf es einer **sicheren Infrastruktur** [16]. Erste Ansätze für eine unternehmensübergreifende Plattform bietet der **Industrial Data Space der Fraunhofer-Gesellschaft** [28].

Randbedingungen und Grenzen

Um den Erfolg von Cyber-physischen Produktionssystemen sicherzustellen, ist eine **intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit** in den Bereichen der **Informatik, Automatisierungs- und Produktionstechnik** sowie der Rat von **Sicherheits- und Rechtsexperten** essentiell. Dabei dürfen CPPS nicht nur als technische Systeme betrach-

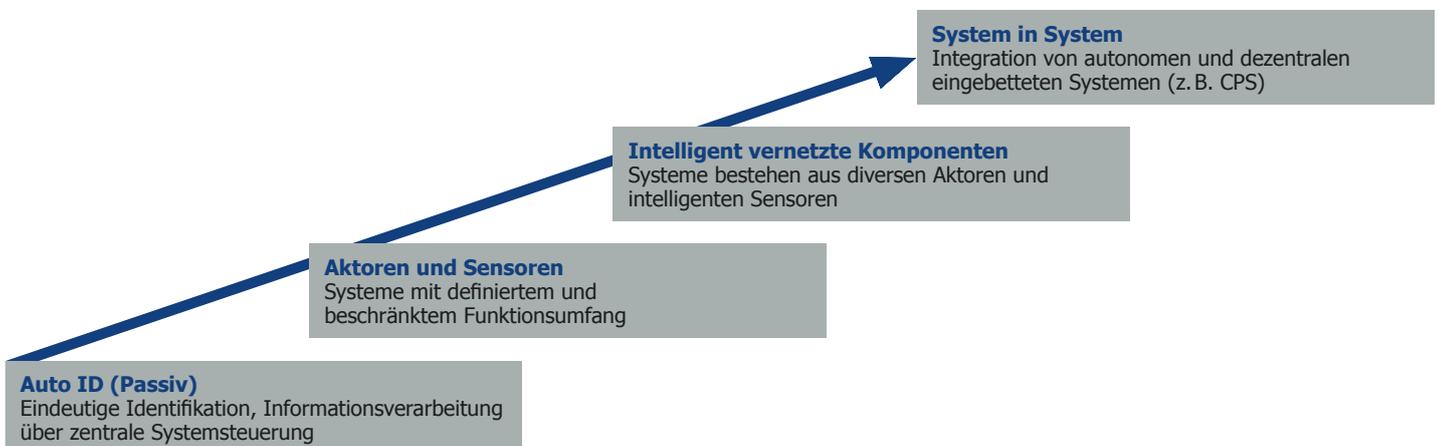


Abb. 3.1.4 Entwicklungsstufen auf dem Weg zu intelligent vernetzten Systemen (in Anlehnung an [26])

tet werden. Vielmehr müssen Industrieunternehmen und Produktionsstandorte als **sozio-technisches System** abgebildet und insgesamt weiterentwickelt werden [29, 30].

3.1.4 Migrationspfade für den Anwender

Während der Realisierung von Cyber-physischen Produktionssystemen ergeben bei Neuplanungen (Greenfield) und Umplanungen (Brownfield) sich unterschiedliche Herausforderungen. Bei Neuplanungen kann von Beginn an eine **dezentrale Kommunikationsstruktur** entwickelt werden und eine entsprechende Auswahl der Anlagen- und Steuerungstechnik erfolgen. Sollen bestehende **zentral gesteuerte Produktionssysteme** in CPPS überführt werden, muss die **Automatisierungspyramide** dagegen **schrittweise aufgelöst** werden. Gerade bei der Vernetzung von bestehenden IT-Systemen mit SPS-Lösungen müssen **geeignete Schnittstellen** gefunden werden. Die **Vorteile einer dezentralen Kommunikationsstruktur** werden aber erst sichtbar, wenn eine gewisse Anzahl CPS miteinander kommuniziert und sich **selbstregelnde Prozesse** einstellen können [23, 16].

Für die Weiterentwicklung einer bestehenden Produktion zu einem CPPS muss eine geeignete **Roadmap zur Umsetzung** entwickelt werden. Als Einstieg dafür existiert von Forschungsinstituten, Unternehmensverbänden und Beratungsunternehmen ein großes Angebot an Leitfäden, wie z.B. der **VDMA-Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand** von Anderl, Fleischer (vgl. Anhang) oder sogenannte Industrie 4.0-Quick-Checks. Dort erfolgt in kurzer Zeit eine erste Bewertung des **aktuellen Reifegrads** eines **Produktionssystems** hinsichtlich Industrie 4.0. Für die Bewertung des Produktionssystems kann ein **Stufenmodell** in Anlehnung an Abbil-

dung 3.1.5 angewendet werden. Findet in einem Bereich des Produktionssystems lediglich eine **Datenerfassung** statt, wird dieser Bereich mit einer **niedrigeren Stufe** bewertet.

Ein **vernetztes System** wird dagegen bereits mit einer **mittleren Stufe** bewertet. Wird diese Vernetzung im Sinne eines CPPS für **selbstregelnde Prozesse** verwendet, die **autonom agieren**, so erfolgt eine Bewertung auf mit der **höchsten Stufe**. Wird diese Abstufung auf unterschiedliche Bereiche eines Produktionssystems angewandt, ist eine differenzierte Bewertung möglich. Abhängig von Einstufung und unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen, kann eine individuelle Roadmap entwickelt werden, die das Unternehmen in angemessener Form in Richtung einer **vernetzten Produktion** führt.

Hierbei muss beachtet werden, dass nicht alle **technisch realisierbaren Maßnahmen** als **universelle Empfehlung für alle Unternehmen** abgegeben werden können. Abhängig von **verfügbaren Ressourcen, vorhandener Qualifikation** und **Erwartungen an eine vernetzte Produktion**, müssen Maßnahmen **individuell identifiziert** werden [22, 23, 32].

Bei der Einführung von CPPS sind neben einer technologischen Roadmap auch **psychologisch-organisatorische Aspekte** zu beachten. Durch den Einsatz neuer Technologien ändert sich auch das **Aufgabenspektrum der Mitarbeiter**. Dezentral organisierte, selbstregelnde Prozesse eines CPPS können dazu führen, dass sich der **Umfang manueller Arbeitsaufgaben verringert** bzw. **Aufgabeninhalte neu zu definieren** sind. Sollen Produktionsanlagen mit Werkstücken und Behältern kommunizieren, muss eine **engere Zusammenar-**

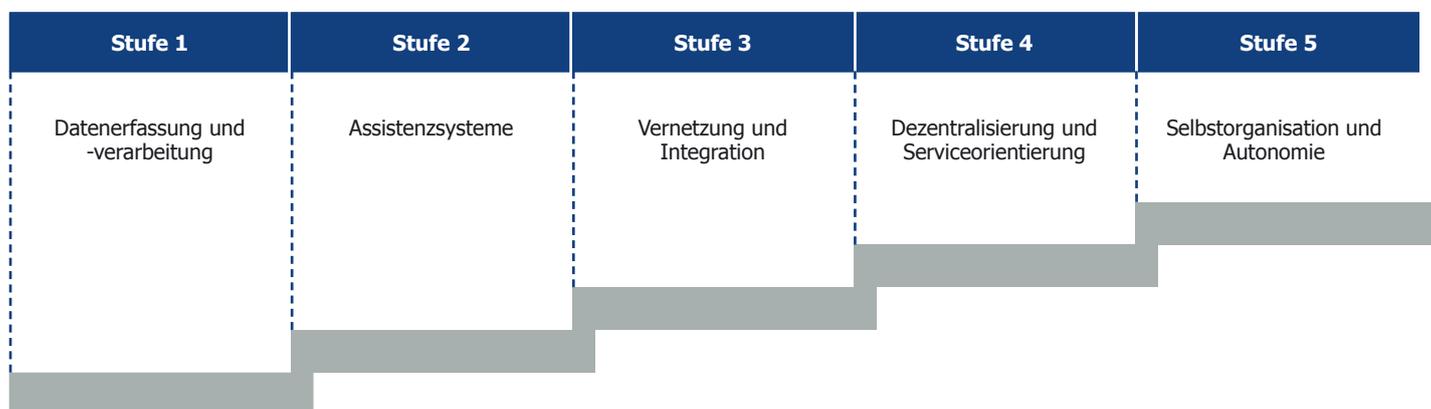


Abb. 3.1.5 Stufen auf dem Weg zu Industrie 4.0 (in Anlehnung an [26])

beit zwischen Produktion und Logistik erfolgen. Um Mitarbeiter für veränderte Aufgaben zu gewinnen, sollte bei der Einführung von CPPS auch auf Methoden des **Change Managements** zurückgegriffen werden. Die Migration zu einem CPPS sollte von Mitarbeitern nicht als Bedrohung empfunden werden, sondern als Chance zur **Erweiterung der eigenen Qualifikationen** erkannt werden [22].

Anhand der technologischen Roadmap sollte auch der Bedarf der zukünftigen im Unternehmen benötigten Qualifikationen bestimmt werden. Besonders der **Bedarf an IT-Fachkräften** wird durch die Einführung von CPPS zunehmen. Damit ein Abgleich mit den momentan vorhandenen Qualifikationen im Unternehmen stattfinden kann, ist **Transparenz über bestehende Qualifikationen** erforderlich. Die Analyse des Qualifikationsbedarfs soll verhindern, dass nach der Einführung von CPS in der Produktion eine **Abhängigkeit von externen Dienstleistern** besteht und Unternehmen mit dem **technologischen Fortschritt überfordert** sind. Um **mangelnde Qualifikationen** im Unternehmen zu verhindern oder zu beseitigen, muss die **Personalentwicklung** mit in die **Migrationsstrategie** eingebunden werden. Einerseits müssen für bestehende Mitarbeiter geeignete Qualifikationsmaßnahmen entwickelt werden. Andererseits müssen auch die **Anforderungen an zukünftige Mitarbeiter** und das **Angebot an Ausbildungsberufen** überprüft werden [22, 33].

3.1.5 Bezüge/ Schnittstellen zu den anderen Handlungsfeldern

Cloud-Plattformen sind **zentrale Elemente Cyber-physischer Produktionsarchitekturen** (s. Kap. 3.2). Ein Zugriff auf **Betriebs- und Maschinendaten** kann unternehmensintern genutzt werden, um **neue Arbeitszeitmodelle** einzuführen. Die Notwendigkeit für eine **physische Anwesenheit der Mitarbeiter sinkt**. Cloud-Lösungen ermöglichen auch neue Softwareservices (auch sog. **Mikroservices**), indem eine digitale Anbindung an die Produktion ermöglicht wird. Beispielsweise können dem Kunden mögliche Produktionskosten und Liefertermine direkt im Online-Bestellvorgang genannt werden. Neben Datenspeicherung und -zugriff können Cloud-Lösungen auch dazu dienen, einen temporären Bedarf an hoher Rechenkapazität oder an anspruchsvolle Auswertungen von großen Datenmengen zu decken [19].

Durch die Vernetzung in CPPS ist es möglich, auf die enormen Datenmengen, die beispielsweise durch Sensorsysteme erzeugt werden, in Echtzeit zuzugreifen. Zustandsbeschreibende Daten des Produktionssystems, auf die in Echtzeit zugegriffen werden kann, werden auch als **Digitaler Schatten** (s. Kap. 3.3) bezeichnet. Zur Analyse bieten sich **Big-Data-Methoden** an, mit denen die Daten aus der Produktion mit weiteren, auch unstrukturierten Daten verknüpft und interpretiert wer-

den können. Anwendungsbereiche liegen beispielsweise in der vorausschauenden Instandhaltung [34].

Trotz der fortschreitenden Möglichkeiten zur Automatisierung durch CPPS sind **vollautomatische** Lösungen **nicht in jedem Fall erstrebenswert**. Um hohe Anforderungen wie zum Beispiel bei **personalisierten Produkten** erfüllen zu können, ist die menschliche Flexibilität nach wie vor unverzichtbar. Um den Menschen bei seinen Aufgaben zu unterstützen, können jedoch heute zahlreiche Assistenzsysteme eingesetzt werden.

Physische Assistenzsysteme, wie die **Mensch-Roboter-Kollaboration**, können genutzt werden, um die Menschen von hohen körperlichen Belastungen zu befreien. **Kognitive Assistenzsysteme** dienen der **mental**en Entlastung, können den Menschen von Routineaufgaben befreien und ihm helfen, Fehler zu vermeiden [21].

3.2 Cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen

3.2.1 Definition und Entwicklung

Das Prinzip des **Cloud-Computing** geht zurück auf erste Ansätze der **Verteilung von Rechenleistung** und **-prozessen** sowie auf das **verteilte Speichern von Daten** in vernetzten Computersystemen in den 1990er Jahren. Die Vernetzung von Computersystemen in der Cloud ermöglicht eine **flexible Bereitstellung** von **IT-Ressourcen**. Hierzu wurden vom National Institute of Standards and Technology (NIST) [35] sogenannte Servicemodelle definiert, mit denen die Leistung von Rechnersystemen dynamisch bereitgestellt und genutzt werden kann. Dabei wird unterschieden zwischen der reinen Bereitstellung der **Computerhardware** als sogenannte **Infrastructure as a Service (IaaS)**, der Bereitstellung von **Rechnerplattformen**, auf denen Nutzer eigene Software programmieren und ausführen können (**Platform as a Service – PaaS**) sowie der dienstorientierten Bereitstellung von Anwendungsprogrammen, die bei Bedarf genutzt werden können (**Software as a Service – SaaS**).

Insbesondere die Nutzung von Cloud-Technologien zur verteilten Speicherung von Daten hat durch die Verbreitung sozialer Netzwerke stark an Bedeutung gewonnen. Das hier zugrunde liegende Modell einer **Public Cloud** ist jedoch zur Speicherung und Verarbeitung geheimerhaltungsbedürftiger Daten, wie sie im produktionstechnischen Umfeld häufig entstehen, nur bedingt geeignet. Cloud-Systeme können jedoch auch so integriert werden, dass die IT-Infrastrukturen und o.g. Dienste lediglich innerhalb einer Organisation/ eines Unternehmens nutzbar und nach außen hin abgeschottet sind (**Private Cloud**).

Eine Mischform bildet die sogenannte **Community Cloud**, bei der IT-Infrastrukturen und Dienste einer Private Cloud einem **begrenzten örtlich verteilten Nutzerkreis** verfügbar gemacht werden. Die **Community Cloud** scheint **am ehesten geeignet**, die Bedarfe einer zunehmend vernetzten und digitalisierten Produktion mit gleichzeitig hohen Anforderungen an **Integrität, Authentizität und Datenschutz** zu erfüllen.

3.2.2 Potenziale

Anwendungspotenziale cloudbasierter Produktionsplattformen liegen insbesondere dort, wo eine **hohe Vernetzung von Daten** und **Rechnersystemen** gefordert ist oder bereits vorliegt und Systeme sowie Nutzer **hohen Mobilitätsanforderungen** genügen müssen. Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele angeführt.

Kollaborative Entwicklungsprozesse

- Nutzung **gemeinsamer Entwicklungsplattformen (PaaS)** und sicherer örtlich verteilter Bereitstellung von Daten für einen begrenzten Nutzerkreis (Community Cloud)
- Vereinfachung der **Systempflege und Wartung**
- Schöpfung von Einspar- und Effizienzpotenzialen durch **Pay-per-use-Lizenzen** an Stelle statischer Arbeitsplatz- o. Gruppenlizenzen
- Sicherung der **Konsistenz** verteilt genutzter Daten und Entwicklungsumgebungen
- Erhöhung des **Vernetzungsgrades** und damit potenziell Erhöhung der **Effizienz der Entwicklungsprozesse**
- Vereinfachte Analyse von **Daten aus Prototypenbau, Produktionsanlauf und Betriebsdaten** zur schnelleren Reaktion auf Fehler und Reklamationen und zum **projektübergreifenden Wissensmanagement**

Steuerungsprozesse

- Flexible **Bereitstellung von Rechenleistung zur Steuerung von Maschinen und Anlagen** über **serverbasierte Rechnerstrukturen** und **Mehrkern-Rechnerarchitekturen**. Z. B. **komplexe Geometrieberechnungen/5-Achsen-Interpolation** oder **Sensordatenverarbeitung/In-Prozess- und Qualitätskontrolle**
- Vereinfachte **Verkettung von Maschinen und Anlagen** durch Kommunikation über gemeinsame Cloud-Speicherbereiche an Stelle heterogener Kommunikationsstrukturen
- **Retrofitting von Altanlagen** mit neuer Steuerungstechnologie
- Zunehmende **Auflösung der Hardwareabhängigkeit** von Steuerungsfunktionen durch **Virtualisierung**. Einbindung von **Altanlagen** (Legacy-Systemen), deren **Betriebssysteme** bzgl. **IT-Sicherheitsfunktionen** nicht mehr unterstützt werden

- **Vereinfachte Betriebsdatenerfassung** über standardisierte Schnittstellen
- Bereitstellung von **Automatisierungsfunktionen »as a Service«**

Fertigungstechnologie

- Sichere **Verwaltung von Technologieparametern**
- Effiziente Replikation identischer Fertigungsprozesse

Inbetriebnahme, Betrieb, Instandhaltung und Wartung

- Erfassung von **Leistungsparametern von Maschinen und Anlagen** in einer Private Cloud oder Community Cloud
- **Korrelation der Daten** von Teilsystemen von Maschinen und Anlagen; dadurch entsteht Potenzial zur **Identifikation von Beziehungen (Korrelationen) und Abhängigkeiten** (Kausalitäten) zwischen Teilprozessen, beispielsweise zur **Optimierung des Energieeinsatzes** oder der **Wartungszyklen**
- Effiziente Unterstützung von **Wartungs- und Inbetriebnahmearbeiten** durch **App-basierte Videotelefonie** mit Fachpersonal per Smartphone oder Smart Glasses
- Effiziente **standortübergreifende Bereitstellung von Wissen** zur Datenanalyse und **Mustererkennung von qualitätsrelevanten Prozessdaten**
- **Effizientere Datenakquisition** mittels **App-basierter CAQ-Werkzeuge** per Smartphone, Tablet oder Smart Wearables

Neue Geschäftsmodelle

- Engere Kundenbindung durch **eigene Dienste-Plattformen**, Einbindung eigener Produkte auf Plattformen anderer Anbieter (Beispiele: VFK, Axoom, Mind-Sphere oder auch Bosch IoT)

Wertschöpfungspotenziale cloudbasierter Produktionsplattformen können sowohl direkt durch die Nutzung von Cloudtechnologien in der Produktion erschlossen werden als auch indirekt durch die Leistungen zur Integration und zum Betrieb der cloudbasierten Produktionsplattformen. Abbildung 3.2.1 gibt hierzu eine Übersicht.

Direkte Wertschöpfungspotenziale für den Betreiber cloudbasierter Produktionsplattformen ergeben sich jedoch insbesondere durch **Mehrwertdienste**, die hierauf aufsetzen:

- Auftragsverwaltung/Anpassung von Produktionsplänen
- Programmierung von Maschinen und Anlagen
- Intelligente Datenanalyse und Zustandsvorhersage
- Mobile Bereitstellung von Daten
- Visualisierung von Komponenten, Systemen und Daten
- Reporting

3.2.3 Stand der Technik

Spezialisierte Cloud-Plattformen, die mit ihren Strukturen und Diensten speziell Prozesse und Abläufe in der Produktion unterstützen, sind noch in der Entwicklung. **Etablierte Unternehmen aus der IT und Automatisierungstechnik**, aber auch **Start-up-Unternehmen** entwickeln oder erweitern Plattformen und Dienste für die **Optimierung von Produktionsabläufen** [36, 37]. Die Schwerpunkte dieser Entwicklungen liegen zumeist im Bereich von Prozessen des **Enterprise Resource Planning (ERP)** wie **Auftragsverwaltung, Ressourcenmanagement, Steuerung der Logistik** oder dem **Berichtswesen**. Zunehmend werden auch Potenziale der **cloudbasierten Datengewinnung** für die übergreifende **Datenanalyse** und **Visualisierung** erschlossen und entsprechende Lösungen angeboten [38].

Der **limitierende Faktor** für die Anwendung in der Fertigung liegt heute jedoch in den **Schnittstellen** zwischen Produktionsanlagen und Cloud-Infrastrukturen. Verschiedene Entwicklungsaktivitäten befassen sich derzeit mit dieser Herausforderung [39, 40, 41, 42]. Ein sich durchsetzendes Protokoll für die Kommunikation zwischen Maschinen untereinander und mit betrieblichen IT-Systemen ist **OPC-UA**. Die plattform- und herstellerübergreifende Implementierung des OPC-UA Standards mit der Möglichkeit zur **semantischen Beschreibung** von Informationen bietet auch die Einbindung von Daten aus der Cloud. Es stehen **Server-Client- und Publisher-Subscriber-Architekturen** in **textbasierter** und **binärer Kodierung** zur Verfügung. Die Absicherung des Datentransports durch öffentliche Netze erfolgt durch in OPC-UA integrierte aktuelle Methoden der **Verschlüsselung, Authentifizierung**, Autorisierung und **Integritätsprüfung** [43].

IML-Cloud

Logistics Mall, eine Entwicklung des **Fraunhofer IML** und **Fraunhofer ISST** im Rahmen des Fraunhofer Innovationsclusters »**Cloud Computing für Logistik**«, ist ein zentraler Handelsplatz für einzelne **Logistik-IT-Dienste** bis hin zu **komplexen Logistikanwendungen** und **kompletten Logistikprozessen**, die als Produkte angeboten werden. Unternehmen können ihre benötigten Logistikdienstleistungen bedarfsbezogen zusammenstellen und in der Logistics Mall betreiben. Softwarehersteller bieten innerhalb der Mall nicht komplette Module, sondern einzelne, nur **wenige Funktionen** umfassende Bausteine an. Anwender können gezielt die **Funktionen mieten**, die zur Unterstützung ihrer Prozesse notwendig sind. Der Erwerb einer Softwarelizenz ist nicht mehr notwendig, sondern es wird ein **Dienste-Abonnement** abgerechnet [44].

Voraussetzung für die Integrationsfähigkeit der in der Logistics Mall zusammengestellten IT-Services für den späteren Betrieb ist ein **gemeinsamer Standard**, der die zwischen den IT-Services auszutauschenden Informationen **syntaktisch** und **semantisch** definiert [45].

