



## Conference Paper

# Industrie 4.0 für den Maschinen und Anlagenbau

**Author(s):**

Wegener, Konrad; Kunz, Andreas; Bochmann, Lennart; Bänziger, Timo

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010722924> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

# Industrie 4.0 für den Maschinen- und Anlagenbau

**K. Wegener, A. Kunz, L. Bochmann, T. Bänziger**

ETH Zürich, Institute of Machine Tools and Manufacturing

## Abstract

Industrie 4.0 ist gekennzeichnet durch die konsequente Umsetzung von Internettechnologien in der betrieblichen Leistungserstellung. Dies erfordert jedoch einen Ansatz, der deutlich über den Maschinenbau hinaus weist. Wie für Industrie 4.0 typisch verschmelzen in der Realisierung die Geschäftsmodelle und die eingesetzte Infrastruktur. Möglichkeiten der Interaktion, Datenakquisition, Datenverdichtung und Entscheidungsfindung werden diskutiert.

## Keywords:

Industrie 4.0, Smart factory, Cyberphysische Produkte, Internet Virtual Reality, rekonfigurierbare Systeme

## 1. Einführung, Standortbestimmung und Definition von Industrie 4.0

Kürzer werdende Produktlebenszyklen und zunehmender Variantenreichtum stellen eine immer größere und komplexere Herausforderung an die Produktion dar [1]. Um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber globalen Konkurrenten langfristig zu sichern wurde die High-Tech-Strategie der deutschen Bundesregierung Industrie 4.0 ins Leben gerufen [2]. Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution nach der Dampfmaschine, der Elektrifizierung und der Computersteuerung [3]. Dabei geht es darum, das Potential moderner IT-Lösungen, wie z.B. des Internets, mobiler Computer und Clouds, auf industrielle Prozesse anzuwenden und weg von zentral gesteuerten Fabriken, hin zu einer dezentral und dynamisch gesteuerten Produktion zu gelangen [4]. Ermöglicht wird diese Entwicklung durch ein exponentielles Wachstum der Rechen- und Speicherkapazität seit 1970, auch bekannt als das Moore'sche Gesetz [5]. Dabei hat die Entwicklung der

Informationstechnologie ein neues Zeitalter erreicht, in welchem nicht mehr nur sich wiederholende Aufgaben automatisiert werden, sondern der Mensch auch bei kognitiven Aufgaben durch Maschinen unterstützt wird [6]. Ein Hauptmerkmal von Industrie 4.0 ist, dass Produkte, d.h. Maschinen, Fahrzeuge, Fertigungsanlagen, Ventile usw. mit einer zweiten Identität im Internet ausgestattet werden, die als digitales Abbild, genannt auch virtuelle Repräsentanz und je nach Ausprägung als digitaler Schatten oder digitaler Zwilling bezeichnet werden. Damit werden sie zu cyberphysischen Produkten oder cyberphysischen Systemen (CPS). Dabei können Sie im Realen funktionieren wie gewohnt aber im Virtuellen, im Internet ebenfalls agieren, Informationen austauschen, Vorgänge auslösen. Fig 1 zeigt die durch Industrie 4.0 intendierte Verknüpfung zwischen der virtuellen und realen Welt zur Beherrschung verschiedenster Leistungsbereiche eines Unternehmens.

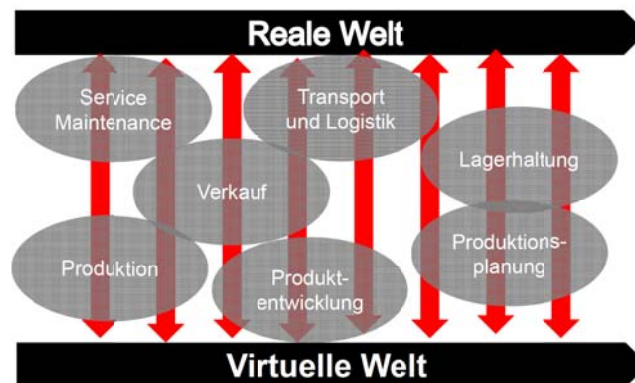


Fig. 1: Industrie 4.0 als Verbindung zwischen der virtuellen und digitalen Welt

Damit entsteht ein Internet der Dinge und Dienstleistungen, [3]. CPS können selber wiederum Agglomerationen aus verschiedenen CPS sein, die ebenfalls selbständig im Internet verkehren, ohne dass dazu der Weg über die Zentralsteuerung erfolgen muss. Durch die Vernetzung und die Kommunikation zwischen Menschen, Maschinen und Produkten eröffnen sich neue Möglichkeiten, beispielsweise im Bereich der Ferndiagnose und Fernwartung. Mit Sensorik ausgestattete Maschinen generieren große Mengen an Daten, welche durch intelligente Algorithmen verarbeitet werden, um Rückschlüsse auf den Systemzustand zu ziehen. Die Kombination der Daten aus vernetzten Maschinen, beispielsweise durch den Hersteller, erlaubt den Einsatz lernender

Systeme für die prädiktive und individuelle Wartung. Dies bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich, etwa im Bereich des Datenhandlings. Daten müssen nicht nur aufgenommen, sondern auch in geeigneter Weise gespeichert und für Analysetools zugänglich gemacht werden, beispielsweise in einer Cloud. Daraus generiertes Systemwissen muss anschließend den CPS wieder zugänglich gemacht werden, idealerweise in einem standardisierten Format, um dann deren reales Verhalten zu modifizieren. In der Produktion treffen sich die CPS in Herstellung und die cyberphysikalischen Produktionssysteme (CPPS), CPS in Verwendung. Das führt gerade in der Produktionstechnik zu einem tiefgreifenden Wandel. Diesen zu vollziehen, ist notwendig, um mit der höheren Geschwindigkeit durch Internettechnologien mithalten zu können. Die junge Generation und zukünftigen Arbeitskräfte sind bereits auf diesen Wandel eingestellt, gehen intuitiv mit den neuen Techniken um, die Maschinenindustrie steht jedoch noch vor einer großen Herausforderung.

## **2. Die Bedeutung und Rolle cyberphysischer Systeme**

Die Nutzung des Internets der Dinge in der Fertigung erfordert, dass jegliche Systeme und Komponenten des Fertigungssystems eindeutige Identifikationen besitzen und mittels einer virtuellen Repräsentanz digital abgebildet werden. Die virtuelle Repräsentanz bildet ebenfalls Systemeigenschaften des realen Objekts im digitalen Raum ab. Zur Schaffung der virtuellen Repräsentanz werden im Industrie 4.0 Kontext cyberphysische Systeme als Schlüsselkonzept angesehen. Nach Vogel-Heuser [7] sind CPS Erweiterungen heutiger Systemkomponenten und besitzen Sensorik zur Umgebungs- und Zustandserfassung (Datengenerierung), Speicherkapazität zur permanenten oder auch temporären Datenspeicherung, Rechenleistung zur Verarbeitung generierter Daten und Erzeugung benötigter Informationen, Aktorik zur Ausführung von Aktionen und Beeinflussung des Systems basierend auf datengetriebenen Entscheidungen und eine Kommunikationseinheit zum permanenten und möglichst echtzeitfähigen Datenaustausch mit anderen Teilnehmern, anderen CPS im Internet der Dinge. Somit ermöglichen in das Internet der Dinge eingebundene CPS eine Erhöhung der Systemtransparenz, lückenlose Informationsflüsse und echtzeitnahe Datenverfügbarkeit. Der effiziente und verzögerungsarme Informationsaustausch von CPPS untereinander (M2M-Kommunikation), mit anderen CPS sowie mit fertigungsrelevanten IT-Systemen wie z.B. MES (Manufacturing Execution System) sind

Grundvoraussetzungen für Anwendungen im Bereich des Fabrikmonitoring und ist in Fig. 2 gezeigt.

