



Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern

# UMSETZUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DAS ZUKUNFTSPROJEKT INDUSTRIE 4.0

## Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0

Vorabversion

Berlin 2. Oktober 2012

**Forschungsunion**

Wirtschaft und Wissenschaft

Promotorengruppe KOMMUNIKATION

Prof. Dr. Henning Kagermann, acatech  
(Sprecher der Promotorengruppe)

Prof. Dr. Wolfgang Wahlster, DFKI

Dr. Johannes Helbig, Deutsche Post DHL

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft:  
Prof. Dr. Henning Kagermann,  
acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (Sprecher der Promotorengruppe)  
Prof. Dr. Wolfgang Wahlster,  
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH  
Dr. Johannes Helbig,  
Deutsche Post AG

### **Redaktion**

Ariane Hellinger, M.A.,  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

### **Lektorat**

Linda Tönskötter, M.A.  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

### **Layout & Satz**

spiegelgrafik.com

### **Grafiken**

heilmeyerundsernau.com  
isotype.com

### **Kontakt**

Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft,  
Ulrike Findekle, M.A.  
Tel.: 030/322982507  
E-Mail: [ulrike.findekle@stifterverband.de](mailto:ulrike.findekle@stifterverband.de)

### **Vertrieb**

Büro der Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.  
Pariser Platz 6, 10117 Berlin  
E-Mail: [bueroderforschungsunion@stifterverband.de](mailto:bueroderforschungsunion@stifterverband.de)

Im Internet unter [www.forschungsunion.de](http://www.forschungsunion.de)  
Erscheinungstermin: Oktober 2012

© Copyright liegt bei dem Herausgeber. Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.

---

Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern

# UMSETZUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DAS ZUKUNFTSPROJEKT INDUSTRIE 4.0

Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0

Vorabversion

Berlin 2. Oktober 2012

**Forschungsunion**

**Wirtschaft und Wissenschaft**

**Promotorengruppe KOMMUNIKATION**

**Prof. Dr. Henning Kagermann**, acatech  
(Sprecher der Promotorengruppe)

**Prof. Dr. Wolfgang Wahlster**, DFKI

**Dr. Johannes Helbig**, Deutsche Post DHL

# EXECUTIVE SUMMARY

Deutschland ist spezialisiert auf die Erforschung, Entwicklung und Fertigung von Produktionstechnologien und der führende Fabrikarüster der Welt. Auch im eigenen Land setzen die Deutschen konsequent auf ihre Industrieproduktion und innovative Technologien. So bildet das produzierende Gewerbe mit einem Handelsüberschuss von mehr als 100 Milliarden Euro im Jahr 2011 das Rückgrat der deutschen Wirtschaft.

Der globale Wettbewerb in der Produktionstechnik nimmt zu. Konkurrenten aus Asien setzen die heimische Industrie unter Druck. Zugleich wird die industrielle Produktion immer dynamischer und komplexer. In Zukunft muss die Industrie zunehmend individuelle, leistungsfähigere Produkte zu gleichbleibenden Preisen fertigen, um den veränderten Ansprüchen des Marktes zu genügen.

Neben diesen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen sieht sich die deutsche Industrieproduktion auch einem technischen Meilenstein gegenüber: Sie steht vor einer vierten industriellen Revolution, die durch das **Internet der Dinge und Dienste** in Gang gesetzt wurde, also autonome eingebettete Systeme, die drahtlos untereinander und mit dem Internet vernetzt sind. In der Produktion entstehen sogenannte *Cyber-Physical **Production Systems (CPPS)*** mit intelligenten Maschinen, Lagersystemen und Betriebsmitteln, die eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich gegenseitig selbstständig steuern. Sie können industrielle Prozesse in der Produktion, dem *Engineering*, der Materialverwendung sowie des Lieferketten- und Lebenszyklusmanagements enorm verbessern.

CPPS schaffen *Smart Factories*, der Inbegriff des Zukunftsjekts **Industrie 4.0**. In der **Smart Factory** herrscht eine völlig neue Produktionslogik: Die Produkte sind eindeutig identifizierbar, jederzeit lokalisierbar und kennen ihre Historie, den aktuellen Zustand sowie alternative Wege zum Zielzustand. Die eingebetteten Produktionssysteme sind vertikal mit betriebswirtschaftlichen Prozessen in Fabriken und Unternehmen vernetzt und horizontal zu verteilen, in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzwerken verknüpft – von der Bestellung bis zur Lieferung. Gleichzeitig ermöglichen und erfordern sie ein durchgängiges *Engineering* über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts einschließlich seines Produktionssystems hinweg.