3.2.4 Forschungsaktivitäten und -bedarfe

Die Potenziale cloud- und serviceorientierter IT-Strukturen gehen über den derzeitigen Stand der Technik weit hinaus. Die **Auflösung der Automatisierungspyramide** (vgl. Abb. 3.2.2) führt von einer hierarchischen Informations- und Kommunikationsstruktur hin zu einer hochvernetzten Struktur, mit der die klassische Trennung von der Feldebene über Zellen- und Leitebene bis hin zur Ebene der Fabrik- und Unternehmenssteuerung weitgehend überwunden wird.

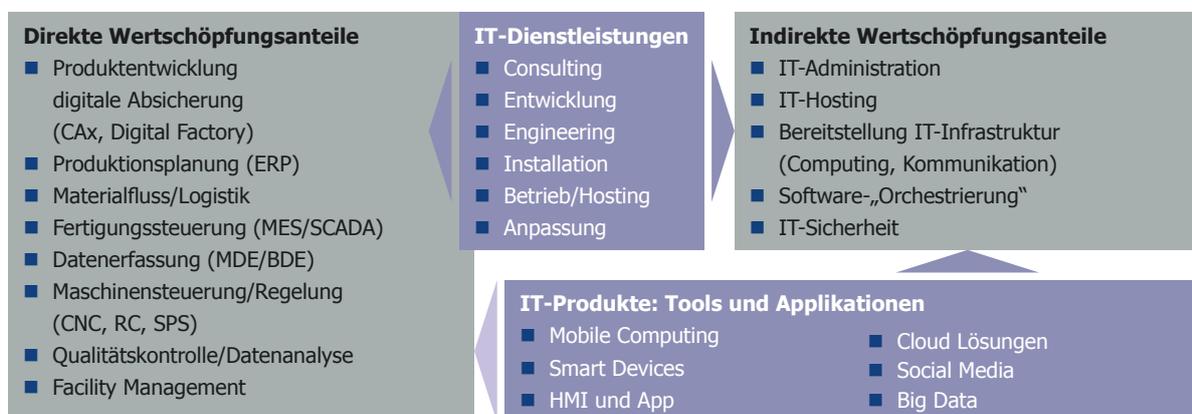


Abb. 3.2.1 Direkte und indirekte Wertschöpfungsanteile in der Nutzung cloudbasierter Produktionsplattformen

Mit der Vernetzung der Systeme ergeben sich neue Potenziale, die Funktionen der Automatisierung, insbesondere der Steuerung und Regelung, aber auch der Datenerfassung und komplexen Datenanalyse, effizienter verfügbar zu machen. Der **Effizienzgewinn** resultiert insbesondere aus der Fähigkeit cloudbasierter Produktionssysteme, benötigte **Informationen, Methoden** und **Algorithmen konsistent** auf dem jeweils neuesten Stand allen Teilsystemen verfügbar zu machen. Ein weiteres Potenzial resultiert aus der Möglichkeit, **Speicher- und Rechenleistung** flexibel an den Bedarf der produktionstechnischen Teilsysteme anzupassen. Diese »Elastizität« der Cloud wird als in der ursprünglichen Cloud-Definition des NIST [46] als »Rapid Elasticity« bezeichnet.

Im Rahmen verschiedener laufender Forschungsprojekte werden diese Potenziale für die produktionstechnische Anwendung erschlossen, die hier kurz geschildert werden.

Cloudbasierte Steuerungsplattformen

Das Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekts **pICASSO – Industrielle Cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit Cyber-physischen Systemen** [47] ist die Erschließung von Effizienzgewinnen durch eine **flexible Bereitstellung von Steuerungstechnik für Cyber-physische Systeme** in der industriellen Produktion. Die vorhandene, monolithische Steuerungstechnik wird aufgebrochen, modularisiert und durch Mechanismen des Cloud-Computing, wie zentraler Datenverarbeitung und **serviceorientierten Softwarearchitekturen**, erweitert (vgl. Abb. 3.2.3).

Die Ziele dieses Projektes stehen in engem Zusammenhang mit Herausforderungen, die allgemein für die Erschließung der Potenziale cloudbasierter Produktionssysteme zu lösen sind.

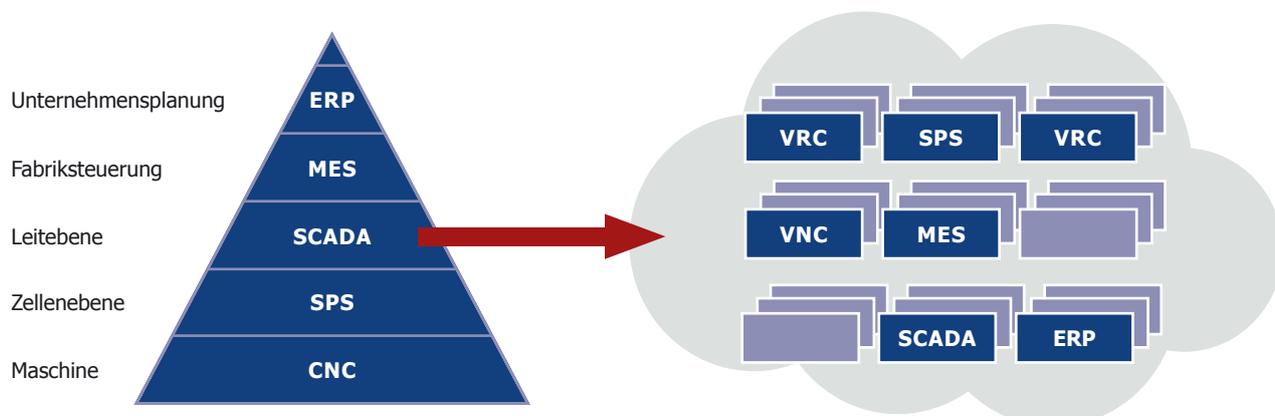
Echtzeitfähigkeit von Cloud-Plattformen in der Produktion

Die Integration und Vernetzung von Produktionssystemen in der Cloud stößt aktuell insbesondere dort an ihre Grenzen, wo **harte Echtzeitanforderungen** existieren. Diese zeigen sich speziell bei digitalen Regelkreisen, beispielsweise der **Regelung von Lage und Geschwindigkeit** mit Regeltakten von **unter einer Millisekunde** bei gleichzeitig geforderter **geringer Latenz** und **Zeitschwankung** (Jitter).

Die derzeitigen Betriebssystem- und Kommunikationsstrukturen von Cloud-Plattformen sind bisher nicht auf derartige Anforderungen ausgerichtet. Daher wird im o.g. Projekt pICASSO auch die Echtzeitfähigkeit von Cloud-Plattformen im Hinblick auf Steuerungssysteme untersucht. Impulse sind darüber hinaus mit der Einführung der nächsten **Mobilfunkgeneration** (5G) zu erwarten.

Schnittstellen zwischen Cloud und Produktionssystem

Neuere Produktionsanlagen verfügen zumeist mit ihren Steuerungen über Schnittstellen, die eine **einfache Vernetzung** mit anderen Rechnersystemen über **Ethernet-basierte Kommunikationsstrukturen** erlauben. Bei älteren Maschinen und Anlagen stellt sich dies jedoch häufig anders dar. Das Ziel des ebenfalls durch das BMBF geförderten Forschungsprojekts **RetroNet – Retrofitting von Maschinen und Anlagen für die Vernetzung mit Industrie 4.0 Technologie** [48] ist daher die Entwicklung von Komponenten und Methoden, die



ERP Enterprise Resource Planning, MES Manufacturing Execution System, SCADA Supervisory Control and Data Acquisition, SPS Speicherprogrammierbare Steuerung, CNC Computerized Numerical Control, VNC Virtual Numerical Control, VRC Virtual Robot Controller

Abb. 3.2.2 Auflösung der Automatisierungspyramide

die Kommunikationsfähigkeit und Vernetzung des vorhandenen, im Unternehmen über Jahre gewachsenen Maschinen- und Anlagenbestands ermöglichen. Die Integration in Cyber-physische Systeme erfolgt hierbei auf der Basis einer **Verbindungs-(Konnektoren-)Technologie**, die als Bindeglied zwischen der einzelnen Maschine und der Cyber-physischen Architektur (Hard- und Software) fungiert. Impulse für die Verbindung zwischen Cloud und Produktionssystemen sind darüber hinaus von Entwicklungen im Bereich OPC-UA zu erwarten, die zu einer **Vereinheitlichung der Schnittstellen auf softwaretechnischer Ebene** führen.

Dienstbasierte Bereitstellung von Automatisierungsfunktionen

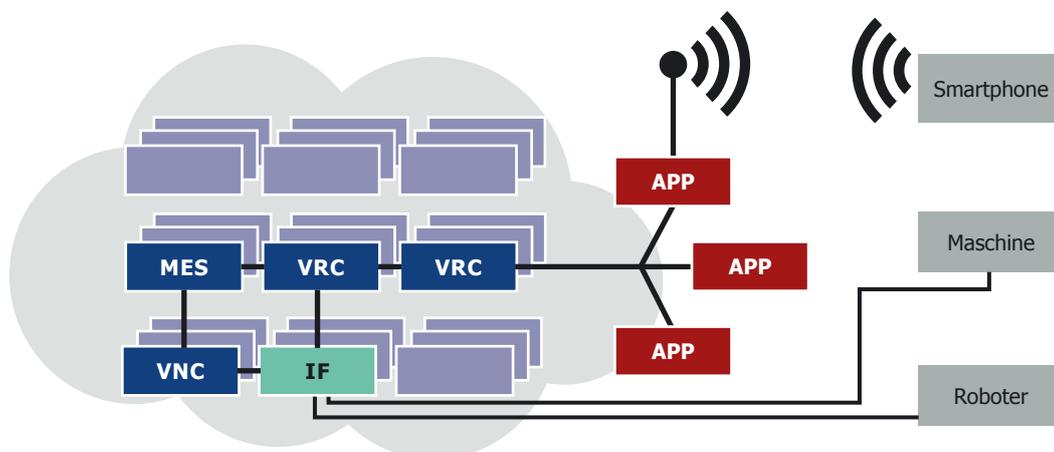
Ein wesentliches Element cloudbasierter Produktionsplattformen ist die **Entkopplung der bereitgestellten Funktionen und Dienste von spezifischer Hardware**. Dies führt perspektivisch zu Kostenvorteilen, da für die Bereitstellung der bisher in der Automatisierungspyramide hierarchisch geordneten Funktionen nunmehr **flexibel skalier- und austauschbare Rechnerstrukturen** genutzt werden können, die über Cloudmechanismen eine diensteorientierte Nutzung im Sinne **Infrastructure as a Service, Platform as a Service** oder **Software as a Service** erlauben. **Serviceorientierte Softwarearchitekturen (SOA)** bilden eine Basis für die **softwaretechnische Strukturierung automatisierungstechnischer Funktionen** in der Cloud, die es erlauben, auch komplexe Funktionalität aus einfacheren Diensten zu »orchestrieren«. Ein Beispiel ist die Integration komplexer Funktionen zur Bildverarbeitung und Mustererkennung auf Basis

grundlegender Dienste zum Bildeinzug oder zur Bildvorverarbeitung für die optische Qualitätskontrolle. Insbesondere komplexe automatisierte Funktionen, die – wie die **optische Qualitätskontrolle** – potenziell von der Fähigkeit des **maschinellen Lernens** profitieren, können in cloudbasierten Produktionsplattformen effizient integriert werden, da über die Cloud mit Methoden des **maschinellen Lernens** und der **Mustererkennung** in der Produktion gesammeltes »visuelle Wissen der Fabrik« effizient auch anderen automatisierten Prozessen verfügbar gemacht werden kann. Die Abbildung 3.2.4 zeigt prototypische Realisierungen **dienstbasierter Automatisierungsfunktionen** für die **Bewegungssteuerung von Maschinen** [49], der **Bildverarbeitung** und **Mustererkennung** sowie der **Augmented Reality**, die derzeit im Rahmen von Forschungsarbeiten zu cloudbasierten Produktionsplattformen untersucht werden [50]. Das Ziel ist die Entwicklung einer Rahmenarchitektur zur cloud- und dienstbasierten Automatisierung im Sinne eines **Automation as a Service**.

Verzeichnisdienste

Eine **effiziente Orchestrierung dienstbasierter Funktionalität** der Automatisierungspyramide auf cloudbasierten Produktionsplattformen setzt voraus, dass die verfügbaren Dienste und ihre Schnittstellen für den Anwender transparent sind. Hierzu bedarf es zukünftig einer **Verzeichnisdienststruktur** im Sinne von »Gelbe Seiten für Industrie 4.0« [51], mit der Mehrwertdienste für cloudbasierte Produktionsplattformen, insbesondere in den folgenden Anwendungsbereichen flexibel verwaltet und verzahnt werden können:

- Auftragsverwaltung/Betriebsdatenerfassung,



MES Manufacturing Execution System, VRC Virtual Robot Controller, VNC Virtual Numerical Control, IF Interface, APP Application

Abb. 3.2.3 Basismodell cloudbasierter Steuerungssysteme/ Forschungsprojekt pICASSO

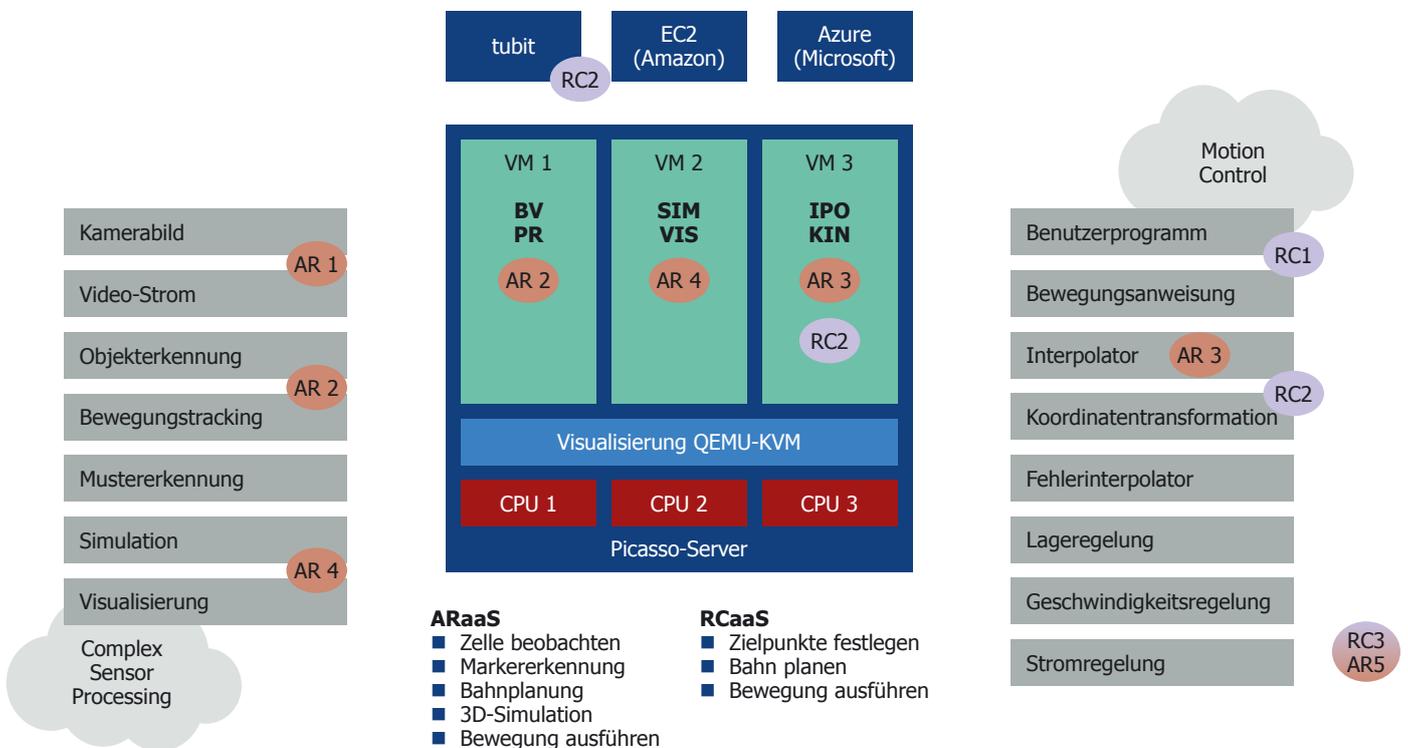
- Condition Monitoring
- Geometrieberechnungen/ Kollisionskontrolle
- komplexe Sensordatenverarbeitung
- Qualitätsprüfung
- Energieeffizienzoptimierung
- Verkettung/Synchronisation mit Peripherie
- Simulation
- Prozess- und Geometrievisualisierung sowie
- Datenaustausch/Synchronisation mit Materialflussprozessen/übergeordneten Steuerungen.

IT-Sicherheit

Das **Virtual Fort Knox (VFK)** des **Fraunhofer IPA** vereint die Aspekte einer **PaaS-, SaaS-** und **IoT-Plattform**, um Entwicklern und Kunden eine **gemeinsame technologische Basis** bzw. **Plattform** zu bieten. Das VFK ist eine **föderative cloudgestützte IT-Plattform**, die produzierenden Unternehmen **produktionsbasierte IT-**

Services bietet. Hochautomatisierte **Integrationsfunktionalitäten** ermöglichen es der Plattform, **sichere, flexible** und **individuelle IT-Lösungen** in kurzer Zeit und mit geringem Aufwand bereitzustellen und Produktionsmittel schnell und aufwandsarm über sog. Integrations-services anzubinden. Endkunden können die Services bzw. Funktionalitäten auswählen, die sie benötigen und sie flexibel kombinieren, um die optimale Lösung zusammenzustellen. Dies verringert sowohl die **Implementierungs-, Integrations-** als auch die **Betriebskosten** beträchtlich. Neue Softwarefunktionalitäten für Endkunden können schneller umgesetzt und bereitgestellt werden [52].

Zur Lösung der **Interoperabilitäts- und Schnittstellenkompatibilitäts-Problematik** trägt der **Manufacturing Service Bus (MSB)** bei: eine Integrationsplattform, die auf einer **serviceorientierten Architektur** basiert und eine flexible Verknüpfung unterschiedlichster produktionsbasierter IT-Services erlaubt und somit **Kernkomponente von CPPS** ist [53, 54].



BV Bildverarbeitung, PR Pattern Recognition, AR Augmented Reality, SIM Simulation, VIS Visualisierung, aAs ... as a Service, IPO Interpolator, KIN Kinematikmodell, RC Robot Control

Abb. 3.2.4 Dienstbasierte Bereitstellung von Funktionen zur Bewegungssteuerung und Bildverarbeitung in der Cloud im Labormaßstab

Vendor driven, customer driven, community driven

Treiber für Plattformen in **Business Ecosystems** können die **Anbieter von Produkten und Dienstleistungen (vendors)**, die **Käufer (customer)** oder die **Gemeinschaft (community)** um das Produkt herum sein. Erste Beispiele zeigen, wie verschiedene Plattfortmtypen entstehen und was sie bewirken können.

Die **Landwirtschaft** ist einer der **fortschrittlichsten Sektoren** hinsichtlich der Wertschöpfung in digital vernetzten Unternehmensverbänden, den sogenannten Ecosystems. Der **Landmaschinenhersteller Claas** hat durch die Gründung seiner Tochterfirma **Farmnet 365** [55] eine Schlüsselrolle in der Branche übernommen. Über eine Plattform, auf der Daten der Landmaschinen, Wetterdaten, Erntedaten und vieles mehr gespeichert werden, generieren **Apps** durch die **Auswertung der Daten** einen **Mehrwert** für den Landwirt. So kann beispielsweise die Düngemittelausbringung auf Basis historischer Erntedaten optimiert oder die Route der Landmaschine bei absehbarer Verschlechterung des Wetters schneller abgefahren werden. Entscheidend für den Kundennutzen ist die **Verfügbarkeit aller Services über eine Plattform**, da der Kunde kein Interesse daran hat, sich in mehreren Plattformen für die jeweiligen Aufgaben anzumelden und seine Daten an verschiedenen Stellen abzulegen. Deshalb könnte die Initiierung der Plattform als Anbieter-getrieben (vendor driven) angesehen werden und die Anforderung an die Lieferanten der Landwirte, diese Plattform zu nutzen, als Kunden-getrieben (customer driven).

Im Falle von Farmnet 365 zahlt der Landwirt monatlich für den Zugriff auf die Plattform und deren Services und hinterlegt seine aktuellen Daten, die über Sensoren in seinen Geräten erfasst werden, in der Cloud. Diese werden von verschiedenen **Apps verwendet**, um einen **Mehrwert** zu generieren. Die Apps werden von den Partnern auf der Plattform zur Verfügung gestellt und können per **Download** auf die **mobilen Endgeräte** der Landwirte übertragen werden. Zu den Partnern gehören andere Landmaschinenhersteller wie Horsch, Wetterdienste von Versicherungen wie der Allianz oder Saat- bzw. Düngemittelhersteller wie die Amazonen-Werke.

»Community driven« ist das oben beschriebene **Virtual Fort Knox des Fraunhofer IPA** [56], während etwa die **Produktionsplattform Axoom** »vendor driven«, also von einem Anbieter (in diesem Fall **Trumpf**) gesteuert wird.

3.2.5 Migrationspfade für den Anwender

Der Übergang von herkömmlichen Strukturen der Informations- und Kommunikationstechnik in der Produktion, wie sie bisher in der Automatisierungspyramide abgebildet sind, zu cloudbasierten Produktions-

plattformen lässt sich in mehreren Schritten vollziehen. Ein wesentlicher Schritt ist zunächst die **Entkopplung der informationstechnischen Funktionalität von spezifischer Hardware**.

Abbildung 3.2.5 zeigt ein Stufenmodell am Beispiel einer cloudbasierten Steuerung. Zunächst werden auf **Stufe 1 die Steuerungsfunktionen modularisiert** und mit **Schnittstellen** versehen, die eine **hardwareunabhängige Kommunikation** untereinander ermöglichen. Die Virtualisierung erfolgt durch direkte Integration der Module in die Laufzeitumgebung einer sogenannten Virtuellen Maschine, die standardisierte Rechenhardware emuliert und eine portierbare Betriebssystembasis bereitstellt. Als **zweiter Schritt** folgt dann die **Auslagerung der virtualisierten Funktionen** auf Serverstrukturen oder Cloud-Plattformen. Auf der **dritten Stufe** folgt die **Nutzung der Cloud-Mechanismen** wie bedarfsgerechte Skalierung und Anbindung von Mehrwertdiensten.