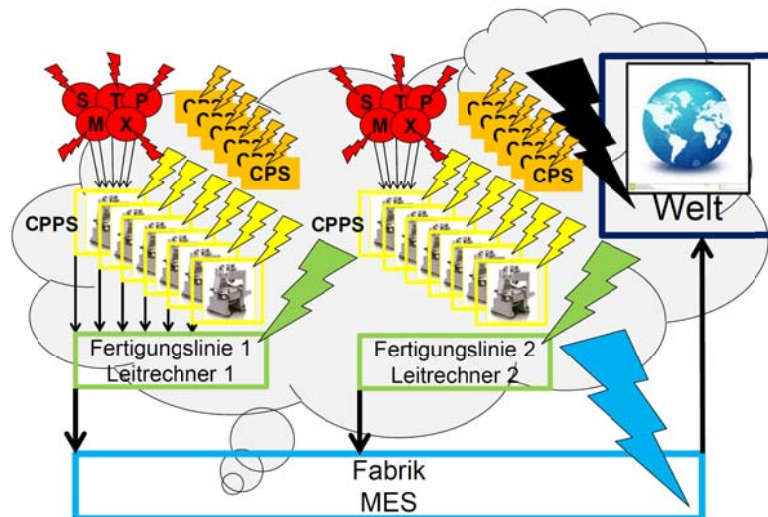


Fig. 2: Kommunikation in und Aufbau einer Smart Factory aus CPPS, CPS und MES. Gerade schwarze Pfeile stellen die konventionelle Kommunikation dar.

Durch die Zustandserfassung der im Fertigungssystem agierenden CPS wird eine Transparenzsteigerung erzielt, die zu echtzeitnahen und simulations-basierten Optimierungen sowie daten-basierter Entscheidungsfindung befähigen. Die Nutzung von CPS ist ein wesentlicher Schritt zur Erreichung intelligenter Fertigungsnetzwerke, der sogenannten Smart Factory gemäß Fig. 2, in denen Produkte eindeutig identifizierbar sowie jederzeit lokalisierbar sind und ihre Historie, den aktuellen Zustand sowie alternative Wege zum Ziel kennen. In der Zielvorstellung der Smart Factory steuern Produkte ihre eigene Fertigung entlang individueller Materialflusspfade selbstständig und optimal angepasst an den aktuell herrschenden Systemzustand. Bauernhansl [2] beschreibt die Zielsetzung der Smart Factory mit der Kreierung von Prozessmodulen bzw. cyberphysischen Prozessfraktalen, die mittels flexiblen Transportsystem verbunden werden. Somit wird die Möglichkeit von individuellen Materialflusspfaden geschaffen, d.h., dass jede Produktvariante entlang eines unterschiedlichen Weges im Fertigungssystem sowie anhand unterschiedlicher Prozessreihenfolgen gefertigt werden kann. Bochmann et al. [4] haben das Potenzial der Prozessreihenfolgeflexibilität beispielhaft anhand einer Vor-

montage im Automobilbau ermittelt und bestätigen die zuvor genannte Vision der individuellen Materialflusspfade, da sogar in den heutigen stringent getakteten hochvolumigen Montagelinien des Automobilbaus enorme Reihenfolgeflexibilitäten von bis zu 70 % vorliegen. Die Reihenfolgeflexibilität beschreibt das Potenzial der Vertauschung der Prozessreihenfolge zur Erzeugung eines Produktes und beachtet technische Restriktionen bzw. Abhängigkeiten zwischen den Prozessen.

### **3. Notwendige technologische Voraussetzungen und Lösungsansätze**

Gemäss [13] ist jede der industriellen Entwicklungsstufen durch eine Leittechnologie charakterisiert, die die Basis für jedwede industrielle Umsetzung auf dieser Stufe ist. Anders als in den vorherigen Entwicklungsstufen ist jedoch, dass die Reichweite eine andere ist. Der integrative Charakter von Industrie 4.0 führt dazu, dass Umsetzungseinseln nur wenig Nutzen versprechen. Industrie 4.0 benötigt eine Fülle an notwendigen technologischen Voraussetzungen zur erfolgreichen Einführung, die im Folgenden diskutiert werden..

Auf unterster Systemebene werden Informationen aus dem physischen System abgeborgt. Zwingende technische Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von Sensorik. Des Weiteren ist die Autonomie von Teilsystemen sowie die Dezentralisierung des Gesamtsystems, die nach Bauernhansl [3] in zukünftigen Fertigungssystemen zur Beherrschung der marktseitigen Komplexität benötigt werden, stark abhängig von den Möglichkeiten mittels Sensorik ausreichend exakte und in Echtzeit aktualisierte Umgebungsmodelle zu generieren. Eine weitere technologische Voraussetzung für die zukünftige Fertigung ist die Vernetzung. Nur durch die vollständige Vernetzung aller Fertigungsteilnehmer kann der vollständige Systemzustand einer Fabrik oder Fertigungslinie ermittelt werden, der als Grundlage für ganzheitliche Optimierungen dient. Ebenfalls die Dezentralisierung der Entscheidungsfindung bedarf der Vernetzung auf allen und über alle Systemebenen hinweg. Die Optimierung einer Fertigung bedarf der Kommunikation zwischen Maschinen (M2M-Kommunikation), zur Einbeziehung aller relevanten und vor allem aktuellen Informationen über das Fertigungssystem. Neben der M2M-Kommunikation muss außerdem die Vernetzung bzw. Kommunikation mit bestehenden IT-Systemen realisiert werden. Zur Speicherung und Auswertung der hierbei anfallenden Datenmengen werden Server benötigt, die für die Handhabung großer Datenmengen ausgelegt sind und auf verteilte Rechenleistung zurückgreifen können. Diese Serversysteme werden häufig

als Clouds bzw. Cloud Computing bezeichnet und sind eine weitere technische Voraussetzung für Industrie 4.0. In der Cloud können anschließend die gesammelten, aus unterschiedlichen Quellen stammenden Daten mittels neuester Analysemethoden, ausgewertet werden. Der Begriff Big Data suggeriert, es handle sich um ein Speicherproblem – dagegen ist das Hauptthema die Generierung von nutzbaren Informationen aus riesigen Datenmengen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Identifikation zuvor unbekannter Korrelationen gelegt, die durch die Datenmenge sowie -vielfalt ermöglicht wird. Die bisher genannten technischen Voraussetzungen fördern den effizienten Datenaustausch zwischen allen Fertigungskomponenten bzw. CPPS. Somit wird ein einheitliches, standardisiertes Kommunikationsprotokoll zwingend notwendig. Aktuell haben sich mit den Kommunikationsprotokollen Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und Message Queue Telemetry Transport (MQTT) zwei Quasistandards durchgesetzt, die industriell angewendet werden. Nach Hoppe [8] wird ebenfalls versucht OPC UA mittels dem MQTT Protokoll zu transportieren. MQTT ist ein publish/subscribe Messaging System, bietet eine leichtgewichtige Implementierung und wurde für stabile Übertragungen bei begrenzten Bandbreiten sowie Übertragungsvolumen und unsicheren Übertragungen entwickelt. OPC-UA hingegen ist weitaus mehr als ein Kommunikationsprotokoll. Es stammt aus einem objektorientierten Remote Procedure Call System und bietet ein hierarchisches Objektmodell mit bidirektionalen Verbindungen. OPC wurde ursprünglich geschaffen, um herstellerunabhängig in industriellen Bussystemen kommunizieren zu können und findet daher typischerweise Anwendung in Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systemen zur Überwachung und Steuerung technischer Prozess mittels Computersystemen. Eine weitere technologische Voraussetzung stellen Assistenzsysteme dar. Eine Unterscheidung wird hierbei zwischen physischen und virtuellen Assistenzsystemen getroffen. Physische Assistenzsysteme zielen auf die Unterstützung der Werker ab, um beispielsweise die Ergonomie zu erhöhen oder auch die Wertschöpfungsdichte zu erhöhen, indem sensitive Leichtbauroboter im vorhandenen Arbeitsraum mit dem Werker arbeiten und kollaborieren. Dieses wird als Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) bezeichnet. Virtuelle Assistenzsysteme zielen auf eine rollen- und kontextspezifische Informationsbereitstellung für den Menschen ab, damit dieser die steigende Fertigungskomplexität beherrschen kann. Dies kann durch die Nutzung von Augmented Reality (AR) erfolgen, bei der die Realität mittels Informationen aus der virtuellen Welt angereichert bzw. überlagert wird. Neben technologischen Voraussetzungen werden auch rechtliche Grundlagen und sicher-