Im Mittelpunkt der Industrie 4.0 steht der Mensch (Beschäftigte, Management, Zulieferer, Kunden), der seine Fähigkeiten mittels technischer Unterstützung erweitert und so in der *Smart Factory* zum „kreativen Schöpfer“ und vom reinen „Bediener“ zum Steuernden und Regulierenden wird. Die neue Produktion erfordert eine Beherrschung der zunehmenden Komplexität und ein hohes Maß an selbstverantwortlicher Autonomie und dezentrale Führungs- und Steuerungsformen sowie eine neue, kollaborative Arbeitsorganisation.

**Industrie 4.0 adressiert alle großen Herausforderungen** – die Wettbewerbsfähigkeit unseres Hochlohn-Standorts, die Schaffung von Ressourcen- und Energieeffizienz, den demografischen Wandel und die Frage der urbanen Produktion.

Will Deutschland seine Führungsposition in der Produktionstechnik halten und ausbauen, ist aufgrund des engen Zeitfensters eine schnelle Reaktion der Beteiligten aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, Gewerkschaften und Zivilgesellschaft geboten.

Die Einführung von CPPS ist notwendig, um die Zukunftsfähigkeit des deutschen Produktionsstandortes zu sichern und Arbeitsplätze zu erhalten. Die deutsche Industrie hat damit die Chance, als Erste das Internet der Dinge und Dienste für eine vierte industrielle Revolution zu nutzen und die Chancen intelligenter Produktionssysteme auszuschöpfen. Die *Smart Factory* beherrscht Komplexität, ist weniger störanfällig und steigert die Effizienz der Produktion. Sie bietet auf höchstem Produktivitäts- und Qualitätsniveau eine signifikant höhere Flexibilität und Robustheit bei optimalem Ressourceneinsatz.

Damit die Transformation der industriellen Produktion hin zur Industrie 4.0 gelingt, sollte Deutschland eine duale Strategie verfolgen: Die deutsche Ausrüsterindustrie soll weiterhin führend auf dem Weltmarkt bleiben, indem sie zum Leitanbieter für intelligente Produktionstechnologien wird. Gleichzeitig gilt es, neue Leitmärkte für CPPS zu gestalten und zu bedienen. Um diese Ziele der dualen CPPS-Strategie zu erreichen, sind folgende Charakteristika der Industrie 4.0 verwirklichen:

- **Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke**
- **Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme**
- **Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus**

Der Weg zur Industrie 4.0 erfordert in Deutschland einige Anstrengungen in Forschung und Entwicklung. Um die duale Strategie umsetzen zu können, besteht **Forschungsbedarf** zu der horizontalen und vertikalen Integration von Produktionssystemen sowie zur Durchgängigkeit des *Engineerings*. Darüber hinaus sind die Beschäftigten und Akteure (Kunden, Zulieferer, etc.) in Kooperation mit Industrie 4.0-Systemen in den FOKUS zu nehmen und es sind Technologien zu CPPS weiterzuentwickeln.

Mit der Fortentwicklung von CPPS sind nicht nur technische, methodische und fachliche Herausforderungen für Forschung und Entwicklung verbunden. Das Entstehen einer Industrie 4.0 hat auch **Auswirkungen auf die Wirtschaft und die Gesellschaft**, die in die neuen Systeme eingebunden ist. So muss Deutschland branchenübergreifend gemeinsame Normen und Standards sowie geeignete Referenzarchitekturen anstreben und eine bestehende Infrastruktur für Informations-, Produktions- und Kommunikationstechnik anpassen und modernisieren. Es gilt, Sicherheitsaspekte zu beachten und *Know-how* zu schützen. Gleichzeitig ist eine innovative betriebliche Arbeitsorganisation sowie die Qualifizierung und Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten erforderlich. Nur so kann Deutschland seine Marktposition bei innovativen Produktionssystemen festigen und die Chancen der Industrie 4.0 für den eigenen Wirtschaftsstandort nutzen.