Abb. 3.2.5 Stufenmodell zur Nutzung von Cloud-Mechanismen

3.2.6 Bezüge/ Schnittstellen zu den anderen Handlungsfeldern

Cyber-physische Systeme bilden mit ihrer **Fähigkeit zur Erfassung und dezentralen Verarbeitung von Daten** an Maschinen und Anlagen die Basis für die dezentrale Gewinnung produktionstechnischer Daten **dicht am Prozess**. Cloud-Plattformen stellen Mechanismen zur verteilten Datenhaltung sowie zur Bereitstellung von Rechenleistung und Diensten bereit. CPS hingegen stellen die Schnittstelle zur Außenwelt dar.

Für die Erfassung des **digitalen Schattens** für Prozesse bilden Cloud-Plattformen die Grundlage zur **strukturierten Zusammenführung** von Daten aus einer **großen Anzahl verteilter Quellen**. Eine wesentliche Anforderung für die Zukunft besteht darin, **Quellen mit unterschiedlichen Datenraten**, beispielsweise horizontal aufgrund **verschiedener Sensorprinzipien** oder vertikal aufgrund **unterschiedlicher Zeitanforderungen** der Prozesse auf unterschiedli-

chen Ebenen der bisherigen Automatisierungspyramide **echtzeitfähig zu synchronisieren**.

Echtzeitfähige Cloud-Plattformen benötigen daher Mechanismen, um den sogenannten digitalen Schatten von Prozessen sowohl **zeitsynchron** erfassen wie auch **reproduzieren** zu können. Hierbei spielen die im Fokus von Forschung und Entwicklung stehenden **Time Sensitive Networking Systems (TNS)** zur **zeitsynchronen Netzwerkübertragung** eine besondere Rolle.

Die **Rechenleistungen**, die zur Nutzung der mit dem digitalen Schatten gewonnenen Daten – beispielsweise in der **komplexen Prozesssimulation, Mustererkennung** und **Prädiktion** – benötigt werden, stehen heute an den dezentralen Maschinensteuerungen nicht zur Verfügung. Cloud-Plattformen bilden somit die Grundlage für die **dienstbasierte Bereitstellung von mächtiger Rechen- und Speicherleistung** für **komplexe Methoden** und **Algorithmen** wie beispielsweise für das **maschinelle Lernen** mit sogenannten **Convolutional Neural Networks** und **Deep Learning Verfahren**. Cloud-Plattformen sind damit zukünftig unabdingbar, um die in jüngster Zeit zu beobachtenden Fortschritte im Bereich **Data Analytics** im produktionstechnischen Umfeld nutzen zu können.

3.3 Digitaler Schatten

3.3.1 Definition und Entwicklung

Der **Digitale Schatten** als ein Handlungsfeld von Industrie 4.0 ist das »hinreichend genaue« **Abbild der Prozesse »in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten«** zu schaffen. Im Einzelnen gehört dazu die Beschreibung der **notwendigen Datenformate**, der **Datenauswahl** und der **Datengranularitätsstufe**.

Zur Erzeugung des Digitalen Schattens muss zunächst die Datengrundlage aus verschiedenen Datenquellen, bspw. der Produktion oder der Entwicklung, geschaffen werden, bevor diese Daten gefiltert, verdichtet und weiter verarbeitet werden. Der **Digitale Schatten** erfordert zunächst eine **umfassende Datenaufnahme** zu definierender Produktionsdaten in ihrem **jeweiligen Kontext**. Die Produktionsdaten setzen sich aus verschiedenen Quellen zusammen. Parallel muss eine **Fehlerdetektion** sicherstellen, dass nur **fehlerfreie Datensätze** erzeugt und gespeichert werden. Ebenso muss bei der Speicherung der Datensätze eine eindeutige **Datenrückverfolgbarkeit** sichergestellt werden, um eine **valide Auswertungsbasis** zu schaffen. Der Digitale Schatten stellt in Analogie zum Flugschreiber in der Luftfahrt einen

Produktionsschreiber dar, der Auskunft über den vergangenen und aktuellen Zustand ermöglicht und somit auch die Basis für die **Prognose zukünftiger Zustände** darstellt.

Neben dem Begriff des Digitalen Schattens ist der Begriff des **Digitalen Zwilling** verbreitet. Der Digitale Schatten überführt zunächst den **realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt**. Der **Digitale Zwilling** kann darauf aufbauend durch ein **Prozessmodell** und **Simulation** ein **möglichst identisches Abbild der Realität** liefern. Gegenstand dieses WGP-Standpunkts ist jedoch nur der Digitale Schatten. Im Folgenden wird der notwendige Forschungsbedarf im Themenfeld des Digitalen Schattens aufgezeigt, den es zu bearbeiten gilt. Zukünftig muss forschungsseitig beantwortet werden, was die hinreichend genauen sowie relevanten Daten sind.

Zeitliche Einordnung

Die Entwicklung und der Gedanke des Digitalen Schattens haben im Kontext von Industrie 4.0 durch **bessere technologische Möglichkeiten** der **Vernetzung** und **Verarbeitung** von Daten neue Bedeutung gewonnen. Dennoch ist die Bestrebung, ein **virtuelles Abbild** der Produktion zu schaffen, **kein neues Phänomen**. Mit Beginn von Arbeitsteilung und räumlicher Trennung des Orts der Datenerfassung und der Datenbereitstellung wurde die Erhebung von Daten relevant. Die historische **Entwicklung der Datenerfassung und -bereitstellung** ist in Abbildung 3.3.1 zusammengefasst.

Im analogen Zeitalter waren die Dauer der Datenerfassung und auch der Datenbereitstellung abhängig von der **räumlichen Distanz** von **Datenerfassungsort** und **Datenbereitstellungsort**. Der dominierende Faktor waren die **Transportzeit** und die **manuellen Aufwände** bei der Kopie von Daten. Im **digitalen Zeitalter** der **monolithischen Systeme** wurde durch die Möglichkeit der digitalen Datenerfassung und **Verarbeitung auf Großrechnern** die Zeitspanne zwischen Datenerfassung und -bereitstellung stark verkürzt. Durch die ab 1990 entstandenen Anfänge der **cloudbasierten Datenspeicherung** und **-verarbeitung** wurde diese Zeitdauer erneut stark reduziert. So können im digitalen Zeitalter mit vernetzten Systemen Daten aus unterschiedlichsten Quellen wie **Maschinendatenerfassungssysteme (MDE)**, **Auftragsdaten** oder **Social-Media-Informationen** dezentral verarbeitet und eingesehen werden. Der **Mehrwert für Unternehmen** besteht dabei aber nicht per se im Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), sondern in deren sinnvoller Nutzung [58].

Die Abbildung von Daten, bestehend aus der Erfassung und der Bereitstellung, unterliegt somit den technischen Möglichkeiten der Zeit. Im **Zeitalter der Digitalisierung** ermöglichen technische Innovationen

vielfältige und mächtige Anwendungen. Es zeigen sich **drei Kernaspekte** zur Beschreibung der **Vorteile der Digitalisierung**:

- Die **Informationsverfügbarkeit** beschreibt die Möglichkeit, Zugang zu den erhobenen Daten zu erhalten. Hierbei kann zwischen **ortsgebundener** und **ortsungebundener Verfügbarkeit** unterschieden werden. **Ortsgebundene Informationen** sind **lokal gespeichert** und können von **extern nicht abgerufen** werden. **Ortsungebundene Informationen** liegen z. B. in der Cloud vor und können von **überall eingesehen** werden. Zudem wird zwischen der Zugriffsmöglichkeit differenziert: Zugriff für mehrere Nutzer zur gleichen Zeit oder ausschließlicher Zugriff durch einen Nutzer zu einem Zeitpunkt.
- Die **Informationsreliabilität** beschreibt die **Verlässlichkeit einer Information**. Bspw. können über Prüfsummen und Verschlüsselungen **Manipulation** und **Übertragungsfehler** ausgeschlossen werden. Über die **Protokollierung von User-Login, Signierung** und **Zertifikate** kann die **Quelle der Daten** sichergestellt werden. Die Verwendung von Sensorik ermöglicht

die **personenunabhängige, konstante Datenaufnahme** und schafft damit **objektive Daten**.

- Die **Informationsschnelligkeit** wirkt sich sowohl bei der Erfassung als auch der Weitergabe von Daten aus. **Funkanbindung** und **Breitbandverbindungen** ermöglichen die **simultane, echtzeitnahe Erfassung** einer **Vielzahl von Sensoren und Eingaben**. Großrechner, vernetzte Serverfarmen oder Rechnerleistung aus der Cloud ermöglichen hohe **Verarbeitungsgeschwindigkeiten**; Smartphones und mobile Geräte ermöglichen die **echtzeitnahe Informationsbereitstellung**.

Die Anwendungs- und Wertschöpfungspotenziale, die sich aus den Neuerungen durch Erhebung des Digitalen Schattens ergeben, werden im Folgenden aufgezeigt.

3.3.2 Potenziale

Getrieben durch das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, kommt der Erfassung und Auswertung generierter Daten eine bedeutende Rolle zu. Die Daten-

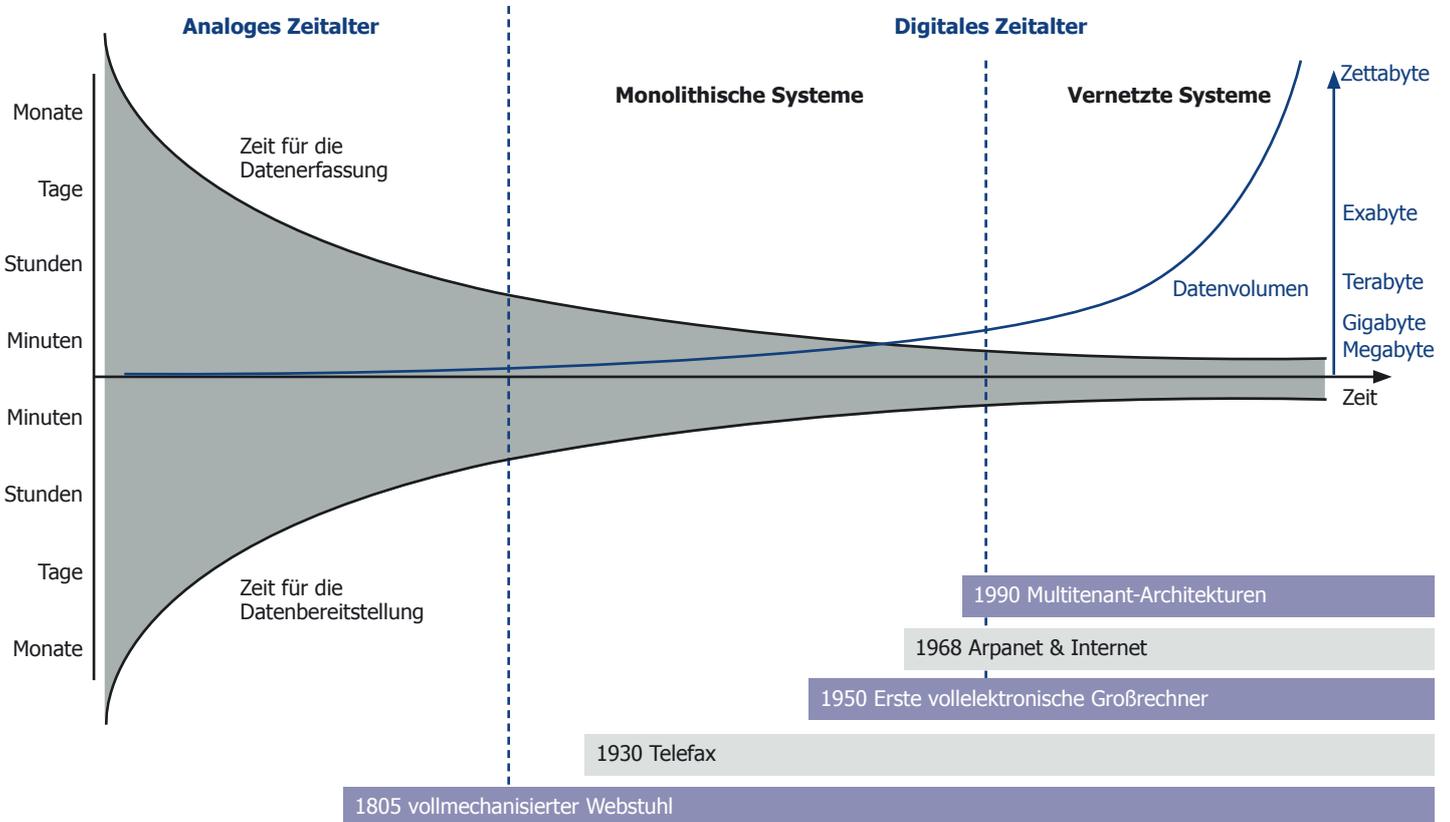


Abb. 3.3.1 Zeitliche Einordnung des Digitalen Schattens ©DFKI [57]

aufnahme und -verarbeitung umfasst dabei die Erhebung und Auswertung von Daten zu **Prozessen, Qualitätsmerkmalen, Produkten** und **Beschäftigten** sowie deren Umfeld. Dabei wird konkret das Ziel der **Prozess- und Qualitätsverbesserung** verfolgt. Speziell in dem Bereich der Produktion, die sich steigenden Qualitätsanforderungen und einer **erhöhten Komplexität** sowie einem **hohen Kostendruck** gegenüber sieht, bringt die Erfassung und Analyse von Prozessdaten einen **großen Mehrwert**. Erst durch die **Nutzung des Digitalen Schattens** wird der **Produktionsprozess transparenter** und **Ursachen für Abweichungen** können leichter identifiziert werden. Hierbei bildet der Digitale Schatten die Basis für **Methoden** und **Modelle** der Datenauswertung und -analyse (vgl. Abbildung 3.3.2).

Auf Basis des Digitalen Schattens können in einem ersten Schritt Fragen hinsichtlich vergangener Ereignisse beantwortet werden (**»Warum ist was passiert?«**). Mittels Verfahren der **deskriptiven Datenanalyse** lassen sich Rückschlüsse auf vergangene Ereignisse ziehen. In einem weiteren Schritt (**Diagnostic Analytics**) werden die Datensätze durch **Datenexploration** auf **Korrelationen** und **Beziehungen** untersucht. Hierbei steht die Frage **»Was passiert?«** im Vordergrund. Die dritte Stufe (**Predictive Analytics**) erstellt durch **statistische Modelle** und **Methoden** Prognosen und beantwortet somit die Frage, **»Was wird mit welcher Wahrscheinlichkeit passieren?«** In der vierten Stufe werden anhand von **Optimierungsalgorithmen** und **Si-**

mulationsansätzen Handlungsempfehlungen abgeleitet (**»Was sollte getan werden?«**) [59]. Konkret auf den Fertigungsprozess bezogen, bildet die Datenerfassung die Basis für Data Analytics und unterstützt somit die Fehler- und Ursachenanalyse. Bei Auftreten eines Fehlers kann anhand des Digitalen Schattens z. B. ermittelt werden, was passiert ist und warum eine Abweichung vom Soll-Prozess stattgefunden hat. Des Weiteren kann durch die Auswertung der Daten vorhergesagt werden, was im weiteren Prozessverlauf passieren wird. Hieraus lässt sich eine Handlungsempfehlung ableiten und die Entscheidungsfindung wird unterstützt. So können z. B. im Sinne der **Feedbackward-Chain** zukünftige Fehler vermieden werden, die Feedforward-Chain ermöglicht darüber hinaus die **»Rettung«** eines Bauteils durch potenzielle Parameteranpassung nachfolgender Fertigungsschritte.

In anderen Branchen wurde das wirtschaftliche Potenzial der Datenerfassung bereits erkannt und genutzt. So z. B. in der Verkehrsbranche: Das **Siemens Mobility Data Service Center** befasst sich mit der **Datenanalyse von Zügen**. Aus jährlich bis zu **200 Milliarden Datenpunkten**, die von **100 Triebzügen** produziert werden, lässt sich der **Verschleiß oder Ausfall bestimmter Komponenten** vorhergesagen. Daten über die Beschaffenheit der Schienen, die Steigung, das Gefälle und das Wetter werden während des Betriebs registriert. Der **Wartungsprozess** kann so optimiert und dem Kunden ein **effizienter Einsatz der Fahrzeuge** garantiert werden [60].

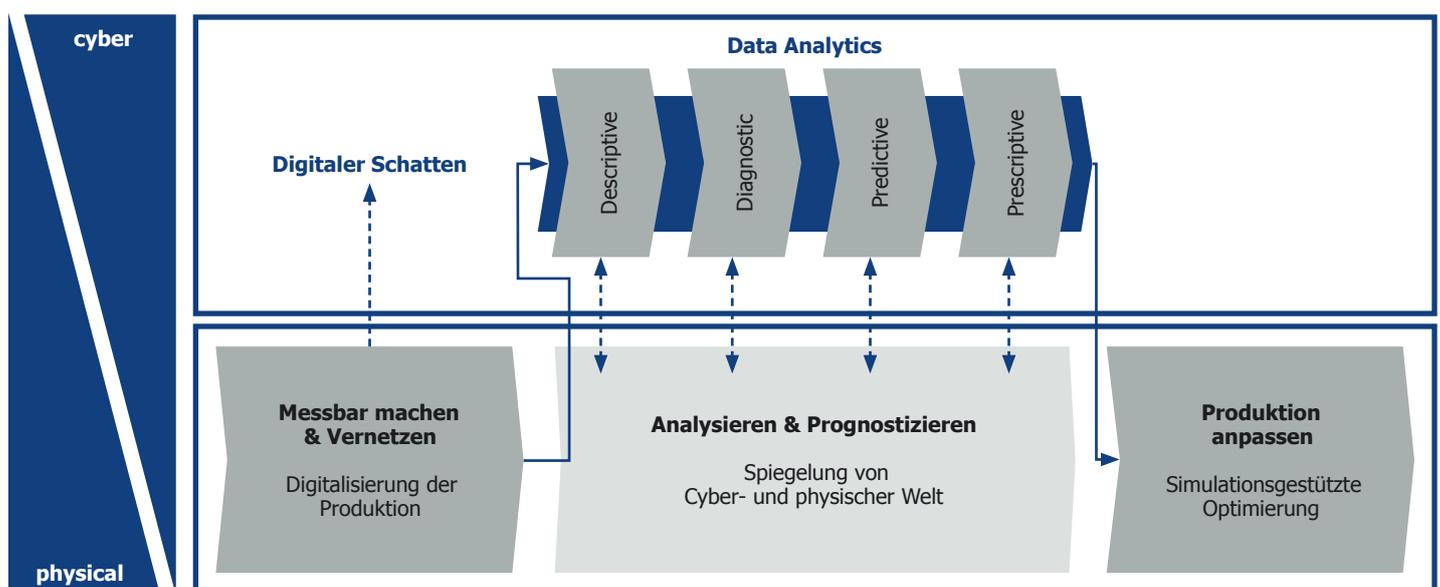


Abb. 3.3.2 Stufen der Datenauswertung und -analyse

3.3.3 Stand der Technik und Forschungsbedarfe

Um den aktuellen Stand der Technik darzustellen, wird das Handlungsfeld des Digitalen Schattens in **vier zu bearbeitende Forschungsfelder** gegliedert. Das erste Forschungsfeld ist die **Definition einer Datenstruktur**, welche alle benötigten Daten und deren Ausprägungen beschreiben muss. Darauf aufbauend ist die **Aufnahme der Daten** zu definieren. Durch **multimodale** und **multisensorische Datenaufnahme** kann das zuvor entwickelte Datenmodell mit den relevanten Daten gefüllt werden. Im Weiteren stellt die **Sensorfusion** sicher, dass die generierten Daten zu einer einheitlichen Datenbasis verknüpft werden. Abschließend ermöglicht der **Konsistenz- und Plausibilitätscheck**, dass nur fehlerfreie und eindeutige Daten gespeichert werden und in den Digitalen Schatten aufgenommen werden.

Datenstruktur/ Datenmodell

Die Nutzung von großen Datenmengen gilt als eine der Triebkräfte für die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0). Die Möglichkeit, **große und inhomogene Datenmengen** zu erfassen und praktisch in **Echtzeit zu verarbeiten**, ist die Grundlage für die weitergehende Nutzung. Bspw. können durch Analyse historischer Daten Rückschlüsse und Interpretationshilfen geschaffen werden (bspw. durch **Complex Event Processing** [61]), um Prognosen zukünftiger Ereignisse zu ermöglichen, bspw. über **deduktives Schlussfolgern** [62] oder ein **Pattern-Match-Verfahren** [63, 64]. Basis für Methoden aus dem Bereich der Data Analytics ist die Erfassung der Daten in der Produktion. Der Digitale Schatten muss das hinreichend genaue Abbild aller Prozesse auf Basis der relevanten Daten in Entwicklung, Produktion und Betrieb werden u.a. mit dem Zweck, eine **echtzeitfähige Auswertungsbasis** zu schaffen. In Abhängigkeit des Betrachtungsbereichs müssen hier erst die relevanten Daten identifiziert werden und in entsprechenden Datenformaten und -strukturen abgebildet werden (vgl. **Sachmerkmalsleiste, Header**). So können für verschiedene **Objektklassen** (z. B. Maschinen, Transportmittel, Transportträger, Produkte) die maximalen Sachmerkmalsleisten abgeleitet werden und unternehmensspezifisch angepasst werden. Der digitale Schatten bildet einen Prozess oder eine Prozesskette zwar vollständig ab, jedoch ist hierfür nicht immer eine sehr feine Datengranularität notwendig [65]. Beispielsweise interessiert in einem ersten Analyseschritt zum Auftragsfortschritt nicht jede einzelne Einstellung der Werkzeugmaschine.