heitsgewährende Richtlinien bzw. Standards benötigt. In rechtlicher Hinsicht müssen Haftungsfragen bei Systemfehlern, Urheberrechte sowie IP-Rechte eindeutig geregelt sein. Bezüglich der Sicherheit zukünftiger Fertigungssysteme muss zum einen die IT-Sicherheit, also die Minimierung der Risiken der Manipulation bzw. schädlichen Beeinflussung der vernetzten Fertigung, und zum anderen die Arbeitssicherheit, also die Gewährleistung einer für den Menschen sicheren Arbeitsumgebung bei dem Einsatz der neuen Technologien, beachtet werden. Für erstgenannten Sicherheitsaspekt wurde das Trusted Core Network (TCN) vom Fraunhofer Institut für sichere Informationstechnologie (SIT) [9] entwickelt. Hierdurch soll eine hardwarebasierte Sicherheit für industrielle IT-Netze gewährleistet werden. Beim zweitgenannten Sicherheitsaspekt wird grundlegend auf Konzepte zur Kollisionsvermeidung und Kollisionserkennung gesetzt. Bei der Kollisionsvermeidung werden Kollisionen zwischen Mensch und Roboter ausgeschlossen, indem der Arbeitsraum kontinuierlich überwacht wird. Die Kollisionserkennung verfolgt den Grundgedanken, dass der Betrieb von Robotern so durchgeführt wird, dass diese im Falle einer Kollision lediglich einen geringen potentiellen Schaden verursachen. Tritt hierbei eine Kollision auf erkennt dies der Roboter und leitet eine Gegenaktion ein.

#### **4. Auswirkungen der Datenintegration**

Durch die flächendeckende Integration von Sensoren und Datenquellen fallen große Datenmengen an, welche von einem Rechner alleine nicht mehr gehandhabt werden können. Man spricht hierbei von Big Data oder Massendaten, wenn eine herkömmliche Computereinheit, welche für die Verarbeitung der Sensorsignale und Speicherung der Daten eingesetzt wird, nicht mehr ausreicht um die Daten zu analysieren. Gartner [10] definiert Big Data über die drei Eigenschaften Volumen, Geschwindigkeit und Vielfalt in welcher die Daten anfallen. Für die Verarbeitung und Interpretation solcher Massendaten werden vernetzte Computersysteme und entsprechende Softwarearchitekturen für die Verwaltung benötigt, wobei die gesamte Rechenleistung hierbei räumlich und zeitlich verteilt ist, jedoch durch einen Teilnehmer abgerufen werden kann. Dies ermöglicht den Einsatz neuartiger Datenanalyseverfahren und selbstlernender Algorithmen, wie beispielsweise Deep Neural Networks. Komplexe Zusammenhänge können in dieser Weise aus geeigneten Datensätzen extrahiert werden, welche durch herkömmliche Verfahren nicht erkennbar sind. Hier werden intelligente



Assistenzsysteme benötigt, die bei der Ausführung von Analysen und bei der Interpretation der Resultate unterstützen. Dies führt zu einer höheren Systemtransparenz, da zum einen durch das Aggregieren großer Datenmengen die Zustände eines Systems potentiell besser bekannt sind und zum anderen mehr Informationen über das Verhalten und die Zusammenhänge innerhalb des Systems vorhanden sind. Die Steuerung komplexer Systeme und Unternehmen geschieht zunehmend datenbasiert, was unter Umständen zu nicht intuitiv nachvollziehbaren Entscheidungen führen kann. Neuronale Netze können beispielsweise sehr präzise Voraussagen über die Entwicklung eines Systems in dem eingelernten Parameterbereich treffen, ohne dass ihnen ein für den Menschen verständliches Modell zugrunde liegt und die einzelnen Zusammenhänge innerhalb des Netzes keine reale Bedeutung haben. Des Weiteren führt eine ganzheitliche, wertschöpfungskettenübergreifende Optimierung eines Produktionssystems oft zu lokalen Verschlechterungen, wie beispielsweise längeren Standzeiten, Rüstvorgängen oder Wartungsintervallen. Diese Aufhebung lokaler Optima muss in Kauf genommen und von den Betroffenen akzeptiert werden. Eine globale Optimierung erfordert ebenfalls den gegenseitigen Austausch von Daten, was eine Entwicklung weg vom privilegierten Datenzugriff hin zu gleichberechtigter Datennutzung bedeutet. Dafür können globale Trends frühzeitig erkannt werden und beispielsweise durch den Hersteller Ausfallmodelle für bestimmte Maschinentypen in Echtzeit angepasst werden und Maschinen individuell aufgrund von Maschinen,- Produkt- und Systemparametern gewartet werden. Die Berücksichtigung solcher dynamischer Effekte mittels Datenzugriff aus der Ferne anstatt der Vorbeugung durch Standardisierung und regelmäßige Abläufe verspricht eine enorme Effizienzsteigerung, beispielsweise im Produktionsbetrieb oder für die Wartung von Maschinen.

## **5. Der Mensch in Industrie 4.0-Umgebungen**

Im Gegensatz zum alten CIM-Konzept wird der Mensch bei Industrie 4.0 nicht hinausgeskatotiert, sondern ist der eigentliche Adressat der Datenkollektion, er fällt die Entscheidungen, vollbringt alle Aktivitäten, die schwer oder gar nicht automatisierbar sind. Der Mensch nimmt in der Smart Factory sehr unterschiedliche Funktionen wahr, ist Maschinenbediener, Instandhalter, Schichtführer Standortleiter usw.. Für ihn aber auch abhängig von der augenblicklichen Funktion hat die Aufbereitung der Datensammlung zu konkreten Informationen zu erfolgen. Die durchgehende Digitalisie-

rung der Produktion hat nicht nur Auswirkungen auf technologischer Ebene, sondern stellt für den Menschen einen signifikanten Wandel der Arbeitsumgebung dar. Hybride Teams, in welchen Menschen als Werker und Maschinen intelligent zusammenarbeiten und interagieren, können sehr vielfältige Montageaufgaben ausführen und leisten somit einen wesentlichen Beitrag zu der geforderten Flexibilisierung der Produktion [11]. Im Gegensatz zur herkömmlichen Fertigung erledigt ein Werker in der dezentral gesteuerten Fertigung verschiedene Arbeitsschritte in nicht vordefinierter Reihenfolge. Die Arbeitsinhalte unterliegen einem hochfrequenten Wechsel und der Werker kann demnach seine nächsten Arbeitsinhalte nicht voraussehen. Da der Zustand eines variantenreichen Produktes potentiell nicht erkennbar ist, werden Informationen über das zu bearbeitende Produkt und den aufzuführenden Arbeitsschritt aus dem Cyberspace benötigt. Diese Informationen müssen dem Menschen rollen- und kontextspezifisch auf intuitive Weise vermittelt werden. Durch die virtuell erweiterte Sicht auf den Produktionsprozess kann der Werker somit seine Aufgabe besser wahrnehmen und im Gegenzug seine Expertise mit anderen teilen.