# HINTERGRUND UND DANKSAGUNG

Die vorliegenden Umsetzungsempfehlungen sind der Abschlussbericht des im Januar 2012 eingesetzten Arbeitskreises Industrie 4.0 unter Vorsitz von Dr. Siegfried Dais (Robert-Bosch GmbH) und Prof. Henning Kagermann (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften). Der Arbeitskreis wurde durch die Promotorengruppe KOMMUNIKATION der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft (FU) Ende 2011 initiiert und dient der Erarbeitung weiterführender strategischer Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.

Als Zukunftsprojekt der Hightech Strategie der Bundesregierung wurde Industrie 4.0 aus der Perspektive der Informations- und Kommunikationstechnologien (Informatik) konzipiert und unter Einbeziehung der Produktionsforschung sowie der Anwender-Industrien weiter entwickelt. Naturgemäß ergeben sich aus der Betrachtungsweise anderer Disziplinen auch andere Akzente und Schwerpunkte für ein Thema; die Frage der Deutungshoheit sollte jedoch den gemeinsamen Konsens zur Relevanz des Themas nicht überlagern. Das vorliegende Dokument versteht sich daher nicht als „der Weisheit letzter Schluss“, sondern als konstruktiver Diskussionsbeitrag zu einem Zukunftsthema, das von branchen- und disziplinübergreifender Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist.

Die Promotoren der Forschungsgruppe KOMMUNIKATION danken insbesondere Herrn Dr. Siegfried Dais und den AG-Sprechern sowie allen Mitgliedern des Arbeitskreises, dem Redaktionsteam und allen weiteren Autoren für ihr Engagement, ihre Beiträge sowie die wichtigen Anregungen und Kommentare.

## MITGLIEDER DES ARBEITSKREISES | AUTOREN

### Vorsitzende

Dr. Siegfried Dais, Robert-Bosch GmbH  
Prof. Dr. Henning Kagermann, acatech

### AG-Sprecher

AG 1 – Die *Smart Factory* | Dr. Manfred Wittenstein,  
WITTENSTEIN AG  
AG 2 – Das reale Umfeld | Prof. Dr. Siegfried Russwurm,  
Siemens AG  
AG 3 – Das wirtschaftliche Umfeld | Dr. Stephan Fischer,  
SAP AG  
AG 4 – Mensch und Arbeit | Prof. Dr. Wolfgang Wahlster, DFKI  
AG 5 – Der Faktor Technologie | Dr. Heinz Derenbach,  
Bosch Software Innovations GmbH

### Mitglieder aus der Wirtschaft

Dr. Reinhold Achatz, ThyssenKrupp AG  
Dr. Heinrich Arnold, Deutsche Telekom AG  
Dr. Klaus Dräger, BMW AG  
Dr. Johannes Helbig, Deutsche Post DHL AG  
Dr. Wolfram Jost, Software AG  
Dr. Peter Leibinger, TRUMPF GmbH & Co. KG  
Dr. Thomas Weber, Daimler AG  
Dr. Reinhard Ploss, Infineon Technologies AG  
Volker Smid, Hewlett-Packard GmbH  
Dr. Christian Zeidler, ABB Ltd.

### Mitglieder aus der Wissenschaft

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt  
Prof. Dr. Thomas Bauernhansl, Fraunhofer IPA  
Prof. Dr. Michael Beigl, KIT  
Prof. Dr. Manfred Broy, TU München  
Prof. Dr. Werner Damm, Universität Oldenburg / Offis  
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier, Universität Paderborn  
Prof. Dr. Otthein Herzog, Jacobs Universität Bremen  
Prof. Dr. Fritz Klocke, RWTH Aachen / WZL  
Prof. Dr. Gunther Reinhart, TU München  
Prof. Dr. Bernd Scholz-Reiter, Universität Bremen / BIBA

### Forschungsunion & Verbände

Dr. Karsten Ottenberg, Giesecke & Devrient GmbH  
Prof. Dr. Gisela Lanza, WBK, KIT  
Ingrid Sehrbrock, DGB  
Prof. Dieter Kempf, BITKOM  
Rainer Glatz, VDMA  
Dr. Bernhard Diegner, ZVEI  
Prof. Dr. August Wilhelm Scheer, Scheer Group  
Prof. Dr. Dieter Spath, Fraunhofer IAO  
Dieter Schweer, BDI