Im Fokus zukünftiger Forschungstätigkeiten stehen Untersuchungen bezüglich der Entwicklung vollständiger Datenstrukturen und Untersuchungen hinsichtlich der **Informationsgranularität**. Denn für **komplexe Interpretation** von Daten ist immer auch das **notwendige Kontextwissen** (bspw. Fachwissen, Prozesskenntnis etc.) erforderlich [66]. Hierfür ist die Zusammenführung der Stärken des Maschinen- und

Anlagenbaus als Integrator mit den Kompetenzen der Automation und der IKT-Wirtschaft notwendig. Die so entstehenden Methoden, Ansätze und Best-Practice-Realisierungen müssen in den vielschichtigen Wertschöpfungsnetzwerken verbreitet werden und sollen hier zu einem interdisziplinären Wissens- und Technologietransfer führen.

Herausforderungen

Die vollständige Erfassung der betrieblichen Daten findet derzeit noch nicht in allen Unternehmen statt [67]. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, zunächst die notwendigen Datenstrukturen zu definieren. Der Einsatz von Technologien zur Datenerfassung und von Systemen zur Datenauswertung bedeutet eine initiale Investition von Unternehmen, die sich später durch effizientere Prozesse bezahlt machen.

Multimodale Datenaufnahme

Aktuelle Studien belegen, dass die **manuelle Aufnahme von Bewegungsdaten** in Unternehmen immer noch weit verbreitet ist [68, 69]. Erste Ansätze zur vollständig automatisierten Aufnahme auf dem Shopfloor mithilfe von **Sensortechnologien** sind vorwiegend auf **RFID** beschränkt. In anderen Anwendungsfeldern wie **Fahrerassistenzsysteme** (vgl. Abb. 3.3.3), **autonomes Fahren** und **Robotik** wird die **multimodale Datenerfassung**, eine Datenaufnahme über mehrere Quellen, bereits erfolgreich angewendet, um kontinuierlich ein hoch verlässliches und **realitätsgetreues Abbild** der Umwelt zu erstellen und dieses als **primäre Entscheidungsbasis** zu nutzen [70, 71]. Beispielsweise greifen **Fahrerassistenzsysteme auf GPS, integrierte Abstandssensoren** und **Kamerasysteme** zurück, um kontinuierlich die Umgebung zu erfassen und bei bestimmten Ereignissen die Fahrzeugführung zu beeinflussen und somit die Sicherheit des Fahrers zu gewährleisten [72, 73].

Die **multimodale Aufnahme** und **anschließende Fusion** von redundanten Daten hat gegenüber einzelnen Sensoren erhebliche Vorteile, wie z. B. die Sicherstellung

- verlässlicher Daten
- genauer Daten
- vollständiger Daten
- schnell erfasster Daten und
- günstig erzeugter Daten [75, 76].

Dies ist dadurch möglich, dass **Sensornetzwerke** die Vorteile einzelner Sensortechnologien vereinen können [77]. Die **RFID-Technologie** etwa hat sich aufgrund ihrer **Fehlerwahrscheinlichkeit** auf dem Shopfloor **nicht als einzelne Technologie** durchgesetzt [78, 79]. An dieser Stelle ist die Datenfusion mit den Daten anderer Sensortechnologien wie **Indoor GPS, Laser-** und **Bildverarbeitungs-**

systeme notwendig, um Unzulänglichkeiten einzelner Sensortechnologien auszugleichen und somit hoch verlässliche Daten zu erzeugen [80]. Ebenso verhält es sich mit der **Genauigkeit** und **Schnelligkeit** der erfassten Daten, die über **Sensornetzwerke** erheblich gesteigert werden können. Unabhängig von der Sensortechnologie können stets Übertragungsfehler beim Datenaustausch entstehen, weswegen eine **redundante Datenaufnahme** und anschließende **Datenfusion** die Vollständigkeit gewährleistet.

Sensorfusion kann zudem die Kosten senken, da mithilfe der Datenfusion nicht in eine einzelne hochwertige Sensortechnologien investiert werden muss, sondern die Integration mehrerer einfacher Sensoren die gleiche Information mit der gleichen Verlässlichkeit erzeugen kann [81]. Die Kombination mehrerer niedrig aufgelöster mobiler Kamerasysteme kann beispielsweise mobile Objekte besser detektieren als eine einzelne hoch aufgelöste statische Kamera [82].

Herausforderungen

Die wesentliche Herausforderung speziell bei der **multimodalen Datenaufnahme** in der Produktion ist die optimale Gestaltung und Nutzung des Sensornetzwerks mit dem Ziel, ein verlässliches Abbild der Produktion zu generieren [83, 84]. Dabei bestimmt die Gestalt eines Sensornetzwerks, abhängig von der **Art**, der **Menge** sowie dem **Ort**

der Sensortechnologien, die Nutzungsmöglichkeiten und somit die Verlässlichkeit des Digitalen Schattens. Multimodale Datenaufnahme kann

- unterschiedliche Daten
- mit unterschiedlichen Granularitätsstufen und
- in unterschiedlichen Frequenzen erfassen und somit

unterschiedlich **starke Redundanzen** erzeugen. Während mit **Granularität** die **Auflösungsgenauigkeit von Daten** gemeint ist, bedeutet die Frequenz die Häufigkeit gleicher Datenwerte. Der Ort eines Fertigungsauftrags kann beispielsweise entweder lediglich am Ende der jeweiligen Schicht rückgemeldet werden oder im Sekundentakt [85]. Redundanz bedeutet in diesem Kontext die Erfassung gleicher Datenwerte zum gleichen Zeitpunkt.

Multimodale Datenfusion

Multisensorische Fusion innerhalb von **Sensornetzwerken** bedeutet die Kombination von Sensordaten unterschiedlicher Herkunft hin zu einem **einzigem Darstellungsformat** (vgl. Abb. 3.3.4). Diese Technik der **multimodalen Datenfusion** wird bereits heute in einigen Feldern der Technik eingesetzt. Exemplarisch seien die Verfolgung von Personen in der Umgebung eines Fahrzeugs [86] oder die Erhöhung der Präzision und Zuverlässigkeit in der Navigationstechnik zur Positionsbestimmung [87] angeführt.

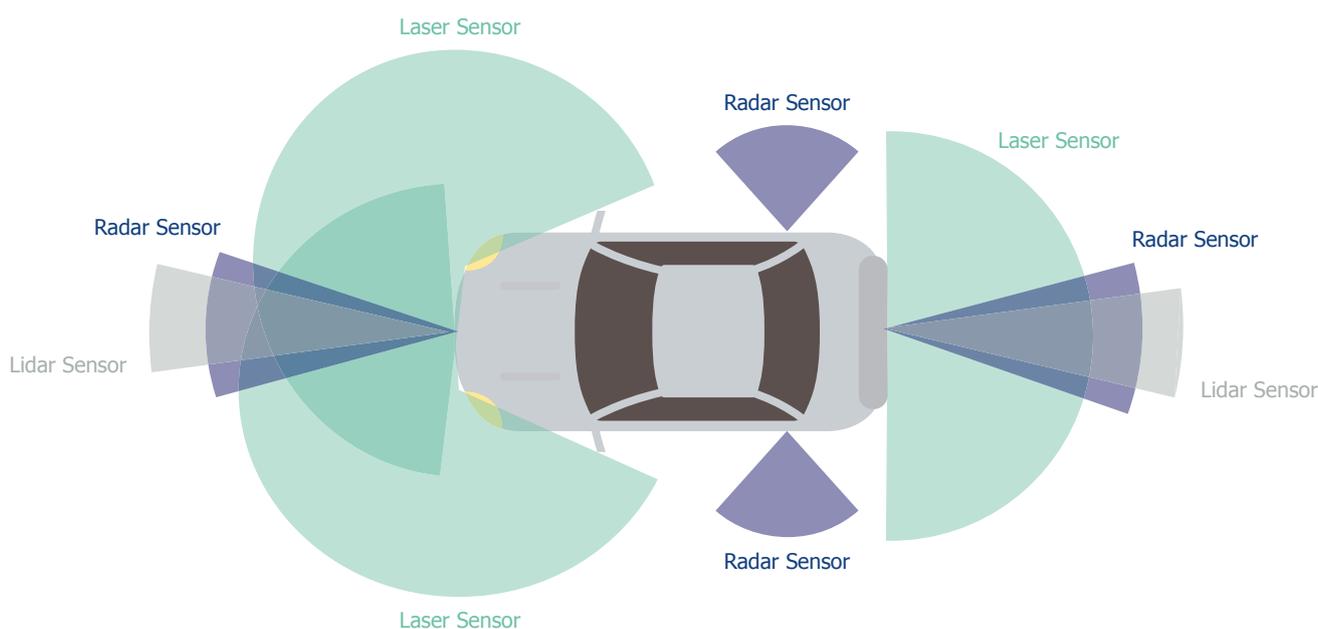


Abb. 3.3.3 Multimodale Datenaufnahme am Beispiel vom Fahrerassistenzsystem [74], Auto: vectezzy.com

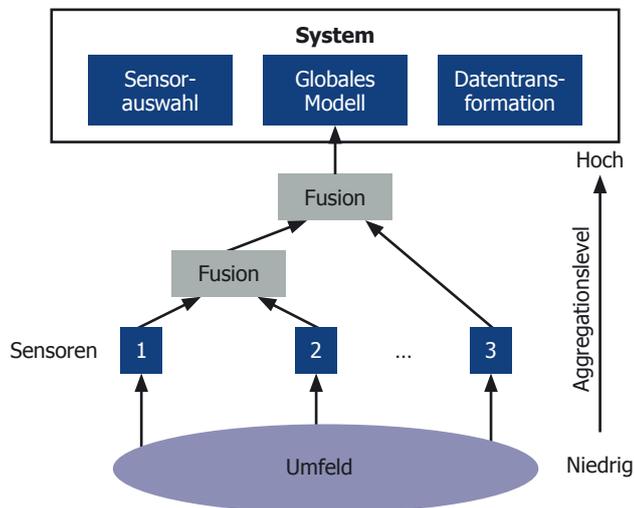


Abb. 3.3.4 Multisensorische Integration und Fusion im System [88]

Die Sensorfusion umfasst die **Erfassung von Rohdaten** auf einem **niedrigen Aggregationslevel** und endet bei der Erstellung eines **globalen aussagefähigen Modells**.

Zur Gewährleistung einer einfachen und günstigen Änderung bzw. Erweiterung der Sensorausstattung empfiehlt sich bei der Einrichtung eines **Sensor-Monitorings**, z. B. zur Instandhaltung einer Anlage, die Verwendung eines modularen Systems [89]. Dies ist notwendig, um auf nachträgliche Erkenntnisse und Änderungen an dem zu produzierenden Gut reagieren zu können.

Ein der Sensorfusion ähnlicher, teilweise synonym benutzter Begriff ist der des »**Soft Sensors**«. Kerngedanke ist das **Ersetzen physischer Sensoren** durch sogenannte »**Software Sensoren**«, die die gesuchten Daten aus anderen Größen ableiten. Soft Sensors werden häufig in zwei Untertypen klassifiziert:

- **datenbasierende** Soft Sensors
- **modellbasierende** Soft Sensors

Modellbasierende Soft Sensors werten Daten auf Basis eines Modells aus, welches auf Grundlage physikalischer Zusammenhänge entwickelt wurde, wohingegen **datenbasierende Soft Sensors** empirisch auf Grundlage von historischen Daten Zusammenhänge von Eingangsgrößen ermitteln [90]. Vorteile sind die günstigen **Anschaffungs- und Wartungskosten**, die Möglichkeiten der **einfachen Vernetzung** und die **Robustheit** [91, 92, 93].

Herausforderungen

Die größte Herausforderung stellt die Anpassung der Algorithmen an sich ändernde Umgebungsbedingungen dar [94]. Darüber hinaus führen die aufgezeichneten redundanten Daten auch zu einem deutlichen **Anstieg des Datenvolumens** [95] und zur Mehrdeutigkeit. Daraus resultiert eine **gestiegene Komplexität** in dessen Folge sich die Frage nach der **Relevanz einzelner Daten** stellt.

Konsistenz- / Plausibilitätscheck

Die Produktion, Entwicklung und die angrenzenden Bereiche stützen ihre Analysen auf Daten. Damit diese zu richtigen Schlussfolgerungen führen, müssen die Daten in einer konsistenten, korrekten und vollständigen Form vorliegen. Erst eine **hohe Qualität der Daten** macht diese **gebrauchstauglich** für die Produktionsplanung, -steuerung und -überwachung [96, 97]. Nur eine **valide Datenbasis** ermöglicht Aussagen über die **Produktionseffizienz**, den **Auftragsfortschritt** oder **kurzfristige Produktionsanpassungen**.

Ein valider Datensatz liegt dann vor, wenn die Daten konsistent, korrekt und vollständig vorliegen [98, 99]. Mangelnde Datenqualität ist dabei auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen, wie unvollständige manuelle Rückmeldungen aus der Fertigung, falsche Datenaggregation bzw. Datenfusion, unkoordinierte Abweichungen von geplanten Aufgaben oder Fehlmeldungen integrierter Maschinensensoren [100]. Im ersten Schritt wird durch Implementierung von **Integritätsregeln** in Datenbanken und eine durchgängige Definition von **Datenqualitätsprozessen** in der Organisation ein Konsistenzcheck durchgeführt (vgl. Abb. 3.3.5). Dennoch kann eine unzureichende Datenqualität dadurch nicht vollständig verhindert werden [101]. Im zweiten Schritt muss ein **Plausibilitätscheck** die **inhaltliche Korrektheit** der Daten prüfen.

Bestehende Ansätze zur Reduzierung von Datenfehlern und Inkonsistenzen in den Datenbanken können eingeteilt werden in die **Implementierung organisatorischer Prozesse**, welche die Generierung von **konsistenten, korrekten und vollständigen Daten** zum Ziel hat, und in **Algorithmen**, die falsche Daten in verschiedenen IT-Systemen erkennen und abfangen.

Da organisatorische Prozesse stark auf die Disziplin der Mitarbeiter setzen, sind menschliche Fehler unvermeidlich. Algorithmen hingegen zielen mit der **Implementierung von Regeln** und **hoch entwickelter Logik** nur auf IT-Systeme und Datenbanken ab. Zum einen besteht der Ansatz in der Weiterentwicklung der Bedingungen für die Dateneinspeisung in die **Database Management Systems (DBMS)**. Dadurch wird bei Eingabe, Bearbeitung und Löschung von Daten auf **semantische Korrektheit** geachtet. Anspruchsvollere **Integritäts-**

bedingungen haben hingegen den Nachteil, dass sich ändernde Umstände zu einer Erweiterung des zulässigen Bereichs von Werten führen können, die dann manuell eingestellt werden müssen [103, 104].

Data-Mining- (DM-)Methoden zielen auf die Bereinigung von bestehenden Datensätzen ab. Während DM-Methoden in anderen Bereichen, wie dem Finanzsektor, im Marketing oder im Versicherungswesen weit verbreitet sind und dort ihre Leistungsfähigkeit nachgewiesen haben, zeigen sich erst derzeit Ansätze zur Anwendung in Fertigung und Produktion [105, 106]. Das Vorgehen bei der DM-Methode besteht zunächst in der Analyse und Bewertung der bestehenden Daten. Dabei werden bestimmte Datenpunkte auf **Konsistenz** (z. B. widersprüchliche Start- und Endzeiten von Prozessen), **Korrektheit** (z. B. zunehmende Mengenangabe bei Fertigungsprozessen) und **Vollständigkeit** (fehlende Daten) überprüft. Darüber hinaus wird ein Test auf **stochastische Abhängigkeit** durchgeführt, damit eine vom Fehler selbst oder anderen Einflüssen unabhängige Berichtigung der Daten stattfinden kann. Nach der Analyse und Bewertung werden **generische Algorithmen** (z. B. Decision Tree, kNN) auf die Datensätze angewandt um **(Quer-)Verbindungen** und **Trends** zu erkennen. Dann werden die fehlerbehafteten Datenpunkte berichtigt.

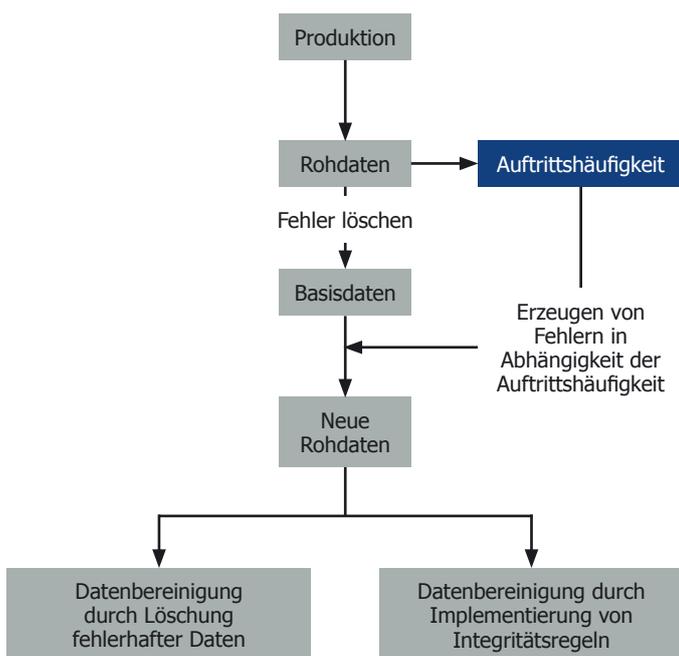


Abb. 3.3.5 Konsistenz und Plausibilitätscheck in der Produktion [102]

Herausforderungen

Das Ziel muss ein ganzheitlicher Ansatz zur Reduzierung von inkonsistenten, falschen und unvollständigen Daten sein. Die Herausforderung besteht in Lösungen zur Reduzierung von Datenfehlern und deren Integration in den Regelkreis der Produktion, um die Datenfehler rechtzeitig zu identifizieren und zu beheben.

3.3.4 Migrationspfade für den Anwender

Die Migration des Unternehmens zur Erzeugung des Digitalen Schattens kann in **neun Schritten** stattfinden, die **sequenziell** zu durchlaufen sind und sich **analog der vier Forschungsfelder** aus Kapitel 3.3.3 gliedern lassen: 1. **Datenstruktur/ Datenmodell** erstellen; 2. **Multimodale Datenaufnahme**; 3. **Multimodale Datenfusion**; 4. **Konsistenz-/ Plausibilitätscheck**. In Abb. 3.3.6 sind die neun Schritte des Migrationspfades dargestellt, deren Nummerierung den Nummern der Forschungsfelder folgt. So gehören bspw. die Schritte 1a und 1b zum Forschungsfeld Datenstruktur/Datenmodell. Der Migrationspfad startet mit der **Definition des Ziels** des Digitalen Schattens und führt bis zur **Implementierung und kontinuierlichen Datenerhebung** (inkl. der Verdichtung, Prozessierung sowie Aufbereitung und Bereitstellung der Daten an der richtigen Stelle). Da der Digitale Schatten abhängig von dem gegebenen Produktionsumfeld zu gestalten ist, findet der Migrationspfad zirkulär statt und ist bei Veränderungen des Umfelds neu zu durchlaufen.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte detailliert erläutert:

1a. Zieldefinition

Bevor Schritte hinsichtlich der Datenerhebung unternommen werden, ist zu definieren, welche Ziele und Zwecke der Digitale Schatten erfüllen soll. Danach richtet sich die Auswahl der benötigten Objekte sowie der benötigten **Felder der Sachmerkmalsleiste**. Beispiele der Verwendung eines Digitalen Schattens sind die Produktionssteuerung, die Maschinensteuerung oder die Energieeffizienzplanung.

1b. Analyse Datenbedarf

Basierend auf der Zieldefinition findet im zweiten Schritt die Analyse der benötigten Daten statt. Hierfür ist zu definieren, an welchen Datenpunkten Informationen aufzunehmen sind. Diese sind bezüglich der benötigten **Granularität** und **Frequenz** zu spezifizieren. Des Weiteren ist festzulegen, wo die Daten gespeichert werden und welches (einheitliche) Datenformat benötigt wird.

2a. Abgleich Datenbedarf – vorhandene Daten

Hier ist zu prüfen, welche Daten bereits vorhanden sind und welche neu aufgenommen werden müssen. Die vorhandenen und benötigten Daten

sind bezüglich ihres Umfangs und der **benötigten Form** zu hinterfragen. Sind diese nicht zielkonform, sind auch diese Datenpunkte in den folgenden Schritten neu auszugestalten.

2b. Technologieauswahl

Für jeden definierten Datenpunkt ist entsprechend der **multimodalen Datenaufnahme** zu entscheiden, über welche Technologie die benötigten Daten aufgenommen werden können. Auswahlkriterien können sein: **Granularität, Frequenz, Datenformat, Schnittstellen** zwischen Datenaufnahme-Technologie, **Datenlieferant** und **Datenspeicher, räumliche Gegebenheiten, Produkteigenschaften** und **Eigenschaften des Produktionsprozesses** (z.B. Härtevorgänge). Sind mehrere Technologien möglich, so ist ein **konsistentes Gesamtkonzept** zu bevorzugen.

2c. Überprüfung vorhandener Technologien

Die bereits implementierten Technologien sind, sofern vorhanden, ebenfalls hinsichtlich ihrer **Eignung** und der **Eingliederung** in ein **konsistentes Gesamtkonzept** zu überprüfen.

3a. Ausgestaltung Technologien

Bevor das ausgewählte Technologiekonzept umgesetzt und eingeführt werden kann, muss die operative Ausgestaltung vorgenommen werden.

Hierzu gehört die Klärung folgender Fragestellungen:

- **Anbringungsart** und **-ort** von **Sendern** und **Empfängern** (z. B. auf dem Produkt selbst, am Ladungsträger, an der Decke, an Säulen, im Hallenboden)
- **Wiederverwertbarkeit** von Sensorik an Produkten
- Zusammenführung von Produktnummer/Auftragsnummer mit **Datenerfassungsobjekt** (z. B. Sensor-ID)
- **Verknüpfung der Technologiedaten** mit dem Status des zu digitalisierenden Objekts (z. B. geografischer Ort x bedeutet eine Übergangszeit, da der Ort eine Bereitstellungsfläche ist)
- **Fusion multimodaler Daten** durch Vernetzung und Ausarbeitung der Zusammenhänge

Diese Fragen können nur unternehmensspezifisch und anwendungsspezifisch geklärt werden, da sowohl Produkt, Produktionsprozess als auch Produktionsumgebung hohen Einfluss haben.