Durch die ständige Interaktion mit Maschinen und Assistenzsystemen wird der Mensch zu einem Teil des cyber-physischen Systems, wodurch sich sein Anforderungsprofil fundamental verändert. Neben der Akzeptanz neuer Technologien von Wearables bis hin zu intelligenten Robotern ist die Qualifizierung der Werker im Bereich der Informationstechnologien von größter Bedeutung. Der Umgang mit smarten Devices ist eine Grundvoraussetzung für die Arbeit in der Smart Factory. Der Werker wird dadurch laufend mit Informationen versorgt, um Entscheidungen lokal zu treffen und somit immer mehr Verantwortung zu übernehmen. Eine wichtige Anforderung dabei ist, dass der Werker sich selbständig zusätzliche Informationen beschafft, welche er für die Ausführung seiner Arbeit benötigt. Durch die Automatisierung werden bisherige monotone Arbeiten durch kognitive Aufgaben, wie das Lösen von auftretenden Problemen, ersetzt. Dadurch, dass sich die Fertigungsanlagen nach Anforderung aus dem Produktmix verändern können, sind Instandhalter auf informationstechnische Hilfsmittel angewiesen. VR- und AR- können zur nutzvollen Anwendung gebracht werden. Sie können den Instandhalter an den Fehlerort führen, Sie können ihm auf dem visuellen Wahrnehmungskanal jedwede Zustandsgrösse der Maschine / Anlage oder Komponente in beliebigem Detaillierungsgrad und deren Historie anzeigen.

Schichtführer sind an einem Überblick über die gesamte Fertigungsanlagen interessiert. Auch sie können über VR die Maschinenzustände an jeder Stelle der Fabrik wie eine Art 7. Sinn für Problemzonen über optische Aufbereitung der Daten aus unter-

schiedlichsten Quellen ausgestattet werden. Hände frei und intuitive Bedienung der Interaktion sind die wesentlichen Anforderungen für alle drei Funktionsgruppen.



Fig. 3: Cyberphysische Individuen (CPI) bei der Arbeit

Die Jugend von heute und damit die Arbeitskräfte der Zukunft sind gewohnt, intuitiv mit Internettechnologien umzugehen, wie beispielhaft Fig. 3 zeigen soll. Sie haben in den meisten Fällen einen digitalen Schatten und sind also cyberphysische Individuen (CPI). Es liegt daher nahe, deren wichtigstes Interaktionsgerät, das Smartphone neben VR-Datenbrillen (Wearables) auch im industriellen Umfeld zu nutzen. Smartphones sind kostengünstigste Multifunktionsgeräte, kostengünstig aufgrund der gigantischen Stückzahlen, mit denen sie gefertigt werden. Der Consumerbereich treibt hier die Entwicklung und die industriellen Anwendungen können diese nutzen und davon profitieren. Ausgestattet mit GPS, Kamera, Lasersensorik, Beschleunigungsaufnehmern, Near Field Communication (NFC), Bluetooth, wireless LAN, Temperaturmessung, Magnetfeldmessung, Mikrophon, Auswertesoftware wie QR-Code-Leser, Bilddatenverarbeitung etc. erfüllen Sie eigentlich alle Anforderungen, die eine Kommunikationskonsole im industriellen Umfeld benötigt. Hinzu kommt, dass durch die App-Struktur jede beliebige Person Applikationen, die diese Sensordaten auswerten, verknüpfen, visualisieren erstellen und lizensieren kann. Die gesamte Welt kommt als Entwicklungsabteilung für Applikationen in Frage. Fig. 4 zeigt eine typische Situation zur Zustandsanalyse einer Fertigungsstation.



Fig. 4: Smartphone im Einsatz als Kommunikationskonsole zur Zustandsanalyse einer Fertigungseinrichtung nach Fraunhofer Gesellschaft, IAO



Fig. 5: kostengünstigen Optik oben zur Konvertierung eines Smartphones in ein Headset. Unten: 3-D-Umfeld der Laborhalle des IVF in Zürich wie über den Headset erlebbar.

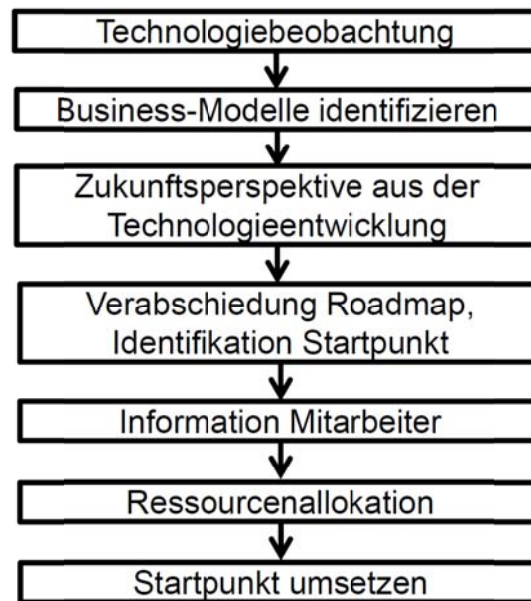
Sie können sogar wie Fig. 5 zeigt, mit wenig Aufwand in ein Headset umgewandelt werden, um virtuelle Umgebungen erlebbar zu machen. Mit Hilfe der Sensorausstattung gelingt die Navigation in der 3-dimensional aufgebauten Produktionsumgebung. Aktuelle

Forschung [18] generiert Technologien, bei denen die Navigation in virtuellen Umgebungen durch tatsächliches Gehen erfolgt. Hierbei muss der Bediener getrackt werden. Diese Tracking Systeme werden sich zukünftig sicher noch vereinfachen und ebenfalls in die Funktionalität des Smartphones integrieren lassen.

## 6. Umsetzungsbeispiele

Unter dem Gesichtspunkt der konsequenten Nutzung von Internet- oder Kommunikationstechnologien im industriellen Leistungserstellungsprozess existieren Beispiele, die zwei Dekaden in die Vergangenheit zurückreichen und erheblichen Nutzen gebracht haben, allen voran Ferndiagnose und Fernwartung.

Allerdings existiert im industriellen Kontext derzeit noch kein ganzheitlicher Ansatz zur Umsetzung der Vision der Smart Factory. Dies liegt vor allem daran, dass die theoretischen Nutzen auf hohen Abstraktionsebenen formuliert sind und auf der Anwendungsebene nicht sofort im gleichen Maße nachgewiesen können. Darüber hinaus gelingt bei laufendem Betrieb sowieso keine direkte Umschaltung zwischen beiden Konzepten. Es müssen Geschäftsmodelle erarbeitet, Datensammler angelegt werden, es muss die Datenweitzernutzung geplant werden und es braucht einen Datenbestand. Als industrielle Vorgehensweise hat sich daher die Implementierung von Insellösungen durchgesetzt, die leider oft weit davon entfernt sind, den vollen Nutzen einer Industrie 4.0 Umgebung zu liefern. Genau diese Situation erzwingt, dass die Transition sorgfältig geplant sein muss. Dabei werden notwendigerweise Zustände auftreten, die zu nutzenfreiem Mehraufwand führen. Umsetzungsmodelle sehen daher gemäß Fig. 6 vor, zuerst die angestrebten Geschäftsmodelle und Nutzenszenarien zu definieren, Ein sorgfältiges Technologiescreening ist dazu unabdingbar. Unter Einbezug der rasanten technologischen Entwicklung werden sodann die zum Zeitpunkt der Realisierung verfügbaren Technologien abgeschätzt. Und natürlich startet jede Umsetzung bei den „low hanging fruits“, Möglichkeiten des Einsatzes, die als Insellösung bereits wirtschaftliche Erfolge erzielen.