### Gäste

Prof. Dr. Wolf-Dieter Lukas, BMBF  
Dr. Clemens Zielonka, BMBF  
Dr. Andreas Goerdeler, BMWi  
Dr. Alexander Tettenborn, BMWi

### Autoren-Kernteam

Mathias Anbuhl, DGB  
Klaus Bauer, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG  
Dr. Dietmar Dengler, DFKI  
Johannes Diemer, Hewlett-Packard GmbH  
Dr. Bernhard Diegner, ZVEI  
Wolfgang Dorst, BITKOM  
Dr. Stefan Ferber, Bosch Software Innovations GmbH  
Rainer Glatz, VDMA  
Dr. Werner Herfs, RWTH Aachen / WZL  
Marion Horstmann, Siemens AG  
Dr. Thomas Kaufmann, Infineon Technologies AG  
Prof. Dr. Uwe Kubach, SAP AG  
Dr. Constanze Kurz, IG Metall  
Dr. Alassane Ndiaye, DFKI  
Steven Peters, WBK, KIT

### Weitere Autoren aus den AGs

Vinay Aggarwal, Deutsche Telekom AG  
Dirk Hilgenberg, BMW AG  
Dr. Gerhard Hammann, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG  
Andreas Haubelt, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG  
Dr. Günter Hörcher, Fraunhofer-Institut IPA  
Ulrich Doll, Homag Holzbearbeitungssysteme GmbH  
Bernd Kärcher, Festo AG & Co. KG  
Jörn Lehmann, VFI  
Dr. Ulrich Löwen, Siemens AG  
Dr. Detlef Pauly, Siemens AG  
Tobias Philipp, IWB  
Dr. Heinz-Jürgen Prokop, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG  
Michael Wetzel, Daimler AG

### Redaktion und Koordination

Ariane Hellinger, acatech  
Udo-Martin Gómez, Robert-Bosch GmbH

|       |                                                                                                                            |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | DAS ZUKUNFTSPROJEKT INDUSTRIE 4.0 –<br>DEUTSCHLAND ALS WETTBEWERBSFÄHIGEN PRODUKTIONSSTANDORT SICHERN .....                | 8  |
| 2.    | INDUSTRIE 4.0 – DIE VIERTE INDUSTRIELLE REVOLUTION GESTALTEN .....                                                         | 10 |
| 2.1   | Innovationsprozesse forcieren, Wertschöpfung erhalten, Beschäftigte einbeziehen .....                                      | 11 |
| 2.2   | Kernelement der Industrie 4.0 – die <i>Smart Factory</i> .....                                                             | 12 |
| 2.2.1 | <i>Use Cases</i> und übergeordnete Merkmale zu Industrie 4.0.....                                                          | 15 |
| 2.3   | Techniktrend Internet der Dinge und Dienste – Chancen und Herausforderungen .....                                          | 18 |
| 2.4   | Die Vision Industrie 4.0 als Teil einer intelligenten, vernetzten Welt .....                                               | 20 |
| 3.    | DUALE STRATEGIE: LEITMARKT UND LEITANBIETERSCHAFT .....                                                                    | 22 |
| 3.1   | Leitanbieterperspektive.....                                                                                               | 22 |
| 3.2   | Leitmarktperspektive.....                                                                                                  | 23 |
| 3.3   | Die duale Strategie (CPPS Strategie) und ihre kennzeichnenden Merkmale.....                                                | 25 |
| 3.3.1 | Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke .....                                                                 | 25 |
| 3.3.2 | Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme .....                                                               | 26 |
| 3.3.3 | Durchgängigkeit des <i>Engineerings</i> über den gesamten Lebenszyklus.....                                                | 26 |
| 4.    | WO LIEGT DER FORSCHUNGSBEDARF? .....                                                                                       | 27 |
| 4.1   | Leitlinien und Struktur der Handlungsempfehlungen .....                                                                    | 27 |
| 4.1.1 | <i>Clustering</i> der Handlungsempfehlungen .....                                                                          | 27 |
| 4.1.2 | Motivation für die mittel- bis langfristige Forschung in Industrie 4.0.....                                                | 28 |
| 4.2   | Konsolidierte Forschungsempfehlungen .....                                                                                 | 29 |
| 4.2.1 | Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke.....                                                                  | 29 |
| 4.2.2 | Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme .....                                                               | 31 |
| 4.2.3 | Durchgängigkeit des <i>Engineerings</i> über den gesamten Lebenszyklus.....                                                | 32 |
| 4.2.4 | Mensch und Arbeit in der Kooperation mit Industrie 4.0-Systemen.....                                                       | 35 |
| 4.2.5 | Technologie <i>Cyber Physical Production Systems (CPPS)</i> .....                                                          | 39 |
| 5.    | HANDLUNGSFELDER UND VORLÄUFIGE UMSETZUNGSEMPFEHLUNGEN .....                                                                | 42 |
| 5.1   | Normen und Standards.....                                                                                                  | 42 |
| 5.1.1 | Umsetzungswege zur Standardisierung eröffnen.....                                                                          | 42 |
| 5.1.2 | Referenzarchitektur Industrie 4.0 als Erfolgsinfrastruktur der Zukunft .....                                               | 43 |
| 5.2   | Revolution der IKT in der Fertigung – eine Infrastruktur für Informations-,<br>Produktions- und Kommunikationstechnik..... | 44 |
| 5.2.1 | Vorhandene Basistechnologien .....                                                                                         | 46 |
| 5.2.2 | Ausbau Breitband-Infrastruktur für Industrie 4.0 .....                                                                     | 47 |
| 5.3   | Security .....                                                                                                             | 48 |
| 5.3.1 | Bedrohungen für industrielle Systeme.....                                                                                  | 48 |
| 5.3.2 | <i>Security</i> -Handlungsfelder.....                                                                                      | 49 |
| 5.3.3 | Produktpiraterie und <i>Know-How</i> -Schutz .....                                                                         | 50 |
| 5.3.4 | Datenschutz .....                                                                                                          | 50 |