3b. Implementierung

Bei der Umsetzung des entwickelten Gesamtkonzepts zur Erhebung des digitalen Schattens ist darauf zu achten, dass der laufende Produktionsbetrieb nicht beeinträchtigt wird. Daher muss vorab ein **operativer Implementierungsplan** erstellt werden, welcher die zeitliche und inhaltliche Aufschlüsselung der vorzunehmenden Aktivitäten umfasst.



Abb. 3.3.6 Migrationspfad zum Digitalen Schatten

4a. Initial-Testphase

Nachdem neue Technologien implementiert wurden, ist zu prüfen, ob diese die vorab definierten Daten korrekt liefern und speichern. Hierfür kann einerseits eine **redundante Datenerhebung** und der **Vergleich beider Datensätze** verwendet werden. Andererseits ist eine **manuelle Begleitung** von Aufträgen/Maschinen/Transportmitteln möglich, um die **Realität** direkt mit den erhobenen Daten vergleichen zu können. Zur **Reduktion des Aufwands** ist je nach Ziel des Digitalen Schattens eine **geeignete Stichprobe** zu definieren.

4b. Datenerhebung und -überprüfung

Nach erfolgreich durchlaufener Testphase wird das Konzept kontinuierlich in den **Produktivbetrieb** überführt. Dies bedeutet die **kontinuierliche Erhebung von Daten** an den definierten Datenpunkten sowie deren Speicherung gemäß Vorgaben. In regelmäßigen Abständen (in Abhängigkeit der **Volatilität des Produktionsumfelds**) ist zu überprüfen, ob die Daten noch den Anforderungen entsprechen. Änderungen des Produktionsumfelds können beispielsweise sein:

- veränderte oder neue Arbeitspläne
- veränderte Produktionsstruktur wie Werkstattfertigung oder Linienfertigung
- veränderte Steuerungslogik

Wird eine Diskrepanz zwischen Datenbedarf und den erhobenen Daten festgestellt, so ist der Migrationspfad erneut zu durchlaufen, beginnend bei der Zieldefinition.

3.3.5 Bezüge/ Schnittstellen zu den anderen Handlungsfeldern

Der Digitale Schatten bildet einerseits die Grundlage für das Handlungsfeld **Analytics (Big Data)** und **Cyber-physische Systeme** und nutzt andererseits Inhalte des Handlungsfelds **cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen**.

Big Data kann genutzt werden, um den Digitalen Schatten im ersten Schritt zu validieren. Durch eine Analyse der Daten kann ein **Konsistenzcheck** durchgeführt werden. Weiterhin ermöglicht die detaillierte Analyse die Beantwortung gezielter Fragestellungen, wozu der Digitale Schatten genutzt wird. Hierbei kann es sich bspw. um die Produktionssteuerung handeln. Die Analyse des Digitalen Schattens zeigt, ob die Produktionssteuerung verbessert werden kann bzw. muss. Weiterhin könnte eine Auswertung hinsichtlich der **logistischen Zielerreichung** durchgeführt werden. Wird eine Abweichung identifiziert, muss zum einen die Verarbeitung, zum anderen müssen die aufgenommenen Daten des digitalen Schattens überprüft werden.

Für **CPPS** ist der Digitale Schatten ebenfalls eine **Vorstufe** auf dem Weg zu **intelligenten vernetzten Objekten**. Die Sensoren der CPS sind Sender einzelner Informationen, die diese häufig nur vorverarbeiten. Die Analyse und Steuerung folgen auf Basis des digitalen Schattens weiterhin zentral.

Cloudbasierte Technologien dagegen sind ein Enabler für den Digitalen Schatten. Die zu speichernden Daten können in der Cloud hinterlegt werden.

3.4 Analytik

Die **Vernetzung der Wertschöpfung** bis hin zu **offenen Wertschöpfungssystemen** führt zu einem Sprung von **komplizierten Zusammenhängen** zu **komplexen Zusammenhängen** (Abb. 3.4.1). Während komplizierte Zusammenhänge beschreibbar sind und über die **klassische analytisch-systemtechnische Vorgehensweise**, nämlich die Suche nach **Kausalitäten**, verstanden werden können, sind **komplexe** Systeme in der Regel **nicht analytisch** bestimmbar. Somit können sie auch nicht systematisch und effizient an

Umgang mit komplizierten Zusammenhängen	Umgang mit komplexen Zusammenhängen
Komplizierte Zusammenhänge werden systematisch analysiert. (Kausalität)	Komplexe Zusammenhänge werden nicht mehr auf Ihre Ursache hin untersucht (Korrelation ersetzt Kausalität).
Dabei wird das komplizierte Geflecht in überschaubare Einheiten aufgeteilt und Abhängigkeiten untereinander werden untersucht.	Aus der Gesamtheit der verfügbaren Daten werden Regelmäßigkeiten abgeleitet (Mustererkennung, z. B. Verhaltensmuster von Kunden).
Stichprobenanalyse, deduktives Vorgehen	Vollständiges Datenbild wird untersucht, induktives Vorgehen
Frage nach dem „Warum“	Frage nach dem „Was“

Abb. 3.4.1 Der Umgang mit Big Data erfordert einen Perspektivenwechsel ©Fraunhofer IPA

das jeweils angestrebte **globale Optimum** herangeführt werden. Die Frage nach dem **Warum** wird immer schwieriger, ihre Beantwortung dauert lange oder wird gar unmöglich. Es ist somit sinnvoll, zur **Optimierung komplexer Wertschöpfungssysteme** nicht mehr nur allein nach der **Kausalität**, sondern auch nach der **Korrelation** zu fragen. Es wird statt nach dem **Warum** nach dem **Was** gefragt. Wir suchen also **Muster** und **Zusammenhänge**, die zu Ansätzen zur Erreichung eines gewünschten Zustands bzw. Ergebnisses einer Wertschöpfung führen. Sind diese **Muster** erkannt, können sie zunächst **ohne Kenntnis der tatsächlichen Ursachen** für das Systemverhalten zur Optimierung des Systems genutzt werden. **Erfahrungs- und Anwendungswissen** werden so **teilweise entwertet** und durch **Analytikwissen** ersetzt. Dies könnte zu einer **fundamentalen Veränderung von ingenieurmäßigen Vorgehen** bis hin zu einer **Veränderung der Wissenschaftsmethodik** führen. Das heißt, der **Zugang** zu und das **planvolle Nutzen von Massendaten** mit Hilfe spezifischer Methoden und Algorithmen wird zur **elementaren Basis zukünftiger Engineering-Prozesse**.

Die **moderne Produktionsumgebung** liefert heute schon eine **Vielzahl an Daten**. Sie kommen von den Maschinen und Anlagen, von den Produktionsprozessen aber auch aus den klassischen IT-Systemen der Produktion, wie beispielsweise Manufacturing Execution Systems (MES) oder den Enterprise Resource Planning Systems (ERP). Derzeit wird allerdings nur ein **kleiner Teil der verfügbaren Daten zur Weiterverarbeitung genutzt**, da sie häufig nicht direkt zugänglich sind oder in **Insellösungen** gespeichert und nur über **System- und Medientransformationsprozesse** genutzt werden können. Die Weiterverarbeitung der tatsächlich genutzten Daten beschränkt sich dann häufig auf die **Aufbereitung der Daten** für den nächsten Prozess oder übergeordnete Führungsprozesse. Aufgrund der fehlenden Integration und Vernetzung der verschiedenen Datenquellen erfolgt keine Auswertung der Daten und deren Zusammenhänge über die unterschiedlichen Datenquellen hinweg. Zukünftig werden mit Konzepten und Technologien wie dem **digitalen Schatten** und **Cyber-physischen Systemen** noch mehr Daten im Produktionsumfeld generiert, die über **Cloud-Strukturen** vernetzt werden und Informationen über Produktionsprozesse, Materialflüsse oder Systemzustände echtzeitnah zur Verfügung stellen.

Die **Masse dieser Daten** soll nun helfen **Transparenz über die Vorgänge** in der Produktion zu erhalten, indem wir möglichst viele dieser Daten miteinander vernetzen, um **Muster zu erkennen**. Wegen der **Menge der Daten**, der **Vielzahl unterschiedlichster Datenquellen** und damit auch der Datenformate sowie der **Geschwindigkeit**, mit der diese Daten geliefert und ausgewertet werden müssen ist

eine passende Form der Datenanalyse notwendig. Sie wird in diesem Handlungsfeld unter dem Begriff Analytik vorgestellt und diskutiert. **Dabei wird Analytik hier als die Gesamtheit aller Verfahren und Methoden gesehen, die aus den verfügbaren Daten des Produktionsumfelds möglichst automatisch Muster innerhalb der Daten erkennen, um dadurch Zusammenhänge zwischen den zugrunde liegenden Prozessen ableiten zu können.**

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich dann Handlungsempfehlungen sowohl für den Menschen als auch für die Maschinen ableiten, um die Geschehnisse innerhalb der Produktion besser zu verstehen und optimieren zu können. Die Analytik mit ihren Verfahren, Methoden und Technologien zur Verarbeitung vielfältiger Datentypen aus unterschiedlichen Datenquellen steht im Zentrum von **Big-Data-Anwendungen**. Sie bildet den Kern dieser Anwendungen.

3.4.1 Definition und Entwicklung

Die Notwendigkeit zur Einführung von **Big-Data-Ansätzen** resultiert hauptsächlich daraus, dass nicht nur in der Produktion, sondern auch in sehr vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens die **verfügbare Datenmenge rasant anwächst** und immer mehr Daten aus immer mehr **unterschiedlichen Datenquellen** zur Verfügung stehen. Ursache dieser Entwicklung ist, dass zum einen immer mehr physische Objekte zur Kommunikation befähigt und miteinander vernetzt werden (**Internet der Dinge**) und zum anderen auch immer mehr Funktionalitäten dieser physischen Objekte digital in Form von Diensten, sogenannten Services, abgebildet werden (**Internet der Dienste**). Des Weiteren werden zunehmend mehr Prozessabläufe wie zum Beispiel Auftragsabwicklungsprozesse in Informationssystemen digital abgebildet und die Ergebnisse digitalisiert abgespeichert. Gleichzeitig werden die Informations- und Kommunikationselektronik wie beispielsweise digitale Bilderzeugung und -verarbeitung oder mobile Endgeräte immer **günstiger** und **leistungsfähiger** und sorgen ihrerseits für eine zunehmende Datenproduktion. Die Entwicklung in der Informationstechnologie stellt ebenfalls immer leistungsfähigere und kostengünstigere Datenspeicher zur Verfügung. Wenn die Menge der so produzierten und bereitgestellten Daten mit klassischen Verfahren und IT-Architekturen nicht mehr sinnvoll verarbeitet werden kann, spricht man von **Big Data**.

Big Data wird in einem **5-V-Modell** beschrieben (siehe Abb. 3.4.2). Dabei bezeichnet **Volume** das rasant ansteigende Datenvolumen, das sich aus der massenhaften Produktion von Daten in allen Lebensbereichen ergibt. **Velocity** steht für die zunehmende Geschwindigkeit, in der die Daten generiert werden aber auch verarbeitet werden müssen. **Variety** steht für die Vielzahl an unterschiedlichen Datenquellen und Datenformaten, aus denen die Daten stammen, beziehungsweise in denen die

Daten erzeugt und abgespeichert werden. Neben diesen klassischen drei Vs finden im Zusammenhang mit Big Data zunehmend mehr zwei weitere Vs Beachtung. Das ist zum einen **Veracity**, das für die Zuverlässigkeit der Daten steht und auf der anderen Seite **Value**, das für die Werthaltigkeit der Daten steht.

Diese fünf Vs des 5-V-Modells lassen sich auch in der Produktion nachvollziehen. Beispielsweise können mithilfe von **Condition-Monitoring-Verfahren** in Maschinen und Anlagen entlang von Produktionsprozessen Systemzustände beobachtet und in nahezu Echtzeit über Vernetzungsstrukturen, wie beispielsweise Cloud-Technologien, von weltweit verteilten Standorten unmittelbar zentral für die Auswertung zur Verfügung gestellt werden. Dabei kommen die in der Produktion anfallenden Daten aus den **unterschiedlichsten Datenquellen**, wie Sensoren und Aktoren von Maschinen, aber auch aus klassischen **Produktions-IT-Systemen**, wie etwa **MES** und **Qualitätssicherungssystemen**, und werden in Zukunft verstärkt über **Cyber-physische Produktionssysteme** und dem **digitalen Schatten** generiert werden. Die Analytik nimmt sich dieser Daten an und wertet sie einerseits hinsichtlich **verborgener Zusammenhänge** und **Muster**, z. B. mittels **Data Clustering** aus (**descriptive**), aber auch um **Vor-**

hersagen und **Annahmen** für die Zukunft treffen (**predictive**) und Handlungsanleitungen ableiten zu können (**prescriptive**).

Der Umgang mit Daten, auch mit vielen Daten, ist für Unternehmen, auch in der Produktion, nicht unbedingt neu. Bisher wurde diese Datenanalyse vor allem mit Methoden und Verfahren durchgeführt die unter **Business Intelligence (BI)** subsummiert wurden. Dabei greifen **BI-Systeme** vor allem auf **strukturierte** und in der Regel **gut dokumentierte Daten** aus den **operativen IT-Systemen** eines Unternehmens zurück, wie beispielsweise **Customer Relationship Management (CRM)** oder **Enterprise Resource Planning (ERP)**, die in **relationalen Datenbanken** gehalten werden.

Was heutige Anwendungen für **Big Data Analytics** von »traditionellen« Business-Intelligence-Anwendungen unterscheidet, ist nicht nur die Einbindung sehr unterschiedlicher auch unstrukturierter Daten aus **unkonventionellen Datenquellen**, wie beispielsweise **Social-Media-Beiträge**, sondern es sind auch die unterschiedlichen Fragen, die die beiden Methoden jeweils zu beantworten versuchen. Während BI seit jeher auf die Verwendung eines einheitlichen **Sets von Metriken** fokussiert, um die Leistung eines Unternehmens in der Vergangenheit zu

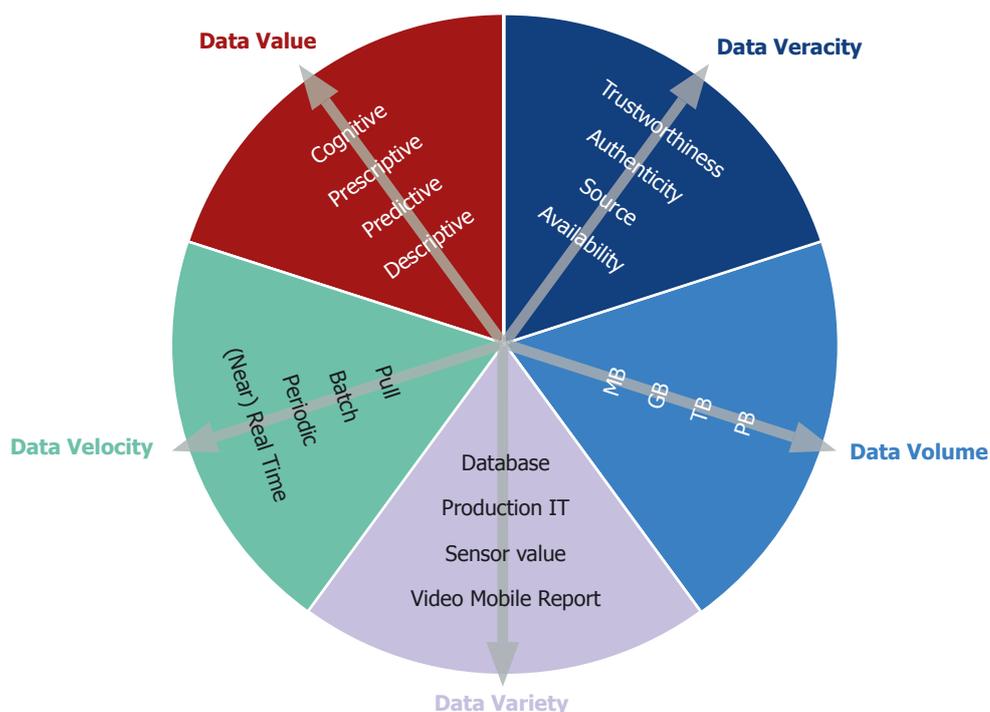


Abb. 3.4.2 5-V-Modell der Produktion, nach: Informatik Spektrum [107]

messen [108], konzentrieren sich **Big-Data-Anwendungen** auf das **Aufspüren, Erkennen** und **Vorhersagen von Mustern**. Oder, wie Dhar es formuliert: »Big Data makes it feasible for a machine to ask and validate interesting questions humans might not consider« [109].

3.4.2 Potenziale

Laut der **Studie The Digital Universe of Opportunities** von 2014 [110] wird das weltweite Datenvolumen von **4,4 Zettabyte** (4,4 10^{21} Byte) **in 2013** auf **44 Zettabyte in 2020** anwachsen, wobei in den kommenden Jahren vor allem das **Internet der Dinge (IoT)** zu diesem Datenwachstum beitragen wird.

Diese Entwicklung hält gerade auch in die Produktion Einzug, indem mehr und mehr Objekte, wie Maschinen, Komponenten, Sensoren oder Werkzeuge, mit **softwarebasierten Funktionalitäten** in Form sogenannter Services ausgestattet und miteinander vernetzt werden. Im Rahmen dieser Vernetzung entstehen enorme Datenmengen, die in Verbindung mit geeigneter Analytik einen **wertvollen Rohstoff** und damit **Wettbewerbsvorteil** darstellen. Dieser Rohstoff bildet schließlich die Grundlage für eine **optimierte Entscheidungsunterstützung** in nahezu allen Bereichen des produzierenden Unternehmens. Die Potenziale, die sich aus der Förderung dieses Rohstoffes ergeben, sind mannigfaltig. Einige davon sollen hier beispielhaft aufgeführt werden.

Produktionsprozesse werden mit der zunehmenden Vernetzung von Maschinen und Anlagen immer komplexer. Die gestiegenen Anforderungen des Marktes, etwa hinsichtlich kundenindividueller Produkte oder **Nachverfolgbarkeit von Bearbeitungsständen (Tracking)** innerhalb der Supply Chain oder der **Rückverfolgung von Produktfehlern (Tracing)** verstärken diesen Trend. Die systematische Erfassung umfangreicher Daten aus **verschiedenen Betriebskontexten** in Verbindung mit **kontextbasierten Auswertungen** führt dazu, die **Transparenz** innerhalb der Prozesse zu erhöhen und damit die **ansteigende Komplexität** besser zu bewirtschaften.

Innerhalb der Instandhaltung führen **datenbasierte Vorhersagemodelle** hinsichtlich des **zur Verfügung stehenden Abnutzungsvorrates** einzelner Komponenten oder Anlagen dazu, dass Wartungspläne erstellt werden können, die sich am **tatsächlichen Verschleißzustand** der überwachten Komponenten orientieren. In Verbindung mit der Auswertung von Auftragseingängen und Bearbeitungsständen können zusätzlich noch weitere kritische Faktoren für eine **optimierte Instandhaltungsstrategie** berücksichtigt werden, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Produktionsressourcen zu gewährleisten (**business continuity**).

Die **Gesamtanlageneffektivität**, englisch **Overall Equipment Effectiveness (OEE)**, ist eine wesentliche Kennzahl in der Produktion, die Auskunft über Verfügbarkeit, Leistung und Qualität von Maschinen und Anlagen gibt. **Komplexe** und **verkettete Anlagen** werden häufig unter dem ursprünglichen Plan-OEE betrieben, da die Prozessabläufe und somit die **Ursachen für Abweichungen** innerhalb dieser Anlagen nur **schwer nachzuverfolgen** sind. Die Analyse sämtlicher verfügbarer Daten, ggf. generiert durch zusätzliche Sensorik, kann zur Ableitung von **Betriebsmustern** genutzt werden, die zu besonders hohen oder auch niedrigen OEE Werten führen. Mit Hilfe dieser Datenauswertungen können dann beispielsweise **kritische Komponenten** oder **Muster für problematische Systemzustände** erkannt bzw. prognostiziert und Maßnahmen für die Erhöhung der OEE abgeleitet werden.

Ähnliches gilt für die **Fähigkeit von Produktionsprozessen**. Auch hier können mit geeigneten Sensoren und Prüfeinrichtungen an den Ein- und Ausgängen der einzelnen Prozesse qualitätsrelevante Daten erfasst werden. Mit der Auswertung dieser Prüfdaten können die vor- oder nachgelagerten Prozessparameter bei Bedarf angepasst werden, um die Prozessergebnisse dauerhaft in den vorgegebenen Spezifikationsgrenzen zu halten. Somit können **Qualitätsregelkreise prozessübergreifend in nahezu Echtzeit** betrieben werden, was unmittelbar zu einer **Verringerung der Ausschussquote** führt.

Daten aus den Produktionssystemen und den Produktionsprozessen können gesammelt und analysiert sowie mit Daten über das **Nutzungsverhalten der Betreiber** korreliert werden. Daraus ergeben sich neue Möglichkeiten für **datengetriebene Geschäftsmodelle**, die im Kern den **Nutzen für Kunden** in den Mittelpunkt stellen und diesen mit sog. **Mehrwertdiensten** auf Basis von Softwarediensten erzielen. So können etwa **Servicedienstleistungen** rund um die **Verfügbarkeit** der verkauften Produkte mit optimierten, kundenindividuellen **Wartungsintervallen** angeboten werden, die den tatsächlichen Abnutzungsvorrat berücksichtigen. Durch die Analyse der Art und Weise, wie der Anwender über den Produktlebenszyklus mit dem Produkt umgeht, können Erkenntnisse gewonnen werden, die wiederum in die Produktentwicklung einfließen, um die Produkte auf die tatsächlichen Bedürfnisse der Kunden anzupassen. Auch können diese Erkenntnisse im Vertriebsprozess genutzt werden, um dem Kunden Produkte anzubieten, die optimal auf seine Bedürfnisse abgestimmt sind.

3.4.3 Stand der Technik

Der Stand der Technik bei der Analytik im Produktionsumfeld wird anhand von **sechs Schritten** entlang des Ablaufes eines prototypischen Projektes im Bereich der **datengestützten Produktionsoptimie-**

ung dargestellt (Abb. 3.4.3). Dabei werden im ersten Teil dieses Kapitels die beiden Schritte **Festlegung** und **Anbindung der Datenquellen** und dann die beiden Schritte **Vorverarbeitung** und **Auswertung** der Daten jeweils in einem Abschnitt zusammen behandelt.