Figur 6: Umsetzungsmodell Industrie 4.0

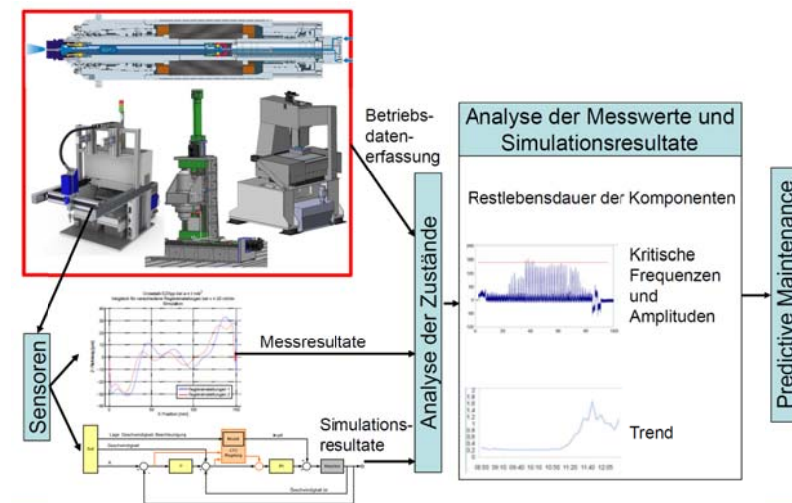
Die wirklichen Vorteile digitalisierten Fertigung können in einem ersten Implementierungsschritt aus Kostengründen nicht beurteilt werden, da die Skalierung der Piloten vor allem für produzierende Großunternehmen sehr kostenintensiv ist. Hier werden simulationsbasierte Validierungen der Ansätze der Industrie 4.0 benötigt, um große Investitionen zur flächendeckenden Umsetzung begründen zu können. Beispielsweise bedarf es einen Nachweis der Wirtschaftlichkeit von dezentral gesteuerten Fertigungssystemen, in denen Anlagen räumlich verteilt sind und verschiedene Varianten auf individuellen Materialflusspfaden produziert werden können. Wie von Bochmann et al. [12] gezeigt, existieren in der Forschung erste high-level Ansätze zur ganzheitlichen Simulation. Für die Industrie müssen jedoch Modelle realer Anlagen und Maschinen mit deren Eigenschaften und Fähigkeiten in die Simulationsmodelle integriert werden. Dafür werden Modelle der Maschine in Bezug auf die Smart Factory benötigt, welche das Verhalten im vernetzten Verbund wiedergeben, sowie Maschinenausfälle und entsprechende Systemparameter beinhalten. Diese Anlagen- und Maschinenmodelle müssen für ein erfolgreiches Vorantreiben der Industrie 4.0 von den Herstellern entwickelt und zur Verfügung gestellt werden.

Die Herstellung cyberphysischer Systeme erfordert natürlich die Herstellung des physischen Produkts wie auch die Anlage des digitalen Abbilds, digitalen Schattens oder digitalen Zwillings. Idealerweise findet beides zugleich statt, weil Veränderungen in der Fertigung des physischen Produkts dessen digitales Abbild ebenfalls verändern müssen. Grundsätzlich gilt für die Erzeugung des digitalen Abbilds, dass dies nicht in separaten Prozessschritten sondern unmittelbar in der realen Leistungserstellung erfolgen muss, um lästige Zusatzaufwendungen zu vermeiden. Daher erscheint gerade in der Produktionstechnik die Ausnutzung von Kommunikationstechnologien zwischen dem Produkt und der Fertigungsanlage interessant. Somit ist die erste Aufgabe zur Herstellung eines cyberphysischen Produkts die Initialisierung der Kommunikationseinheit, im Falle von Werkzeugmaschinen die Steuerung. Im weiteren Verlauf von Montage und Inbetriebnahme der Maschine wird Prozessschritt für Prozessschritt das digitale Abbild ebenfalls hochgefahren. Notwendig ist dazu auch, dass die Daten zur Erzeugung des Produkts, z.B. die Arbeitsplanung als Datenmodell der Fertigungsplanung bereits vorliegen.

1.) Predictive Maintenance gemäss Fig. 7 gilt im Maschinen- und Anlagenbau als gutes Einstiegsszenario für Industrie 4.0, welches ganz klassisch aufgebaut ist. Datensammler ist die zu definierende Sensorik an der Maschine, womit sämtliche datengenerierenden Elemente gemeint sind, allem voran die Steuerung, die im Mikrosekundentakt Daten generiert, die bei geeigneter Auswertung sehr feinfühlig Informationen z.B. über Zustände von Werkzeugmaschinenachsen liefern können. Die Anzahl der bis zum Erreichen der Sollage nötigen Iterationen sagt z.B. etwas über den Verschleisszustand der Achse aus. Die Auswertung der Daten stellt in dem Fall ein Lebensdauermodell dar, welches aus den gesammelten Daten Rückschlüsse auf die Restlebensdauer zulässt. Das Lebensdauermodell kann physikalische Wurzeln haben, wobei heute nur für wenige Komponenten und vereinfachte Lastfälle zuverlässige Lebensdauermodelle existieren. Solche Lebensdauermodelle brauchen trotz ihrer physikalischen Basis idR. erheblichen Erfahrungshintergrund. Somit liegt nahe direkte Datenreihenanalysen (Pattern recognition) zu nutzen, um darin Muster für Ausfallszenarien von den ersten Anzeichen aus zu identifizieren. Für Werkzeugmaschinen-spindeln funktioniert dies, da dort wenige ausfallabhängige Komponenten immer in ähnlicher Weise belastet werden. Speziell im Anlagenbau reicht aber die Menge der Anwendungsfälle nicht aus, um in nützlicher Frist eine verwertbare

## Industrie 4.0 für den Maschinen- und Anlagenbau

Datenbasis aus der vorhandenen Maschinenpopulation abzuleiten. Sinnvolles Vorgehen wäre daher beide Ansätze zu nutzen und mit Hilfe physikalischer Modelle Daten aus verschiedenen Anwendungsfällen vergleichbar und damit auswertbar zu machen. Bleibt die Frage nach dem Geschäftsmodell, welches auf den ersten Blick verlockend aussieht, weil unmittelbar klar ist, dass zwischen unkalkulierbarer Instandhaltung nach Ausfall und teurer und ressourcenverschwendender vorbeugender Instandhaltung die prädiktive Instandhaltung das Optimum verspricht. Maschinenbetreiber haben aber typischerweise eine Aversionshaltung gegen automatisches Datenlogging, und ohne deren Mithilfe funktioniert dieses Geschäftsmodell eben nicht. Erfolgsrelevant für das Geschäft mit den Daten ist, dass empfundene Vor- und Nachteile sich bei jedem Teilnehmer an diesem Geschäftsmodell die Waage halten.

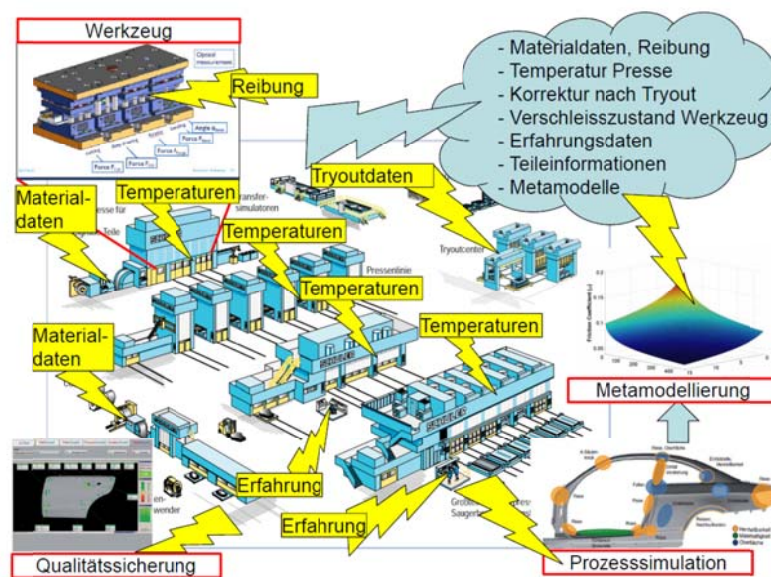


Figur 7: Prädiktive Instandhaltung

2.) In der Industrie sind vielfach Szenarien realisiert, bei denen Materialdaten der Rohmaterialien kontinuierlich im Zuführprozess erhoben werden und zur Einstellung der Maschinen der Fertigungslinie herangezogen werden. Dies ist aber vielfach nur unter Zuhilfenahme von Prozessmodellen möglich, die zur Auslegung der Prozesse erstellt worden sind. Fig. 8 zeigt als Beispiel aus der Umformtechnik das von Hora et al. [14] entwickelte Q-Guard Konzept, bei dem mit Hilfe eines Wirbelstromsensors die Daten des in die Pressenanlage einlaufenden Bleches gemessen werden. Um Einfallstellen und Risse bei schwankenden Materialdaten zu vermeiden, wird mit den gemessenen Daten ein neues Prozessfenster



gesucht, wozu ein Prozessmodell eingesetzt wird, Um für die Optimierung Rechenzeit zu sparen, dient als Prozessmodell ein aus der FEM-Prozesssimulation abgeleitetes Metamodell, welches ausserdem Erfahrungen mit berücksichtigen kann. Allerdings spielen auch Verschleisszustand des Werkzeugs und thermische Dehnung der Presse eine Rolle, die ebenfalls mittels geeigneter Sensoren erfasst und in die Optimierung einbezogen werden.

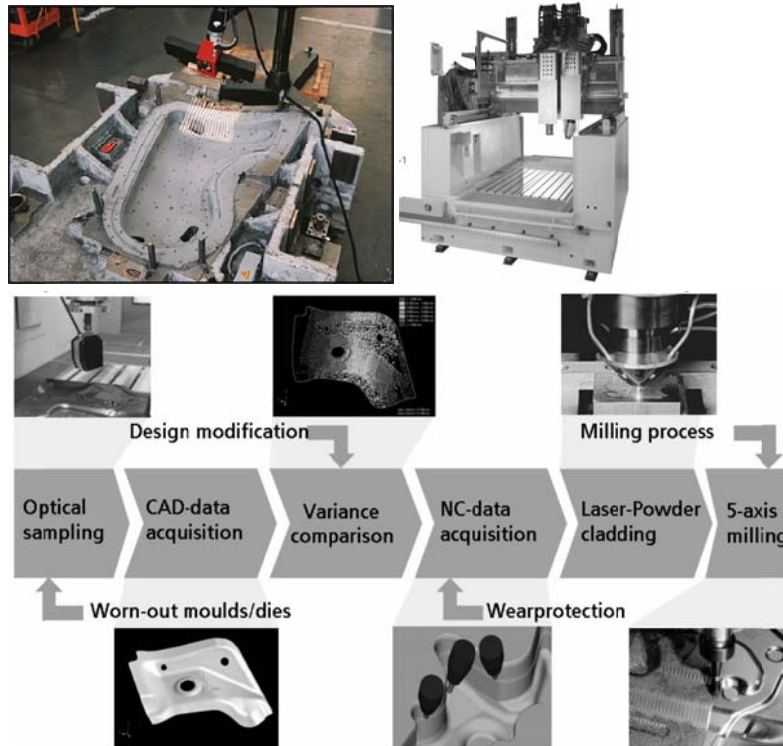


Figur 8: Darstellung des Q-Guard System frei nach Hora [14]: Vernetzung Daten aus Konstruktion, Qualitätssicherung und Presswerk

3.) Fig. 9 zeigt als weiteres Szenario die automatisierte Rearatur von Verschleisstteilen am Beispiel von Umformwerkzeugen. Die Sensorik, die den Anfangszustand aufnimmt, ist in diesem Fall z.B. eine Streifenlichtprojektionsanlage, welche die 3-dimensionale Istgeometrie des Werkzeugs aufnimmt. Der Vergleich mit dem CAD-Modell definiert die Aufgabe. Ggf. werden weitere Informationen benötigt, z.B. Rissdetektion, um ein umfassendes Bild des Verschleisses zu haben. Daraus wird regelbasiert das Ausfräsen bzw. Ausschleifen von tieferen Fehlstellen vorgenommen, die Auftragsstrategie erzeugt und das anschliessende CNC-Schlichtbearbeitungsprogramm durch Fräsen oder Schleifen erzeugt, um die Sollgeometrie wieder herzustellen. Ggf. braucht es zusätzlich noch die Informationen aus dem Eintouchieren des

## Industrie 4.0 für den Maschinen- und Anlagenbau

Werkzeugs, um automatisch ein unmittelbar einsatzfähiges Werkzeug zu generieren. Letzteres ist in Fig. 9 nicht dargestellt



Figur 9: Automatisierte adaptive Reparatur von Umformwerkzeugen. Links oben Zustandserfassung mittels Streifenlichtprojektion, rechts oben Kombianlage zum Laserauftragen und Fräsen (OproRep), unten Prozesskette; nach Bichmann et al. [15].

4.) In der Waferfertigung die exemplarisch in Fig. 10 gezeigt ist, lässt sich der Fertigstellungsgrad des Wafers nicht erkennen. Hier sind Industrie 4.0-Ansätze, nämlich Fertigungssteuerung durch das Produkt schon länger üblich. Einzelne Wafer sind identifiziert und ihre Historie, d.h. welche Prozessschritte bereits abgelaufen sind, sind damit in einem zentralen Datenspeicher hinterlegt, können aber überall und jederzeit abgerufen werden. Durch Informationen zu z.B. Fehlstellen, Abweichungen werden digitale Schatten des Wafers angelegt und können wiederum dazu verwendet werden die weitere Prozesskette zu steuern.



Figur 10: Produktionslinie zur Waferfertigung.

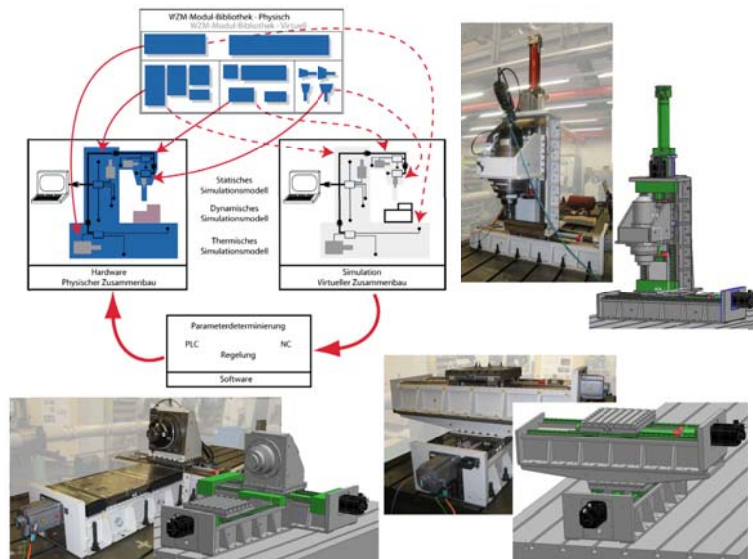
5.) Fig 11 zeigt ein visionäres Fertigungsszenario zum Thema „Produkt steuert seine Produktion“, welches von der Volkswagen AG initiiert wurde und unter dem Namen SMARTFACE läuft. Da nicht alle Fertigungsschritte an einem Fahrzeug in strenger Sequenz ablaufen müssen, sondern immer noch 70% Reihenfolgeflexibilität möglich ist, können zumindest Kleinserienfahrzeuge in flexibler Fertigungssequenz gefertigt werden. Wie oben schon geschildert, kann das digitale Abbild des Fahrzeugs in dessen Steuerung oder in dem Transportsystem initialisiert werden, welches das Fahrzeug von Fertigungsstation zu Fertigungsstation fährt und dabei sowohl im Realen wie im Virtuellen komplettiert wird. Die damit sich automatisch entwickelnde Prozesskette kann somit für jedes Fahrzeug an die Verfügbarkeit der Fertigungseinheiten angepasst und darüber die Durchlaufzeit optimiert werden.