Ausgehend von dieser Vorgehensweise und der Darstellung aktueller Anwendungsbereiche im Produktionsumfeld, werden im folgenden Forschungsbedarf abgeleitet und aufgezeigt.

Big Data im Produktionsbereich

Analytik-Projekte beginnen mit der **Auswahl** und **Festlegung der Datenquellen**, die relevant für die Auswertung sein könnten. Ausgehend von einer zuvor durchgeführten **Informationsbedarfsanalyse**, werden die notwendigen Datenpunkte ermittelt und, darauf aufbauend, die **Datenquellen** festgelegt, welche diese Daten bereitstellen können. Diese Datenquellen sind im Umfeld der Produktion auf der einen Seite die eher **traditionellen Systeme der Produktions-IT** wie beispielsweise Enterprise Resource Planning (ERP), Customer Relationship Management (CRM) oder Manufacturing Execution Systems (MES), aber auch die Steuerungen der Maschinen und Anlagen sowie die daran angeschlossenen Sensoren. Zukünftig werden diese Datenquellen aufgrund der **neuen Architekturen der Cyber-physischen Systeme** noch reichhaltiger, zudem können mit Hilfe des **Internets der Dinge** zusätzliche meist **unstrukturierte Daten** hinzugewonnen werden.

Bei der Festlegung der notwendigen Datenquellen werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Informationsbedarfsanalyse sogenannte **Engpasskomponenten** innerhalb der Anlagen identifiziert und auf die Fähigkeit hin überprüft, geeignete Daten für die Analyse bereitzustellen. Des Weiteren wird überprüft, ob für die Analyse fehlende Datenpunkte aus **bestehender Sensorik**, vorhandenen **Datensilos** oder aus **zusätzlich einzubringender Sensorik** gewonnen werden müssen. Dabei kann auch auf Methoden der **Datenfusion** zurückgegriffen werden, bei der lückenhafte Datensätze zusammengeführt und vervollständigt werden.

Die Anbindung dieser Datenquellen aus dem Produktionsumfeld an die IT-Systeme für die Datenanalyse erfolgt dabei beispielsweise über OPC-UA oder aber direkt über **IP-Kommunikation** auf Basis etablierter **Internetprotokolle**.

IT-Architekturen und Datenbereitstellung

Sobald die Datenquellen an die IT-Infrastruktur angebunden sind, können die Daten ausgelesen und den Analysesystemen bereitgestellt werden. Hierbei kommen im Wesentlichen zwei unterschiedliche IT-Architekturen für die **verlustfreie Sicherung** der Daten zum Tragen. Bei einer **dezentralen** Datenhaltung werden die Daten jeweils lokal an verschiedenen Stellen vorgehalten. Es entsteht somit eine **verteilte Datenarchitektur**.

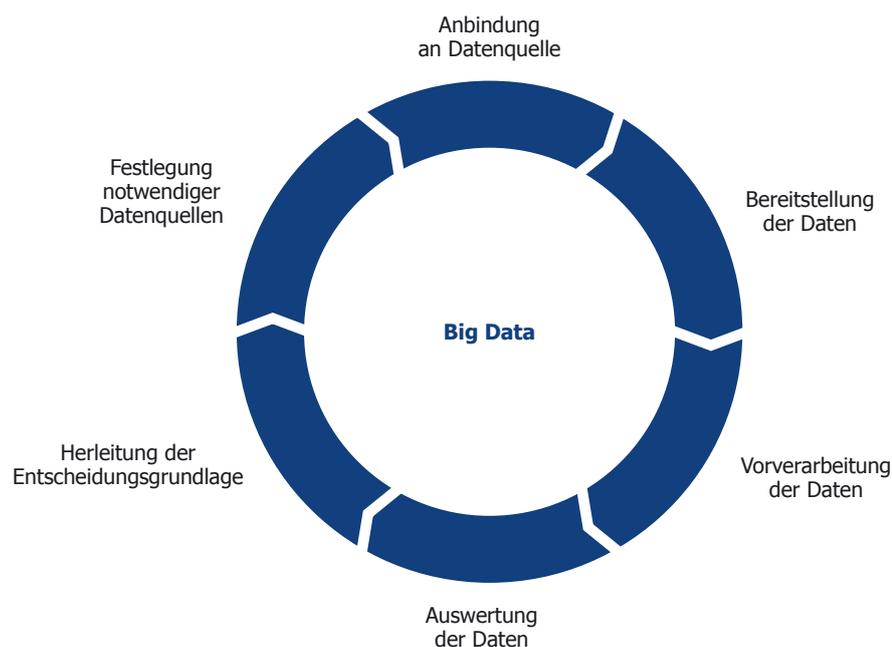


Abb. 3.4.3 Schritte eines Projektes zur datengestützten Produktionsoptimierung, ©Fraunhofer IPA

Bei einer **zentralen Datenhaltung** werden alle Daten an einer Stelle zentral zusammengeführt und vorgehalten. Das Konzept der **dezentralen Datenhaltung** nahe an der Datenquelle oder an der (temporären) Verarbeitung der Daten wird auch als **Fog Computing** bezeichnet. Die **zentrale Datenhaltung** hingegen greift mehr auf Konzepte des **Cloud Computing** zurück, um **wirtschaftliche** und **skalierbare Infrastrukturen** für die schnelle Verarbeitung sehr großer Datenmengen bereitstellen zu können. Immer mehr setzen sich auch **hybride Modelle** durch, bei denen erste Auswertungen und Aggregationen nahe an den Datenquellen durchgeführt werden (Fog) und die aggregierten Daten und Auswertungen dann an eine zentrale Stelle (Cloud) für die weitere Verarbeitung und die dauerhafte Sicherung historischer Datenreihen übermittelt werden.

Für die **dauerhafte Speicherung** der Daten stehen **relationale Datenbankmanagementsysteme** zur Verfügung, in denen die Daten mit Hilfe von relationalen Datenmodellen in Tabellenstrukturen abgespeichert werden, aber auch **neuere Datenbanksysteme** wie **noSQL-Datenbanken** in denen die Daten beispielsweise dokumentenorientiert, in **Graphen-Datenbanken** oder in **Key-Value-Datenbanken** abgespeichert werden.

Für die sehr schnelle Verarbeitung sehr großer Datenmengen können auch **In-Memory-Datenbanken** eingesetzt werden, die im Gegensatz zu klassischen Datenbankmanagementsystemen die Daten nicht auf der Festplatte sichern, sondern im Arbeitsspeicher der IT-Systeme verarbeiten, der wesentlich **kürzere Zugriffszeiten** bietet. Für die **echtzeitnahe Auswertung** der Daten kann auch auf Systeme wie beispielsweise **Hadoop** zurückgegriffen werden, die sowohl die **Datenhaltung** als auch die **Datenverarbeitung in hohem Maße parallel** ausführen.

Vorverarbeitung und Auswertung der Daten

Bei den Daten aus dem Produktionsumfeld wird zwischen **strukturierten** (meist basierend auf einem Datenmodell) und **unstrukturierten Daten** (z. B. Bilder, Videos, Textdateien) unterschieden. Sie stammen aus unterschiedlichen Datenquellen. Dies führt zu unterschiedlichen Datenstrukturen, selbst dann, wenn beispielsweise gleiche Parameter wie z. B. die Temperatur über Sensoren gemessen werden, die von unterschiedlichen Herstellern stammen oder auf unterschiedliche Art und Weise angebunden wurden. Diese **unterschiedlichen Datenstrukturen** müssen integriert und vereinheitlicht werden, sowohl auf der **syntaktischen** als auch auf der **semantischen** Ebene. Für diese **Datenintegration** stehen **etablierte Integrationstechnologien**, wie beispielsweise **ESB (Enterprise-Service-Bus)** oder **ETL-Plattformen (Extract-Transform-Load)**, zur Verfügung, die wiederum

auf unterschiedliche Datenquellen, wie beispielsweise Datenbanken oder Dateien über Standardschnittstellen wie **SQL (ODBC, JDBC)**, **XML**, **SOAP** oder **REST** zugreifen können [111].

Wenn die zu integrierenden Daten aus einem dynamischen Umfeld stammen, wie es klassischer Weise bei Produktionsprozessen der Fall ist, werden nicht nur statische Daten verarbeitet, sondern auch zeitlich aufeinanderfolgende Ereignisse aus **heterogenen Datenquellen** entlang der Produktionsprozesse berücksichtigt. Für das **Auslesen**, **Verdichten** und **Korrelieren** solcher Daten kommen Technologien aus dem Bereich **Streaming** oder **Complex Event Processing (CEP)** zum Einsatz.

Nachdem die Daten **syntaktisch harmonisiert** wurden, werden sie auch auf der **semantischen Ebene harmonisiert** und in einem **zentralen Datenpool** abgelegt, wo sie nun für die weitere Verarbeitung zur Verfügung stehen. Hier findet nun die **analytische Verarbeitung** der Daten statt, die den Kern von Big-Data-Anwendungen darstellt und die Grundlage für die Gewinnung neuer Erkenntnisse für die Unternehmensprozesse bildet. Für die Analyse der Daten stehen je nach Datentyp und Anwendungsfall unterschiedliche Analyseverfahren, wie beispielsweise **Text Analytics** oder **Video** and **Audio Analytics**, zur Verfügung. Für das Produktionsumfeld sind folgende Analyseverfahren besonders relevant:

- **Predictive Analytics** erkennt **Trends** und **Muster** in Datensätzen mit deren Hilfe Modelle auf Basis **bedingter Wahrscheinlichkeiten** für die Vorhersage abgeleitet werden können
- **Data Mining** als **automatisiertes Verfahren zum Erkennen und Extrahieren von Mustern** und Zusammenhängen in sehr großen Datenbeständen
- **Machine Learning** beschreibt Methoden, in denen Computerprogramme selbständig neues Wissen erwerben auch mit Hilfe von Ansätzen **Künstlicher Intelligenz (KI)**

Herleitung der Entscheidungsgrundlagen

Nachdem durch die Analytik **Muster** in den Datensätzen erkannt wurden und sich **Systemverhalten** für die Zukunft prognostizieren lassen, gilt es nun, **Handlungsanleitungen** für die Verbesserung der Produktionsprozesse abzuleiten. Hierzu können auf Basis von **Modellbildungen Entscheidungsgrundlagen** geschaffen werden, die über die Analyseergebnisse der Datenbestände aus der Vergangenheit abgesichert sind.

Da es sich zum Beispiel bei dem Einsatz von **Predictive Analytics** um einen **iterativen Prozess** handelt, bei dem die aktuellen Datenbestände immer wieder neu ausgewertet werden, werden die Modelle

vollständiger (**descriptive**) und damit auch stabiler und folglich auch die Vorhersagen (**predictive**) genauer, womit sich auch die Handlungsanleitungen (**prescriptive**) als zuverlässiger erweisen.

3.4.4 Forschungsbedarfe

Auch wenn die Verfahren und Methoden aus dem Bereich der Analytik schon sehr fortgeschritten sind, bleiben doch noch offene Punkte, insbesondere im Produktionsumfeld, die es von der wissenschaftlichen Seite zu adressieren gilt, um der Industrie anwendungsnahe Lösungen bieten zu können. Die folgenden Abschnitte zeigen die wesentlichen und offensichtlichsten dieser Forschungsbedarfe auf.

IKT-Architekturen

Mit der Einführung und dem Betrieb von **Big-Data-Lösungen** kommt den IKT-Technologien und den damit aufgebauten **Architekturkonzepten** eine zentrale Rolle zu. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine Analyse der Daten über die gesamte Wertschöpfungskette eines Produktes hinweg gewünscht ist. Wenn beispielsweise Rückschlüsse aus dem **Verhalten eines Produktes** oder des **Benutzerverhaltens** während des Betriebs auf das Engineering oder die Produktion abzuleiten sind, müssen Daten aus sehr unterschiedlichen Systemen zusammengeführt werden, die unter Umständen auch auf ganz unterschiedlichen Plattformen (auch Cloud-Plattformen) von unterschiedlichen Plattform-Betreibern zur Verfügung gestellt werden. Das **virtuelle Zusammenführen** dieser **verteilten Daten und Services**, die auch **Analysefunktionalitäten** anbieten können, über mehrere Service-Plattformen hinweg, stellt große Herausforderungen insbesondere an die Themen **Integration** und **Interoperabilität**.

Auch auf lokaler Ebene gilt es, produktionsgerechte Lösungen, **Standards** und **Referenzarchitekturen** zu finden, die eine Verarbeitung und Analyse von sehr großen Datenmengen in Echtzeit ermöglichen. Insbesondere bei der Installation von sehr großen **drahtlosen Sensornetzwerken** oder bei der Einführung von **durchgängigen und weitreichenden Installationen des digitalen Schattens** ergeben sich auf der Seite der Kommunikationstechnologien große Herausforderungen, um die Masse der anfallenden Daten auch in Echtzeit an die auszuwertenden Systeme möglichst **unterbrechungs-** und **fehlerfrei** zu übertragen.

Hier fehlen derzeit insbesondere im industriellen Umfeld, in dem **hohe Interferenzen** durch andere **Funkquellen** anfallen können, noch Lösungsansätze für eine ausreichende Datenübertragung sehr großer Datenmengen, die nicht nur eine **entsprechende Bandbreite**, sondern auch **garantierte Antwortzeiten** anbieten. Das gilt sowohl für **Architekturkonzepte**, die auf **Cloud-Strukturen** zurückgreifen, als

auch für **Architekturen**, die im Rahmen des **Fog-Computing** einen Teil der Datenhaltung und Datenverarbeitung in der Nähe der Datenquellen durchführen.

Big-Data-Analytics

Der Bereich **Analytik**, Kern der Big-Data-Anwendungen, sowie die **Prognose von Verhaltensmustern** und die **Ableitung von Handlungsanweisungen** bauen im Wesentlichen auf die Bildung von Modellen, die die Realität möglichst genau abbilden sollen. Mit Hilfe dieser Modelle können **Abweichung oder Verhaltensmuster** erkannt und damit **Prognosen** getroffen werden. Im Produktionsumfeld gibt es allerdings nur sehr wenige Modelle, die für die Analytik im Kontext großer Datenmengen angewendet werden können. So kann beispielsweise kaum ein Maschinenhersteller ein **kundenspezifisches Verschleißmodell** für seine gelieferte Maschine bereitstellen und behilft sich stattdessen mit **Standardwartungsplänen**. Algorithmen aus dem Bereich des **Machine Learning** und der **Künstlichen Intelligenz** können in Zukunft helfen, solche individuellen **Maschinen-** und **Verschleißmodelle** aufzubauen und dazu beitragen, dass genauere Vorhersagen zu **Abnutzungsvorräten**, **Standzeiten** oder **Prozessparametern** getroffen werden können.

Besonders in der Produktion entstehen Daten aus dynamischen Prozessen. Hier müssen Methoden und Verfahren zur Verfügung stehen, die eine **datenbasierte Überwachung** und Steuerung dieser Prozesse zulassen und dabei auch, sehr große Datenmengen in Echtzeit verarbeiten und auswerten können. In diesem Umfeld haben sich **Distributed Stream Computing Platforms (DSCP)** und Verfahren des **Complex Event Processing (CEP)** etabliert, die allerdings auch wieder für die Auswertungen auf Modelle zurückgreifen müssen. Insbesondere im Bereich der Produktionstechnologien gilt es hier vor allem, mögliche Einsatzszenarien für diese Technologien zu definieren und Anwendungsfälle für diese Einsatzszenarien auszugestalten und umzusetzen.

Bei der Daten-Integration gilt es, neben der **syntaktischen Interoperabilität** der Daten auch eine **semantische Interoperabilität** herzustellen. Dabei wird auf die inhaltliche Bedeutung der einzelnen Informationsobjekte eingegangen, um inhaltliche Zusammenhänge aus den unterschiedlichen Datenmodellen der Datenquellen abzuleiten. Statische und anwendergetriebene Verfahren für dieses Mapping gibt es bereits, die Herausforderung besteht jetzt in der **Bereitstellung von dynamischen Mapping-Verfahren**, die auf **Aussagenlogik** und **semantischen Technologien**, aber auch auf **Machine Learning** und **Künstlicher Intelligenz** aufbauen. Das gilt insbesondere dann, wenn Big-Data-Services über Plattformen hinweg orchestriert werden oder auf unterschiedliche Datenquellen parallel zugreifen sollen.

Der Aufbereitung der **Analyseergebnisse (Visualization)** im Produktionsumfeld kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier die gewonnenen Informationen als Entscheidungsgrundlage an den Anwender gebracht werden. Abhängig vom Konsumenten dieser Informationen und seiner aktuellen Aufgabenstellung, werden ganz unterschiedliche Anforderungen an eine **zielgerichtete** und **handlungsorientierte Informationsaufbereitung** gestellt. Insbesondere im **Kontext der Assistenzsysteme**, die den Anwender bei der Erledigung seiner Aufgaben unterstützen sollen, sind **benutzerfreundliche** und **kontextabhängige Informations-** und **Interaktionsformate** notwendig, aber auch in neuen **Mensch-Maschine-Schnittstellen**, wie beispielsweise der Mensch-Roboter-Kooperation.

IT-Sicherheit

Das Thema Sicherheit ist ein **wesentliches Element** in der Verarbeitung von großen Datenmengen. Nicht richtig behandelt, stellt die Sicherheit, oder besser gesagt die gefühlte Unsicherheit, ein **erhebliches Hindernis** für die Einführung von Lösungen für die datengetriebene Produktionsoptimierung dar. Im Kontext der Produktion wird Sicherheit auf zwei Ebenen gesehen, die sich mit den englischen Begriffen **Safety** und **Security** gut unterscheiden lassen. Unter dem Begriff **Safety** werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die dafür sorgen, dass der Betrieb von Produktionsanlagen sicher im Hinblick auf die **Unversehrtheit von Menschen und Produktionsressourcen** ist. **Security** hingegen adressiert den Bereich der **Daten- und Betriebssicherheit von IT-Systemen**.

Im Bereich Safety sind im Kontext von Big-Data-Auswertungen unter anderem **Latenzzeiten** zu berücksichtigen, wenn die Handlungsempfehlungen unmittelbar auf das Produktionsequipment angewandt werden sollen. Aber auch geeignete **Identifikationsmechanismen** sind wichtig, insbesondere im Bereich der **Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)**.

Im Bereich Security muss unter anderem sichergestellt werden, dass **personenbezogene Daten** entsprechend den **gültigen Vorschriften** behandelt werden. Auch die **Sicherstellung der Richtigkeit**

und **Zuverlässigkeit der verwendeten Daten** muss immer gewährleistet sein, und zwar beginnend am Ort der Datengenerierung – zum Beispiel einem Sensor – über die Verarbeitung und Analyse der Daten in der Cloud, bis hin zur Visualisierung der Handlungsempfehlung. Gleichzeitig muss auch durch Maßnahmen im Bereich der Security eine ausreichende **Ausfallsicherheit** gewährleistet sein, die dafür sorgt, dass angeforderte Daten und Services auch tatsächlich zur Verfügung stehen.

Neben diesen operativen Fragen hinsichtlich der IT-Sicherheit gilt es auch, **rechtliche Aspekte** der Datenerhebung und Datenauswertung zu klären. Hier stellt sich unter anderem die Frage, wem die von einer Maschine oder einem Produkt generierten Daten gehören. Gehören sie dem Hersteller oder dem Betreiber, dem Kunden der Produkte oder eventuell dem Entwickler der datenverarbeitenden Dienste oder dem Betreiber der Plattform, auf dem die Daten gespeichert werden? Ist diese Frage geklärt, muss auch noch geprüft werden, wer was mit den Daten und den Analyseergebnissen machen darf und wer die **Verantwortung für die Richtigkeit dieser Daten** trägt.

3.4.5 Migrationspfade für den Anwender

Der Weg hin zu einer datenbasierten Produktion besteht im Idealfall aus der sukzessiven Einführung in den Schritten **Digitalisierung, Vernetzung, Sammlung, Auswertung, Modellbildung** (descriptive analytics), **Vorhersage** (predictive analytics) und **Handlungsableitung** (prescriptive analytics) sowie zukünftig auch der Einführung **Künstlicher Intelligenz (cognitive analytics)**.

Die Digitalisierung führt dazu, dass mehr und mehr physische Objekte in die Lage versetzt werden zu kommunizieren, und Daten über sich und ihre Prozesse preiszugeben (**Cyber-physische Systeme**). Die Basis hierfür bildet unter anderem die Gesetzmäßigkeit aus **Moore's Law** [112], die besagt, dass sich die Leistung für Prozessoren etwa alle 18 Monate verdoppelt, was zu leistungsfähigeren und gleichzeitig kleineren und damit auch kostengünstigeren Recheneinheiten führt. Über die Vernetzung dieser kommunizierenden physischen Objekte wird entsprechend **Metcalf's Law** ein Mehrwert gestiftet. Demnach wächst der Nutzen

eines Kommunikationssystems im Quadrat zur Anzahl der möglichen Verbindungen zwischen den Teilnehmern. Dadurch, dass möglichst viele Objekte einer Produktion in einem Netzwerk zusammengeführt werden, entsteht ein ganzheitliches Abbild der Produktionsumgebung nahezu in Echtzeit (Digitaler Schatten). Die so vernetzten Daten aus dem Produktionsumfeld werden jetzt an geeigneter Stelle (siehe Abschnitt IT-Architekturen und Datenbereitstellung) gesichert, aufbereitet und den Interessenten zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe von Modellen können nun **Muster** und **Verhaltensweisen** extrahiert werden, aus denen sich dann im nächsten Schritt **Prognosen für die Zukunft** treffen lassen, die mit der Zeit immer stabiler und zuverlässiger werden. Aus diesen Vorhersagen lassen sich Handlungsanleitungen ableiten, die zu einer **datengetriebenen Produktionsoptimierung** führen. Führt man diesen Gedanken zu Ende, können diese Handlungsempfehlungen auch **autonom von Maschinen** oder **Programmsteuerungen** ausgeführt werden, womit die **Endausbaustufe der Smarten Fabrik** erreicht wäre.

3.4.6 Bezüge/ Schnittstellen zu den anderen Handlungsfeldern

Das Handlungsfeld **Analytik** steht in direktem **Bezug** zu den anderen **drei Handlungsfeldern**, die hier dargestellt wurden.