In einem zweiten Schritt kann sich die Anordnung der Fertigungsstationen nach Massgabe des aktuell zu fahrenden Variantenmixes anpassen. Damit stellt sich die Frage, wie denn Menschen, z.B. Bedien- oder Instandhaltungspersonal mit einer sich beständig wandelnden Fertigungseinrichtung umgehen können. Die Lösung hierzu sind VR/AR-Technologien, die damit erforderlich werden, um dem Menschen die Navigation in dieser Umgebung zu ermöglichen.



Figur 11: SMARTFACE Visionäres Fertigungsszenario für Kleinserienfahrzeuge [16].

6.) In SMARTFACE angesprochen ist die Wandlungsfähigkeit der Fertigungseinrichtungen. Lorenzer [17] liefert eine Realisierungsmöglichkeit für wandlungsfähige Fertigungsanlagen am Beispiel einer zweiachsigen rekonfigurierbaren Maschinenkinematik, die in Fig. 12 gezeigt ist. Dabei können die Komponenten, zwei Linearachsen und ein Spindelstock beliebig zusammengebaut und betrieben werden. Notwendig dazu ist ein digitales Abbild der Einzelkomponenten, die parallel zur realen Montage der Maschine zu einem digitalen Abbild derselben zusammengesetzt werden. Dieses digitale Abbild wird anschliessend dazu verwendet, die Steuerung, z.B. die Reglerparameter die Kalibrierdaten und Kompensationsdaten festzulegen. Mit Hilfe einer einfach erstellten Ladeliste kann die Steuerung vom Bediener konfiguriert werden. Als Industrie 4.0 Szenario bekommt die entwickelte Technologie neue Anwendungsmöglichkeiten, indem ein Komponentenlager die Fertigungseinrichtungen automatisch aufgrund der Anforderungen der zu produzierenden Produkte beliefert. Mittels einer Datenbrille kann dem Maschineneinrichter mitgeteilt werden wie die Komponenten zusammenzuschalten sind. Dieses Konzept kann neben der Rekonfigurierung auch zum Umrüsten verwendet werden, wobei die Anforderungen der Interaktion mit der Steuerung deutlich einfacher sind. Aber damit kann die Umrüstung oder Umbau komplizierter Fertigungslinien schnell realisiert werden.



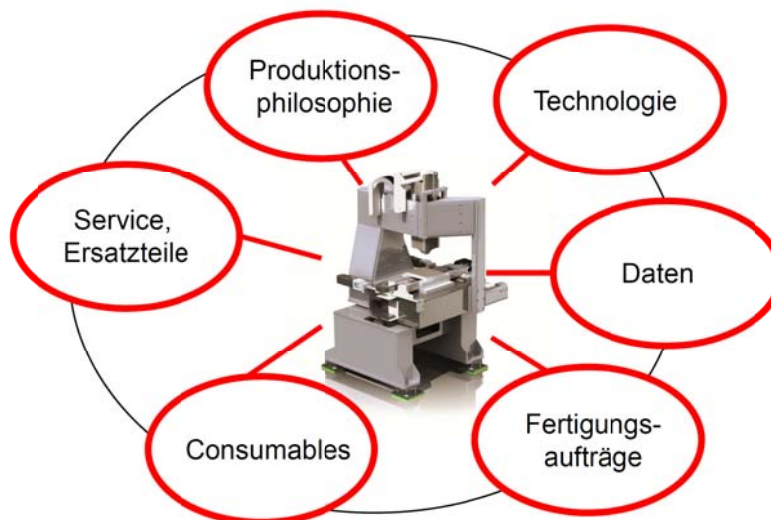
Figur 12: Rekonfiguration einer zweiachsigen Kinematik als Beispiel für wandlungsfähige Fertigungseinrichtungen. Oben links: Konzept der Rekonfiguration, Konfiguration als Fahrständerma-schine, als Kreuzbettmaschine und als Kreutz Tisch jeweils mit digi-talem Abbild [17].

7.) Bei Industrie 4.0 spielt die Datenintegration und damit die Integration verschiedener Teilbereiche eines Unternehmens eine wichtige Rolle. Maschinenhersteller und -betreiber wachsen zusammen. Jede Produktionsmaschine hat gemäss Fig. 13 eine Business-Aura. Diese wird gebildet aus den Möglichkeiten der Kunden-Lieferantenbeziehungen, die sich aus der Maschine ergeben können. Das Service- und Ersatzteilgeschäft ist schon längst als lukratives Geschäftsmodell erkannt. Diese Business-Aura kann durch Internettechnologie deutlich besser zu beiderseitigem Vorteil genutzt werden, weshalb sich hier nicht nur die Maschinenhersteller um die Gunst des Betreibers, sondern auch reine Internetfirmen bewerben. Download neu entwickelter Technologien Updates der Maschinensoftware, können den Gebrauchswert der Maschine, deren wirtschaftliche Lebensdauer deutlich steigern und dienen zur Vereinheitlichung der Softwarelevels im Feld. Für Additive Manufacturing wird z.B. der Handel mit den Consumables, Pulver, Filamente usw. weitgehend über die Maschinenhersteller betrieben. Noch ausgeprägter sind internetbasierte Geschäftsmodelle für das



### Industrie 4.0 für den Maschinen- und Anlagenbau

3-D-Printing, Home-Additive Manufacturing. Dort findet bereits der Maschinenhandel incl. Gebrauchtmaschinenmarkt im Internet statt. Filamentservice, Teileprogramme, Kapazitäts- und Auftragsvermittlung, Tips und Hinweise zum effizienten Anlagenbetrieb, Full-Service-Verträge werden über das Internet gehandelt. Dieser intensivere Kundenkontakt könnte bereits vom Hersteller der Anlagen als eine Datenquelle genutzt werden, um mehr Informationen über den Anlagenbetrieb zu bekommen und so den Kundenservice weiter zu intensivieren. Weitere Möglichkeiten der Kunden-Lieferanteninteraktion wäre z.B. das Recycling von hergestellten Teilen bzw. gebrauchtem Pulver aus SLS-Anlagen. Standardisierte Qualitätssicherungsmassnahmen würden das Bild abrunden, die allerdings im Consumer-Bereich nur eine untergeordnete Rolle spielen, allerdings sehr wohl spannend werden für industrielles Additive Manufacturing. Hier könnten auch Materialdatenbanken bzw. Prozessfensterdaten und Prüfkapazität sowie die Finishing-Verfahren zur Komplettierung der Prozesskette über das Internet bereitgestellt resp. angeboten werden.