Cyber-physische Produktionssysteme und **Digitaler Schatten** sind im Kontext der Analytik **Datenquellen** und bilden die Produktion auf Basis erfasster **System-, Prozess- und Umgebungsvariablen** in **Echtzeit** ab. Cyber-physische Systeme können dabei aber auch in die Rolle des **Informationskonsumenten** wechseln und auf die **kontextbasierten Handlungsanleitungen** über entsprechende Aktorik reagieren. **Cloud-Plattformen** sind ein **wichtiges Infrastrukturelement** bei der **systemübergreifenden Auswertung** von Daten, da auf ihnen die Daten **gut skalierbar** verarbeitet, analysiert und bereitgestellt werden können.

4 Handlungsempfehlungen

Im folgenden Kapitel werden Handlungsempfehlungen für **Wirtschaft, Politik und Wissenschaft** aus **Sicht der Produktionstechnik** formuliert. Basis der Empfehlungen sind die Ausführungen aus dem dritten Kapitel zu den Themen **Cyber-physische Systeme, Cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen, Digitaler Schatten** sowie **Analytik**.

4.1 Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft

Systematische Reflektion der bestehenden Geschäftsmodelle unter Beachtung der neuen und sich zukünftig entwickelnden technologischen Möglichkeiten in den beschriebenen vier Handlungsfeldern

Unternehmen, und hier insbesondere **kleine und mittelständische Unternehmen**, müssen sich deutlich mehr mit **Geschäftsmodellinnovationen**, getrieben durch die digitale Transformation, beschäftigen. Hierzu ist es notwendig, das **eigene Geschäftsmodell** vollumfänglich zu verstehen und strukturiert neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, die durch die beschriebenen technologischen Potenziale sowie die gesellschaftlichen Veränderungen wirtschaftlich relevant werden können. Hierzu ist ein **aktives Ideen- und Talentmanagement** notwendig, auch über **Kooperationen mit Forschungseinrichtungen**.

Entwicklung und schnelle Erprobung von digital veredelten existierenden Geschäftsmodellen und innovativen neuen ggf. disruptiven Geschäftsmodellen durch Nutzung informationsbasierter Mehrwertdienste auf Basis neuer Wertschöpfungsmodelle

Die Basis neuer Geschäftsmodelle bildet der **echtzeitnahe Zugang zu Daten** und die Nutzung dieser Daten zur **Erzeugung neuer Dienste** mit **klarem Nutzenprofil** für den Kunden. Hierzu ist es notwendig, die **kundenrelevanten Daten** und deren Einfluss auf die zu optimierenden Zielgrößen, Prozesse, funktionalen Einheiten und Hierarchieebenen zu verstehen, um die **kundenseitigen Wertschöpfungspotenziale** auf Basis von Mehrwertdiensten in Bereichen wie **Condition Monitoring, Prozess- und Anlagensimulation, Optimierung, Systemintegration, Maschinen- und Anlagenprogrammierung** wirtschaftlich nutzbar machen zu können. Hilfreich ist dabei die Analyse von **Felddaten und Nutzungsdaten** (Social Media) sowie die Filterung relevanter Informationen und deren Rückführung in die Produktionsplanung und -entwicklung. Im Vordergrund muss die **schnelle Erprobung** so entstehender Mehrwertdienste stehen. Deshalb sind gemeinsam mit ausgewählten **Lead-Kunden** sowie notwendigen Ko-

operationspartnern »**Proofs of Concept**« (PoC) durchzuführen, die ausreichende Erkenntnisse über die Umsatzbarkeit **neuer Geschäfts- sowie Wertschöpfungsmodelle** liefern.

Systematische Übertragung der cyber-physischen Systemarchitekturen auf das eigene Produktportfolio sowie auf die eingesetzten Produktionsmittel

Im Zuge der Digitalisierung findet eine Transformation der Produkte hin zu **Cyber-physischen Architekturen** statt. Unternehmen sollten diese Transformation als **Chance für die Entwicklung neuer Funktionalitäten**, die **bessere Einbindung ihrer Kunden und Lieferanten** sowie für den Ausbau **lebenszyklusbegleitender Mehrwertdienste** verstehen. Hierzu sind die notwendigen Systeme, Kooperationen und Kompetenzen im Sinne eines **serviceorientierten Wertschöpfungssystems** aufzubauen. Die Potenziale zur **Entkoppelung von spezifischen Hardwareplattformen** durch Einbettung standardisierter Technologien, wie z. B. PC-basierte Steuerungen (sogenannte Soft-SPS) sind zu nutzen. Auch die Möglichkeiten, die sich durch die **Virtualisierung hardwareabhängiger it-Funktionalität** sowie durch die Nutzung von **Plattform- und Software-as-a-Service-Modellen** ergeben, sind gezielt in die Architektur der eigenen Produkte zu integrieren. Hierzu müssen unternehmenseigene Kompetenzen durch **strategische Allokation von Ressourcen** im Bereich der beschriebenen Handlungsfelder aufgebaut werden. Unter anderem müssen Unternehmen Mitarbeiter integrieren, die sogenannte **Hochsprachen in der Informatik** beherrschen. Zudem ist der **Wille zu Kooperationen** unter Umständen auch mit den Wettbewerbern zu formulieren, um schnell und in signifikanter Größe in **plattformbasierte Wertschöpfungsmodelle** erfolgreich einsteigen zu können. Denkbar sind hier Zusammenschlüsse auch von KMU zu **branchenspezifischen Plattformen**, um den Software-Plattformen großer, häufig aus den USA stammender Unternehmen sinnvoll zu begegnen.

Datenorientierte Erschließung und Erweiterung des domänenspezifischen Prozesswissens in allen relevanten Geschäftsprozessen produzierender Unternehmen

Viele Unternehmen haben bereits Zugang zu einer großen Menge an Daten aus ihren **Kerngeschäftsprozessen**, wie **Entwicklung, Produktion** oder auch **Vertrieb** und **Service**. Häufig werden die Daten zwar erfasst und archiviert, selten jedoch im Sinne der Analytik zur **Optimierung der Geschäftsprozesse** genutzt. Die systematische Erschließung **IKT-basierter Effizienz- und Innovationspotenziale** für Kerngeschäftsprozesse produzierender Unternehmen muss mehr Be-

deutung zugemessen werden. Hierzu sind **Leistungsgrenzen** bisher verwendeter **IKT-Systeme** insbesondere in der Produktion neu zu bewerten. Die Nutzenpotenziale neuer Technologien des IKT-Bereichs wie z. B. **Cloud-Architekturen, Drahtloskommunikation** und **Data Analytics** sowie **Machine Learning** sind für eigene Produktionsprozesse systematisch und ergebnisoffen zu analysieren.

Unternehmenskulturelle und technische Erschließung von IT-Sicherheit (Security/ Safety) als Vorteil im globalen Wettbewerb

IT-Sicherheit wird von vielen Unternehmen zu Recht als **hohes Risiko** der digitalen Transformation in der Wirtschaft angesehen. Die Bedeutung von IT-Sicherheit ist bereits heute sehr hoch und sollte deshalb nicht als Begründung für **unternehmerische Zurückhaltung oder Tatenlosigkeit** herangezogen werden. Vielmehr kann aus deutscher Perspektive die **IT-Sicherheit** zum Aufbau von **Wettbewerbsvorteilen** genutzt werden. IT-Sicherheit ist in Deutschland ein hohes und gesetzlich stark verankertes Gut. Die aktive, auch **globale Vermarktung von IT-Sicherheit als Mehrwertdienst** sollte deshalb im Vordergrund der Diskussion um Datenschutz stehen. Hierzu sind entsprechende technische Kompetenzen – zumindest **Bewertungskompetenzen** – aufzubauen, und es ist eine **Sensibilisierung** der eigenen Mitarbeiter bis hin zur **Verankerung der IT-Sicherheitsthemen in der Unternehmenskultur** voranzutreiben.

Umsetzung der digitalen Unternehmenstransformation mittels umfassender Road Maps unter Beachtung erfolgreicher Veränderungsansätze soziotechnischer Organisationen

Integration schafft Identifikation. Deshalb sind möglichst alle Mitarbeiter in die **agile Entwicklung und Realisierung** der digitalen Transformation eines Unternehmens zu beteiligen. Agilität bedeutet hier **Geschwindigkeit** und **Flexibilität** in der Stoßrichtung der eingeschlagenen Entwicklung. Basis hierfür ist eine **gemeinsame Erkenntnisebene** bei den Mitarbeitern, die es erlaubt, schnelle Schritte in den Markt sowie bei der Optimierung der Geschäftsprozesse zu machen. Hierbei sollten alle Entwicklungen am **Kundennutzen** und der Erfüllung von **Kundenbedürfnissen** orientiert sein. Methoden und Konzepte wie **Design Thinking, Minimum Viable Product, Open X** sowie **XaaS** können in diesem Feld sehr hilfreich sein.

Die schnelle Umsetzung von **Proofs of Concept** sowie der **Aufbau von Anwendungsszenarien** (sogenannte **Use-Cases**) sollte hier im Vordergrund stehen. Gemeinsam mit Mitarbeitern möglichst aller Hier-

archieebenen und Bereiche sollten erste Erfahrungen gesammelt werden, um sukzessive eine umfassende **Bewertungs-, Entwicklungs- sowie Realisierungskompetenz** aufzubauen, die die Basis für eine erfolgreiche **Migration in plattformbasierte Geschäftsmodelle** sowie entsprechende **Geschäftsprozesse** ermöglicht.

4.2 Handlungsempfehlungen für die Politik

Umfassender und schneller Ausbau der IKT-Infrastruktur als erfolgreiche Basis für die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft

Sämtliche **industriellen Revolutionen** benötigten ihre **spezifische Infrastruktur**, um gesellschaftliche **Fortschritte** und **Wohstandsgewinne** zu ermöglichen. Ebenso wie **Straßen- und Schienennetze** noch unabdingbar sind für die **Logistik physischer Güter**, und ebenso wie die zuverlässige und skalierbare **Energieversorgung**, insbesondere durch entsprechende **Stromnetze**, Grundvoraussetzung ist für den **wirtschaftlichen Betrieb** von Produktionsstätten und vieler ihrer Produkte, ist die **leistungsfähige IKT-Infrastruktur** eines Wirtschaftsraums absolut notwendig, um dessen digitale Transformation erfolgreich zu ermöglichen. Erhebliche **staatliche wie private Investitionen** in den Ausbau von schnellen **kabelgebundenen** sowie **kabellosen Breitbandnetzen** als Basis für das **taktile Internet** sind hierfür **alternativlos**.

Flexibilisierung des deutschen Innovationssystems, um die Geschwindigkeit von Innovationsprozessen massiv zu steigern und neue Verwertungsakteure zu gewinnen

Die **Digitalisierung und Vernetzung** beschleunigt die **Marktdurchdringung** und verkürzt gleichzeitig die **Produktlebenszyklen** vieler Produkte und Dienstleistungen. Dies bedeutet, dass die Leistung des deutschen **Innovationssystems** zunehmen muss, um die Position der deutschen Wirtschaft im **globalen Wettbewerb** zu erhalten oder gar auszubauen.

Um einerseits die **Geschwindigkeit** und andererseits die **Agilität** des **Innovationssystems** zu erhöhen, sind neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft und Forschung zu etablieren, die eine **höhere Interdisziplinarität**, **Bündelung von Forschungsressourcen** sowie eine **verbesserte Nutzenorientierung** ermöglicht. Konzepte wie **Industry on Campus**, Aufhebung der häufig **künstlichen Trennung** von **Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung** und die **gemeinsame Nutzung** von **Forschungsressourcen** sowie die **Stärkung von Gründungsaktivitäten**, auch

durch **steuerliche Vergünstigungen**, müssen hier Berücksichtigung finden.

Für die Produktionsforschung steht hier **zusätzlich der Zugang zu realen Produktionsdaten** im Vordergrund, um mittels Analytik umfassende **Erkenntnisgewinne** aber auch schnelle **Rückkopplungen** in die **industrielle Anwendung** zu ermöglichen.

Gezielter Ausbau von Spitzenforschung sowie Förderung der Lehre zur Kompetenzvermittlung im Ingenieurwesen in den vier Handlungsfeldern Cyber-physische Systeme, Cloud- und dienstebasierte Produktionsplattformen, Digitaler Schatten sowie Analytik

Spitzenforschung bedeutet, schnell **relevante Ergebnisse** zur **Verwertung in der Industrie** zu erzeugen. Hierzu sind die Voraussetzungen zu schaffen. Eine **veröffentlichungsorientierte Bewertung von Forschungsqualität** ist hier **nur eingeschränkt hilfreich** und sollte durch eine **Impact-Orientierung** im Sinne der **Bewertung wirtschaftlicher Relevanz** ergänzt werden.

Deutsche Unternehmen benötigen **zusätzliche Fachkräfte** mit **starkem disziplinärem Profil** in den **MINT-Bereichen**, aber auch **hoher systemischer Kompetenz**. Hierzu sind **spezifische Maßnahmen** einzuleiten, die unter anderem sehr gut im **Abschlussbericht der Expertenkommission Ingenieurwissenschaften@BW2025** des Landes Baden-Württemberg [113] dargestellt sind.

Schaffung der notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen und Förderung von kleinen und mittleren Unternehmen sowie Einbindung aller relevanten Stakeholder

Die **Aktivierung** und **Sensibilisierung der Gesellschaft** für die digitale Transformation der deutschen Industrie ist ein **Schlüssel zum Erfolg**.

Eine **nicht aufgeklärte Gesellschaft** sorgt unter Umständen für die **falschen Rahmenbedingungen**. Deshalb sind möglichst **alle relevanten Anspruchsgruppen** in die **politischen Diskussions- und Entscheidungsprozesse** mit einzubinden. Die **nationale Plattform Industrie 4.0** ist hier ein wichtiges Element. Neben den **Gewerkschaften**, die bereits ein **hohes Maß an Interesse** zeigen, sind die **KMU** noch weiter **zu fordern** und **zu fördern**. Die **aktuellen Ansätze** reichen bei Weitem noch nicht aus, **um eine umfassende Aktivierung des deutschen Mittelstands** zu erreichen. Auch der **deutsche** wie **europäische Rechtsrahmen** muss überprüft und

ggf. ergänzt werden. Europäische Initiativen wie »**single digital market**« [114] sind sehr zu begrüßen und möglichst schnell in **nationales Recht** zu überführen.

4.3 Handlungsempfehlungen für die Wissenschaft

Der Kommissionsbericht **Ingenieurwissenschaften@BW2025** des Landes Baden-Württemberg [113] hat sich sehr ausführlich mit den notwendigen **Veränderungen der Ingenieurwissenschaften** auseinandergesetzt, die insbesondere durch die Digitalisierung und Vernetzung getrieben sind. Den dort entwickelten **Handlungsempfehlungen** ist kaum noch etwas hinzuzufügen. Dennoch sind folgende **Forschungsthemen** aus Sicht der **WGP** von **besonderer Bedeutung**:

- Individualisierung der **Arbeitsmittel** durch Nutzung von Industrie 4.0
- Intelligente Nutzung von Industrie 4.0 zur **Fehlervermeidung**
- Verbesserte **Produktionssteuerung und -planung** durch Industrie 4.0
- Veränderungen der **Arbeitswelt** und der **benötigten Kompetenzprofile** durch Industrie 4.0
- **Umsetzungs- und Einführungsstufen**
- Effizienzsteigerung der Produktion durch **innovative ganzheitliche Produktionssysteme**
- Verbesserung der **Gerätesicherheit (Hard- und Software)**
- Analytik zur **Selbstoptimierung** von Produktionsprozessen und -systemen
- Entwicklung domänenspezifischer **IT-Sicherheitskonzepte**
- Entwicklung von **Kommunikationsstandards** und **automatisierten Entscheidungen** über die Informationsweitergabe
- Entwicklung **vollständiger Datenstrukturen** und Untersuchungen hinsichtlich der **Informationsgranularität**
- Entwicklung **benutzerfreundlicher** und **kontextabhängiger Informations- und Interaktionsformate**
- Entwicklung einer **Rahmenarchitektur** zur **cloud- und dienstebasierten Automatisierung** im Sinne von »**Automation as a Service**«
- (Weitere und bessere) **Lösungen, Standards** und **Referenzarchitekturen** (RAMI ist ein Anfang) [114], zur Verarbeitung und Analyse von sehr großen Datenmengen in Echtzeit mit **garantierten Antwortzeiten** und **geringer Latenz**
- Verbesserung der **Echtzeitfähigkeit** von **Cloudplattformen** im Hinblick auf **Steuerungssysteme**
- **multimodale Datenaufnahme** und **virtuelle Fusion** verteilter Daten und Services mit **Analysefunktionalitäten** über mehrere **Serviceplattformen** hinweg
- Entwicklung **smarter Algorithmen** aus dem Bereich des **Machine Learning** und der **Künstlichen Intelligenz**, die individuelle

Maschinen- und Verschleißmodelle aufbauen, zur **genaueren Vorhersage** der **Abnutzungsvorräte, Standzeiten** oder **Prozessparameter**

- Erforschung von Möglichkeiten zur **lokalen** und **dezentralen Analyse** und **Optimierung**
- Bereitstellung von **dynamischen Mapping-Verfahren**, die auf **Aussagenlogik** und **semantischen Technologien**, aber auch auf **Machine Learning** und **Künstlicher Intelligenz** aufbauen
- Definieren von **Einsatzszenarien** und **Anwendungsfällen** für die **Umsetzung** sowie **Untersuchung** von **potenziellen Einführungsstrategien**

5 Referenzen

- [1] Slama, D. et al.: Enterprise Internet of Things. Internet: <http://enterprise-iot.org/>. Zuletzt aufgerufen am 19.5.2016
- [2] Projektträger Karlsruhe (Hrsg.): BMBF-Projekt INBENZHAP. Internet: http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=3865. Zuletzt aufgerufen am 19.5.2016
- [3] Groupe Speciale Mobile (GSM) (Hrsg.): Internet: www.gsma.com/. Zuletzt aufgerufen am 19.5.2016
- [4] Local Motors (Hrsg.): Internet: <https://localmotors.com/>. Zuletzt aufgerufen am 19.5.2016
- [5] Vogel-Heuser, B.; Diedrich, C.; Broy, M.: Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik. At – Automatisierungstechnik 61 (2013) 10, S. 669–676
- [6] Monostori, L.; Kadar, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihh, W.; Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. In: CIRP Annals Manufacturing Technology 65 (2016) 2
- [7] Lee E.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. 2008. In: 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) S. 363–369
- [8] Broy, M. (Hrsg.): Cyber Physical Systems – Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme. Berlin: Springer-Verlag 2010
- [9] National Institute of Standards and Technology: Strategic R&D Opportunities für 21st Century Cyber-Physical Systems – Connecting computer and information systems with the physical world. Internet: http://www.nist.gov/el/upload/12-Cyber-Physical-Systems020113_final.pdf. National Institute for Standards and Technology, Gaithersburg. Zuletzt aufgerufen am 17.5.2016
- [10] Rajkumar, R.; Lee, I.; Sha, L.; Stankovic, J.: Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. Proceedings of the Design Automation Conference 2010, Anaheim 2010. Internet: <https://www.cs.virginia.edu/~stankovic/psfiles/Rajkumar-DAC2010-Final.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 10.6.2016
- [11] acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems – Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Berlin: Springer-Verlag 2011, S. 13–19
- [12] Geisberger, E.; Broy, M.: agenda CPS: Integrierte Forschungsagenda CPS. Berlin: Springer-Verlag 2012, S. 19–28
- [13] Berger C.; Hees A.; Braunreuther S.; Reinhart G.: Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems. Proceedings of the 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2016, S. 638–643
- [14] Reinhart G.; Scholz-Reiter, B.; Wahlster W.; Wittenstein M.; Zühlke D.: Intelligente Vernetzung in der Fabrik. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2015, S. 638–643
- [15] Monostori, L.: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. 2014. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2014, S. 9–13
- [16] VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Internet: https://www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf. VDI/VDE, 2013. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [17] Reinhart, G. et al.: Cyber-physische Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 5, S. 84–89. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [18] Lanza, G.; Haefner, B.; Kraemer, A.: Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system-based matching. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 64 (2015) 1
- [19] Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Hrsg. Acatech. Frankfurt am Main: April 2013, S. 22–29. Internet: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. Zuletzt aufgerufen am 12.3.2016
- [20] Verl, A.; Lechler, A.; Schlechtendahl, J.: Globalized cyber physical production systems. Production Engineering – Research and Development 6 (2012), S. 643–649
- [21] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2013. Internet: <http://www.iao.fraunhofer.de/lang-de/images/iao-news/produktionsarbeit-der-zukunft.pdf>
- [22] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Zukunftsbild »Industrie 4.0«. Internet: https://www.bmbf.de/pub/Zukunftsbild_Industrie_40.pdf. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin. Stand: 2012. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [23] Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogelheuser B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag 2014
- [24] Schmid, M.; Berger, S.; Rinck, P.; Fischbach, C.: Smarter statt schneller. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 7-8, S. 546–548
- [25] Reinhart, G.; Geiger, F.: Knowledge-Based Machine Scheduling under Consideration of Uncertainties in Master Data. Production Engineering Research and Development 10 (2016) 2, S. 197–207
- [26] Bauernhansl, T.: From the fractal factory to the cyber-physical production system. Internet: http://download.steinbeis-europa.de/2013-10-29-30_CPS/30102013-CPS-bauernhansl.pdf. Fraunhofer IPA, Brüssel. Stand: 2013. Zuletzt aufgerufen am 14.3.2016

- [27] Kowalewski, S.; Rumpe, B.; Stollenwerk, A.: Cyber-Physical Systems – eine Herausforderung für die Automatisierungstechnik? Internet: <http://www.se-rwth.de/publications/Cyber-Physical-Systems-eine-Herausforderung-an-die-Automatisierungstechnik.pdf>. Zuletzt aufgerufen 12.3.2016
- [28] Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Industrial Data Space. Internet: <http://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/industrial-data-space.html#>. Zuletzt aufgerufen 12.3.2016
- [29] Schiemenz, B.; Schönert, O.: Entscheidung und Produktion. München: Oldenbourg-Wissenschaftsverlag 2005, S. 11
- [30] Gausemeier, J.; Plass, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. München: Carl-Hanser-Verlag 2014, S. 7–10
- [31] Bischoff, J. (Hrsg.): Erschließen der Potenziale der Anwendung von »Industrie 4.0« im Mittelstand. Internet: http://www.zenit.de/fileadmin/Downloads/Studie_im_Auftrag_des_BMWi_Industrie_4.0_2015_agiplan_fraunhofer_iml_zenit_Langfassung.pdf. agiplan GmbH, Mühlheim an der Ruhr. Stand: 2015. Zuletzt aufgerufen am 14.3.2016
- [32] Schenk, M.; Flechtner, E.; Kujath, M.; Häberer, S.: Industrie 4.0-Checkup. Industrie 4.0 Management 31 (2015) 3, S. 21–25
- [33] Botthoff, A.; Hartmann E. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag 2015
- [34] Dorschel, J.: Praxishandbuch Big Data. Wiesbaden: Springer-Gabler-Verlag 2015
- [35] Mell, P.; Grance, T.: The NIST definition of Cloud Computing. Publication 800-145, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg 2011. Internet: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 10.6.2016
- [36] Mell, P.; Grance, T.: The NIST Definition of Cloud Computing a.a.O.
- [37] Siemens AG (Hrsg.): Siemens Cloud for Industry. Internet: <http://siemens.com/cloud-for-industry>. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [38] Siemens AG (Hrsg.): Open cloud platform boosts digital service business for industrial customers. Internet: <https://www.industry.siemens.com/services/global/en/portfolio/plant-data-services/cloud-for-industry/Documents/Press-release/PR2015100331DFEN.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [39] Brecher, C. (Hrsg.) ; RWTH Aachen, Werkzeugmaschinenlabor -WZL; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT: Integrative Produktion: Industrie 4.0. Tagungsband: Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium AWK, 22. bis 23. Mai 2014. Aachen: Shaker-Verlag 2014
- [40] Vick, A.; Krüger, J.: »Adaptive Nachgiebigkeitsregelung mit cloud-basierten Robotersteuerungen,« in Industrie 4.0 – Innovative Konzepte zur Automatisierung, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 2 Fertigungstechnik, 693, S. 19–30, Düsseldorf: VDI-Verlag 2015
- [41] Fraunhofer IPK (Hrsg.): »RetroNet – praxisnahe Brücke in die Industrie 4.0«, Internet: https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK/publikationen/themenblaetter/aut_RetroNet_web.pdf. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [42] Projektträger Karlsruhe (Hrsg.): Verbundprojekt RetroNet. Internet: http://www.produktionsforschung.de/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=4120. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [43] OPC Foundation (Hrsg.): Unified Architecture – Wegbereiter der 4. industriellen (R)Evolution. Internet: <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/21752/OPC-UA-Wegbereiter-der-I40.pdf?command=downloadContent&filename=OPC-UA-Wegbereiter-der-I40.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [44] Fraunhofer IML (Hrsg.): Logistics Mall, Fraunhofer-Gesellschaft. Internet: http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/intralogistik_und_it_planung/forschungsaktivitaeten/forschungsprojekte/logistics_mall.html. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016.
- [45] Ten Hompel, M. (2014): Logistics Mall – Marktplatz für Logistikdienstleistungen. In: Appelrath, H., Kagermann, H., Krcmar, H. (Hrsg.): Futur Business Clouds: Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Acatech-Studie. München: Utz-Verlag 2014. S. 52
- [46] Mell, P.; Grance, T.: The NIST Definition of Cloud Computing. A. a. O
- [47] Projekt pICASSO: Industrielle Cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit Cyber-physischen Systemen. Internet: <http://www.projekt-picasso.de/>. Zuletzt aufgerufen am 11.3.2016
- [48] Projektträger Karlsruhe (Hrsg.): Verbundprojekt RetroNet. A. a. O
- [49] Vick, A.; Vonasek, V.; Penicka, R.; Krüger, J.: Robot control as a service – Towards cloud-based motion planning and control for industrial robots. IEEE 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), Poznan 2015, S. 33–39
- [50] Guhl, J.; Vick, A.; Lambrecht, J.; Krüger, J.: Cloudsteuerung für Industrieroboter – Integrationsansätze. Industrie 4.0 Management 32 (2016) 2, S. 7–10
- [51] Kretschmer, F.; Lechler, A.: Teilnehmerverwaltung und -zuordnung innerhalb einer cloudbasierten Steuerungsplattform. In: Industrie 4.0 – Innovative Konzepte zur Automatisierung, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 693, S.1–8, Düsseldorf: VDI-Verlag 2015
- [52] Holtewert, P.; Wutzke, R.; Seidelmann, J.; Bauernhansl, T.: Virtual Fort Knox. Federative, Secure and Cloud-based Platform for Manufacturing. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013. Procedia CIRP, Volume 7 (2013) S. 527–532, Internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.027>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016
- [53] Minguez, J.: Der Manufacturing Service Bus; In: Digitale Produktion. Hrsg.: Westkämper, E. et al. Heidelberg: Springer-Verlag 2013

- [54] Minguéz, J.; Lucke, D.; Jakob, M.; Constantinescu, C.; Mitschang, B.; Westkämper, E.: Introducing SOA into production environments – the manufacturing service bus. 43rd. CIRP International Conference on Manufacturing Systems, Wien: Neuer Wissenschaftler-Verlag 2010
- [55] FarmNet. Internet: <https://www.365farmnet.com/>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016
- [56] Virtual Fort Knox. Internet: <https://www.virtualfortknox.de/>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016
- [57] Deutsches Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (DFKI), Kaiserslautern, Saarbrücken, Bremen, Berlin 2011
- [58] Krcmar, H.: Informationsmanagement. Berlin: Springer-Verlag 2010, S. 12f.
- [59] Stich, V.; Hering, N.: Daten und Software als entscheidender Wettbewerbsfaktor Herin. In: industrie 4.0 magazin – Zeitschrift für integrierte Produktionssysteme (2015), S. 8–13
- [60] Breuer, H.: Von Big Data zu Smart Data – Daten treiben Züge an. Internet: <http://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/digitalisierung-und-software/from-big-data-to-smart-data-heading-for-data-driven-rail-systems.html> Zuletzt aufgerufen am 8.1.2016
- [61] Luckham, D. C.: Business event processing – A real-time strategy guide. Hoboken: Wiley 2011
- [62] Anicic, D. ; Rudolph, S. et al. : Real-Time Complex Event Recognition and Reasoning – A Logic Programming Approach. In: Applied Artificial Intelligence 26 (2012) 1-2
- [63] Cammert, M.; Heinz, C. et al.: Stream Processing in Production-to-Business Software. In: Barga, R. S.; Zhou, X. (Hrsg.): ICDE 06 Proceedings: 22nd International Conference Data Engineering. Atlanta, Georgia, IEEE Computer Society, Los Alamitos 2006
- [64] Grauer, M.; Karadgi, S. et al: An Approach for Real-Time Control of Enterprise Processes in Manufacturing using a Rule-Based System. In: Schumann, M.; Kolbe, L. et al.: Multikonferenz Wirtschaftsinformatik, Göttingen: Universitätsverlag 2010
- [65] Schuh, G.; Blum, M. et al.: Der Digitale Schatten in der Auftragsabwicklung. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 1-2, S. 48–51
- [66] Probst, G., Romhardt, K.: Bausteine des Wissensmanagements – Ein praxisorientierter Ansatz. In: Dr. Wieselhuber & Partner (Hrsg.): Handbuch Lernende Organisation – Unternehmens- und Mitarbeiterpotentiale erfolgreich erschließen, Wiesbaden: Gabler-Verlag 1998, S. 46, und Probst, Gilbert J. B.; Raub, S. et al.: Wissen managen – Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen. 5., überarb. Aufl.; Wiesbaden: Gabler-Verlag 2006, S. 22
- [67] Schuh, G.; Nyhuis, P. et al.: Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0 – Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL. wt Werkstattstechnik online 105 (2015) 4, S. 200–203
- [68] Olle, W.; Clauß D.: Industrie 4.0 braucht den Mittelstand – Kurzstudie, Chemnitz Automotive Institute, 2015
- [69] Weskamp M.; Tamas A. et al.: Einsatz und Nutzenpotentiale von Data Mining in Produktionsunternehmen. Studie des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA 2014
- [70] Okuda R.; Kajiwara Y. et al.: Technical Trend of ADAS and Autonomous Driving. A survey of technical trend of ADAS and Autonomous Driving, Proceedings of Technical Program, 2014
- [71] Berger, C.; Rumpe, B.: Autonomes Fahren – Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge (Autonomous Driving – Insights from the DARPA Urban Challenge). München: Odenbourg-Verlag 2008
- [72] Darms M.; Winner, H.: Eine Systemarchitektur zur Fusion von Umfelddaten. Beitrag der TU Darmstadt auf der Tagung »Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz« München 2004. Internet: http://www.fzd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_fzd/publikationen_3/2004/2004_darmswinner_aktivesicherheitdurchfas.pdf. Zuletzt aufgerufen 10.6.2016
- [73] Tawari, S. et al.: Looking-In and Looking-Out Vision for Urban Intelligent Assistance: Estimation of Driver Attentive State and Dynamic Surround for Safe Merging and Braking, In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium/IEEE IV et al.: IEEE Intelligent Vehicles Symposium proceedings, 2014-8-11 June 2014, Dearborn, Michigan, USA [postponed from] Ypsilanti MI, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 117
- [74] Roth, E.: Generierung realitätsnaher Umfeldsensordaten zum Test vorausschauender Fahrerassistenzsysteme. Internet: <http://www6.in.tum.de/Main/ResearchVtdSensors>. Zuletzt aufgerufen am 8.1.2016
- [75] Hall D. L.: An Introduction To Multisensor Data Fusion, Proceedings of the IEEE 85 (1997) 1, S. 6–23
- [76] Luo, R. C.; Kay, M. G.: Multisensor integration and fusion in intelligent systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19 (1989) 5, S. 901–931
- [77] Kumar, P.; Chhokar, S.: An Intelligent System Based On Sensor Integration & Sensor Fusion, International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering 2 (2012) 3, S. 21–28
- [78] Ehrnböck, M.: Die Technologie der Radio Frequency Identification – Anwendung der RFID in der Unternehmenslogistik. Hamburg: Diplomica-Verlag 2014
- [79] Bruns, R.; Dunkel, J.: Event-Driven Architecture – Softwarearchitektur für ereignisgesteuerte Geschäftsprozesse. Berlin: Springer 2010
- [80] Köppe, E.: Lokalisierung sich bewegender Objekte innerhalb und außerhalb von Gebäuden. Dissertation Freie Universität Berlin 2014

- [81] Luo, R. C.; Kay M. G.: Multisensor integration and fusion a.a.O.
- [82] Alahi, A. ; Bierlaire, M. et al.: Robust real-time pedestrians detection in urban environments with low-resolution cameras. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 39 (2014), S. 113–128. S.125
- [83] Haberjahn, M.: Multilevel Datenfusion konkurrierender Sensoren in der Fahrzeugumfelderfassung. Dissertation Humboldt-Universität Berlin 2013
- [84] Frey, C.: IKT in der Fabrik der Zukunft – Ein Diskussionsbeitrag zu Industrie 4.0. *atp edition 56* (2014) 4, S. 42–53
- [85] Schuh, G.; Nyhuis, P. et al.: Produktionsdaten als Enabler. A. a. O.
- [86] Scheunert, U. et al.: Multi-Sensor-Daten-Fusion zur Personenerkennung mit dem Merkmal-Modell. *GI Jahrestagung, TU Chemnitz 2005*. S. 297-301. Internet: <http://subs.emis.de/LNI/Proceedings/Proceedings68/GI-Proceedings.68-62.pdf>.
- [87] Jo, K.; Chu, K. et al.: Interacting Multiple Model Filter-Based Sensor Fusion of GPS With In-Vehicle Sensors for Real-Time Vehicle Positioning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012) 1, S. 329–343
- [88] Luo, R. C.; Kay, M. G. (1989): Multisensor integration and fusion. A. a. O., S. 904
- [89] Matyas, K. : Taschenbuch Instandhaltungslogistik. München: Carl- Hanser-Verlag 2010, S. 124
- [90] Yao, W.; Xionglin, L.: A design of soft sensor based on data fusion In: Hu, W.: *International Conference on Information Engineering and Computer Science, 2009 – ICIECS 2009; 19–20 Dec. 2009, Wuhan, China; proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 1
- [91] Kadlec, P. ; Gabrys, B. et al.: Data-driven Soft Sensors in the process industry. *Computers & Chemical Engineering*, 33 (2009) 4, S. 795–814
- [92] Fortuna, L.: *Soft sensors for monitoring and control of industrial processes*, London: Springer 2007, S. 2
- [93] Kaneko, H.; Funatsu, K.: Maintenance-free soft sensor models with time difference of process variables. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107 (2011) 2, S. 312–317
- [94] Yao, W.; Xionglin, L.: A design of soft sensor based on data fusion. A. a. O.
- [95] Khaleghi, B.; Karray, F. et al.: Multisensor Data Fusion: A Data-Centric Review of the State of the Art and Overview of Emerging Trends. *Information Fusion* 14 (2013) 1, S. 28–44. S. 26
- [96] Yeganeh, N. K.; Sadiq, S. et al.: A framework for data quality aware query systems. *Information Systems*, 46 (2014), S. 24–44
- [97] Hüner, K.; Schierning, A. et al.: Product data quality in supply chains. The case of Beiersdorf. *Electronic Markets*, 21 (2011) 2, S. 141–154
- [98] Jarke, M.; Vassiliou, Y.: Data warehouse quality – A review of the DWQ project. In: Strong, D.; Beverly, K. (Hrsg.): *Proc. of the Conf. on Information Quality*. Cambridge: MIT University Press 1997
- [99] Wang, R. Y.; Strong, D.: What Data Quality Means to Data Consumers. *Journ. Management Information Systems*, 12 (1996) 4, S. 5–33
- [100] Schuh, G. ; Potente, T. et al.: Approach for Reducing Data Inconsistencies in Production Control. In: Zäh, M. F. (Hrsg.): *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability – Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2013)*, Munich, Germany, October 6th–9th, 2013. Heidelberg: Springer-Verlag 2013, S. 347–51
- [101] Schuh, G.; Potente, T. et al.: Improving Data Integrity in Production Control. In: *Procedia CIRP* 9 (2013), S. 44–48
- [102] Schuh, G.; Thomas, C. et al.: Achieving Higher Scheduling Accuracy in Production Control by Implementing Integrity Rules for Production Feedback Data. In: *Procedia CIRP* 19 (2014), S. 142–147
- [103] Kemper, a.; Eickler, A.: *Datenbanksysteme – Eine Einführung*, 6. aktualisierte und erw. Auflage; München: Oldenbourg-Verlag 2006
- [104] Schneider, M.: *Implementierungskonzepte für Datenbanksysteme*. Berlin: Springer-Verlag 2003
- [105] Bramer, M. A.: *Principles of data mining*. London: Springer 2013
- [106] Alpaydin, E.: *Introduction to machine learning*. Cambridge: MIT University Press 2014
- [107] Klein, D.; Tran-Gia, P.; Hartmann, M.: *Big Data*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag: *Informatik Spektrum* 36 (2013) 3, S. 219–223
- [108] Davenport, T.H.: *Competing on Analytics*. *Harvard Business Review* (2006) 1
- [109] Dhar, V.: *Data Science and Predictions*, *Communications of the ACM* 56 (2013) 12, S. 64–73
- [110] Turner, V.; Gantz, J.; Reinsel, D.; Minton, S.: *The Digital Universe of Opportunities: Rich Data and the Increasing Value of the Internet of Things*, Whitepaper. Hrsg. IDC, Framingham, USA, 2014. Internet: <http://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/index.htm>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016
- [111] BITKOM (Hrsg.): *Big-Data-Technologien – Wissen für Entscheider*. Leitfaden. Berlin, 2015. Internet: <https://www.bitkom.org/Publikationen/2014/Leitfaden/Big-Data-Technologien-Wissen-fuer-Entscheider/140228-Big-Data-Technologien-Wissen-fuer-Entscheider.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016
- [112] Moore, G.: Cramming More Components onto Integrated Circuits, *Electronics*, S. 114–117, April 1965 und *Proceedings of the IEEE* 86 (1998) 1. Internet: <https://www.cs.utexas.edu/~fussell/courses/cs352h/papers/moore.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 10.3.2016

[113] Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg [Hrsg.] Abschlussbericht der Expertenkommission Ingenieurwissenschaften@BW2025, Internet: https://mwk.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mwk/intern/dateien/Anlagen_PM/2015/132_PM_Anlage_Abschlussbericht_Expertenkommission_Ingenieurwissenschaften@BW2025_.pdf. Zuletzt aufgerufen 10.6.2016

[114] Oettinger, G.H. EU Kommission (Hrsg.): Digital Single Market. Bringing down barriers to unlock online opportunities. Internet: http://ec.europa.eu/priorities/digital-single-market_en. Zuletzt aufgerufen am 10.6.2016

[115] ZVEI (Hrsg.): Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 und die Industrie 4.0-Komponente. Internet: <http://www.zvei.org/Themen/Industrie40/Seiten/Das-Referenzarchitekturmodell-RAMI-40-und-die-Industrie-40-Komponente.aspx>. Zuletzt abgerufen 1.6.2016

Anhang

Aktuelle Studien zu Industrie 4.0 und weiterführende Literatur

acatech (Hrsg.): Cyber-Physical Systems : Innovationen durch softwareintensive eingebettete Systeme. Symposium, 2.2.2010, München. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – 141 S. (acatech DISKUSSION)

acatech Arbeitskreis Smart Service Welt (Hrsg.): Smart Service Welt. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Berlin, 2014

Anderl, Reiner; Fleischer, Jürgen: Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. [Online-Edition: <http://industrie40.vdma.org>] VDMA Forum Industrie 4.0 (Hrsg.) Frankfurt 2015 ISBN 978-3-8163-0677-1

Bauernhansl, Thomas (Hrsg.); ten Hompel, Michael (Hrsg.); Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. Zweite Auflage 2016

Bauernhansl, Thomas; Lickefett, Michael (Hrsg.): Strukturstudie »Industrie 4.0 für Baden-Württemberg«. Baden-Württemberg auf dem Weg zu Industrie 4.0. Stuttgart, 2014

Bauernhansl, Thomas; Emmrich, Volkhard; Paulus-Rohmer, Dominik; Döbele, Mathias; Schatz, Anja; Weskamp, Markus: Geschäftsmodell-Innovation durch Industrie 4.0: Chancen und Risiken für den Maschinen- und Anlagenbau. – München: Wieselhuber & Partner, 2015

Bischoff, Jürgen (Hrsg.): Erschließen der Potenziale der Anwendung von »Industrie 4.0« im Mittelstand. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Mühlheim, 2015

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Zukunftsbild Industrie 4.0. Bonn, Berlin, 2015

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. Berlin, 2015

Capgemini (Hrsg.): Big and Fast Data: the rise of insight-driven business insights at the point of action will redefine competitiveness. Stuttgart, 2015

Fraunhofer IAO, Bitkom (Hrsg.): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Stuttgart, Berlin, 2014

Fraunhofer IPA, IHK Rhein-Neckar, Pfalz und Darmstadt Rhein Main Neckar (Hrsg.): Industrie 4.0 – Chancen und Perspektiven für Unternehmen der Metropolregion Rhein-Neckar. Studie im Auftrag der Industrie- und Handelskammern Rhein-Neckar, Pfalz und Darmstadt Rhein Main Neckar erstellt durch das Fraunhofer IPA. Stuttgart, 2015

Frost&Sullivan (Hrsg.): Industrie 4.0 Business-Ökosystem – Definition der neuen Normalität. Frankfurt, 2015

IBM Institute for Business Value; Saïd Business School der Universität Oxford (Hrsg.): Analytics: Big Data in der Praxis. Wie innovative Unternehmen ihre Datenbestände effektiv nutzen. Armonk, New York, 2012

Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit (Hrsg.): Industrie 4.0 und die Folgen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft. IAB Forschungsbericht 8/2015. Berlin, 2015

KPMG AG, Bitkom Research GmbH (Hrsg.): Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland. Amstelveen, Berlin, 2015

McKinsey Global Institute (Hrsg.): Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. New York, 2011

McKinsey Global Institute (Hrsg.): Cracking the digital code. New York, 2015

McKinsey Global Institute (Hrsg.): Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy. New York. 2013

Parametric Technology Corporation, Oxford Economics (Hrsg.): Manufacturing Transformation. Achieving competitive advantage in a changing global marketplace. Needham, Mass., Frankfurt, 2014

Plattform Industrie 4.0 (Hrsg.): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0. Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. Berlin, Frankfurt, 2015

Plattform Industrie 4.0, Bitkom, VDMA, ZVE (Hrsg.): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Bauernhansl, Thomas; Hörcher, Günter; Seidelmann, Joachim. Frankfurt, April 2013. 112 S.

Plattform Industrie 4.0, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): Memorandum der Plattform Industrie 4.0. Berlin, 2015

PricewaterhouseCoopers (Hrsg.): Industrie 4.0. Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. München, 2014

Roland Berger Strategy Consultants (Hrsg.): Industry 4.0. The new industrial revolution. How Europe will succeed. München, 2014

Schäfer, Andreas; Knapp, Melanie; May, Michael; Voß, Angelika. Fraunhofer IAIS (Hrsg.): BIG DATA – Vorsprung durch Wissen. Innovationspotenzialanalyse. St. Augustin, 2012

Spath, Dieter; Fraunhofer IAO (Hrsg.) Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. – Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013. 155 S.

Tschöpe, Sebastian; Aronska, Kateryna; Nyhuis, Peter: Was ist eigentlich Industrie 4.0? Eine quantitative Datenbankanalyse liefert einen Einblick. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2015) 3, S. 145–149

VDMA Impuls Stiftung, Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH, FIR e. V. an der RWTH Aachen (Hrsg.): Industrie 4.0-Readiness. Aachen, Köln, Frankfurt, 2015

Westkämper, Engelbert et al. (Hrsg.): Digitale Produktion, Springer-Vieweg, 2013

Wirtschaftsrat Deutschland (Hrsg.): Positionspapier des Wirtschaftsrates Industrie 4.0. Die Zukunft der deutschen Industrie gestalten. Berlin, 2015