Figur 13: Geschäftsaura einer Werkzeugmaschine

8.) Der Einsatz von virtuellen sowie physischen Assistenzsystemen stellt wie in Abschnitt 5 erwähnt durch die Möglichkeit der Nutzung, Kombination und Visualisierung verschiedenster Datenquellen ein sehr mächtiges Werkzeug mit hohem Nutzwert dar, wird derzeit in der Industrie aber nur lokal pilotiert. Als virtuelles Assistenzsystem

werden Datenbrillen zur Kommissionierung eingesetzt. Das primäre Ziel hierbei ist die Sensibilisierung der Mitarbeiter für den Einsatz moderner Technologien. Die Bewertbarkeit des Nutzens der gesteigerten Informationsverfügbarkeit ist schwer nachweisbar, da diese Systeme bei gleichbleibender Fertigungsaufgabe und -organisation eingesetzt werden. Die theoretischen Nutzen wurden jedoch für zukünftige Fertigungsszenarien formuliert. Ebenfalls die physischen Assistenzsysteme, wie am Beispiel der Mensch-Roboter-Kollaboration erkennbar, werden derzeit nur lokal implementiert. Maschinenbediener und Schichtführer wären z.B. in der Lage, sich die Auslastungs- und Produktionsdaten der gesamten Fertigungsanlage anzusehen und könnten so den Personaleinsatz, viel gezielter planen. Der Einsatz in einem isolierten Takt kann jedoch nicht zu der durch Industrie 4.0 prognostizierten Verbesserung führen, da keine intelligente und globale Optimierung stattfinden kann in der getakteten Fließfertigung der ineffizienteste Takt maßgebend ist.

Auch die Instandhaltung könnte durch die Nutzung einer unternehmensweiten Datenbasis mit abgelegten Erfahrungsdaten zusammen mit Visualisierungstechnik der Maschinenzustände über VR viel schneller zum Ziel kommen, was Maschinenstillstände MTTR (Mean Time To Repair) deutlich reduziert. Bei grossen Installationen mit vielen Maschinen dürfte bereits unternehmensintern die Datenbasis für eine prädiktive Instandhaltung aufbaubar sein, ohne sich der Problematik der Datenlieferung an einen Maschinenhersteller auszuliefern.

## 7. Zusammenfassung

Industrie 4.0 stellt gemäss dem Konzept der Leittechnologien pro Entwicklungsstufe wie von Kagermann et al. [13] entworfen die konsequente Nutzung der sich in jüngster Zeit rasant entwickelnden Internettechnologien für die industrielle Leistungserstellung in den Vordergrund. Im Sinne der Wettbewerbsfähigkeit ist es unsinnig, sich dieser Technologie zu verschliessen. Industrie 4.0 wird seine Spuren in der Industrielandschaft hinterlassen und eine recht gründliche Veränderung des Produktionsprozesses aber auch des gesamten wirtschaftlichen Lebens verursachen. Die Wurzeln von Industrie 4.0 liegen mindestens 20 Jahre zurück, es ist daher nicht völlig neu und auch nicht wie oft behauptet altes Zeug mit neuem Namen. Die Integration von Datenquellen zu einem Datenbestand und die bedarfsgerechte und anforderungsbezogene Auswertung

daraus zur Erzeugung neuer Erkenntnisse ist der Treiber hinter der Entwicklung und eröffnet völlig neue Dimensionen und verbindet Leistungsbereiche eines Unternehmens, die bisher kaum miteinander zu tun hatten, wie z.B. recht prominent die Verknüpfung zwischen Geschäftsmodellen und Technik. Da Industrie 4.0 bei laufendem Betrieb gleitend eingeführt werden muss, werden Zwischenzustände entstehen müssen, die nicht optimal sind. Ein integraler Entwicklungsprozess und ein Vorgehensmodell für die Umsetzung von Industrie 4.0 muss sich jedes Industrieunternehmen erarbeiten, wobei der langfristige Nutzen im Vordergrund steht. Industrie 4.0 verbessert die Wettbewerbsfähigkeit rationalisiert Vorgänge und schafft neue Businessmodelle, vergrößert den Operationsrahmen eines Unternehmens. Unternehmen müssen sich zum Erhalt ihrer Entwicklungsfähigkeit mit Internettechnologien auseinandersetzen, wie sie sich in alter Zeit um die Erweiterungsmöglichkeiten in Grund und Boden gekümmert haben. Die Workforce wie auch die Kundschaft der Zukunft besteht aus cyberphysischen Individuen, was bedingt, dass vermehrt internetbasierte Geschäftsmodelle wie auch internetgestützte Fertigungstechnologien sowie deren Verbindung Realität werden. Datenbeherrschung und Daten sind das Gold des 21. Jahrhunderts.

## 8. Referenzen

- [1] Koren, Y., 2010: Design of reconfigurable manufacturing systems, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 29, pp. 130 - 141
- [2] Industrie 4.0. Plattform, 2015: Available from: [URL:http://www.plattform-i40.de](http://www.plattform-i40.de), 20.07.2016
- [3] Bauernhansl, T., 2014: Die Vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma, in: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B., 2014: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 5 - 36
- [4] Bochmann, L., Gehrke, L., Böckenkamp, A., Weichert, F., Albersmann, R., Prasse, C., Mertens, C., Motta, M., Wegener, K., 2015: Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs, International Journal of Automation Technology 9 (3), pp. 270 - 282
- [5] Salah, K., Ismail, Y., El-Rouby, A. 2014: Arbitrary Modeling of TSVs for 3D Integrated Circuits, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-319-07610-2



- [6] Brynjolfsson, E., McAfee, A., 2014: Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies, Norton & Company
- [7] Vogel-Heuser, B., 2014: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik, in: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B., 2014: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 37 - 47
- [8] Hoppe, S., 2014: Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick, in: Bauernhansl, T., ten Hompel, M., Vogel-Heuser, B., 2014: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer Fachmedien Wiesbaden, pp. 325 - 342
- [9] Fraunhofer Institut für sichere Informationstechnologien (SIT), 2016: Trusted Core Network – Hardwarebasierte Sicherheit für Industrielle IT-Netze, [https://www.sit.fraunhofer.de/fileadmin/dokumente/Projektblaetter/Trusted\\_Core\\_Network\\_DE\\_FraunhoferSIT.pdf](https://www.sit.fraunhofer.de/fileadmin/dokumente/Projektblaetter/Trusted_Core_Network_DE_FraunhoferSIT.pdf), 20.07.2016
- [10] Gartner: Big Data, <http://www.gartner.com/it-glossary/big-data/>, 20.07.2016
- [11] Krüger, J., Lien, T. K., Verl, A., 2009: Cooperation of humans and machines in assembly lines, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 58, pp. 628 – 646
- [12] Bochmann, L., Bänziger, T., Kunz, A., Wegener, K., 2016: Human-Robot Collaboration in Decentralized Manufacturing Systems: An Approach for Simulation-based Evaluation of Future Intelligent Production, Procedia CIRP International Conference in Intelligent Computing in Manufacturing Engineering 2016, in press
- [13] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., 2012: Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Hrsg: Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft.
- [14] Hora, P., Heingärtner, J., Manopulo, N., 2012: New Software Concepts for an Integral In-Line Quality Control in Sheet Metal Forming, Numisheet 2012, [www.researchgate.net/publication/273318371](http://www.researchgate.net/publication/273318371), pp. 1-7.
- [15] Bichmann, S., Groll, K., Emonts, M.G., Glasmacher, L., Kordt, M., Brecher, C. 2005: Automatisierte Reparaturzelle „Opto-

Rep“: Komplettbearbeitung für den Werkzeug- und Formenbau, wt Werkstattstechnik online 95, pp. 831-838.

- [16] SMART FACE, Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung <http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/243-smart-face-smart-micro-factory-fuer-elektrofahrzeuge-mit-schlanker-produktionsplanung/beitrag-smart-face-smart-micro-factory-fuer-elektrofahrzeuge-mit-schlanker-produktionsplanung.html> 15.06.2016.
- [17] Lorenzer, T., 2010: Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen, Dissertation Nr. 19208, ETH Zürich.
- [18] Nescher, T. 2014: Immersive Virtual Environments Allowing Optimal Free Walking Experience in a Limited Physical Space, Dissertation Nr. 22190, ETH Zürich.