|     |                                                                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5 | Mensch-Maschine Interaktion (MMI)–<br>Betriebliche Arbeitsorganisation und Arbeitsgestaltung.....  | 50 |
| 5.5 | Mensch-Maschine Interaktion – Qualifizierung und Aus- und Weiterbildung.....                       | 53 |
| 5.6 | Rechtliche Rahmenbedingungen.....                                                                  | 54 |
| 5.7 | Vorläufige Umsetzungsempfehlungen für die duale Strategie.....                                     | 54 |
|     | 1. Entwicklung von Technologie-Roadmaps und Koordination.....                                      | 54 |
|     | 2. Förderung der konsolidierten Forschungsempfehlungen.....                                        | 54 |
|     | 3. Weiterbildung und Qualifikation .....                                                           | 54 |
|     | 4. Internationalisierung.....                                                                      | 55 |
|     | 5. Einrichtung von Industrie 4.0 Kompetenzzentren .....                                            | 55 |
|     | 6. Aufbau einer Industrie 4.0-Community.....                                                       | 55 |
|     | 7. Aufbau von Demonstrationsfabriken.....                                                          | 55 |
| 6.  | WO STEHEN WIR IM INTERNATIONALEN VERGLEICH? .....                                                  | 56 |
| 7.  | AUSBLICK AB 2013 – WISSENSTRANSFER & COMMUNITY-BUILDING<br>AUF DER „PLATTFORM INDUSTRIE 4.0“ ..... | 57 |
| A.  | ANHANG .....                                                                                       | 59 |
|     | A 1: Die Use Cases Industrie 4.0.....                                                              | 59 |
|     | Use Case 1: Resiliente Fabrik (Quelle Festo).....                                                  | 60 |
|     | Use Case 2: Technologiedaten Marktplatz (Quelle TRUMPF).....                                       | 61 |
|     | Use Case 3: Intelligentes Instandhaltungsmanagement (Quelle wbk) .....                             | 62 |
|     | Use Case 4: Vernetzte Produktion (Quelle iwb) .....                                                | 63 |
|     | Use Case 5: Selbstorganisierende adaptive Logistik (Quelle Daimler) .....                          | 64 |
|     | Use Case 6: Kundenintegriertes Engineering (Quelle IPA).....                                       | 65 |
|     | Use Case 7: Nachhaltigkeit durch Up-Cycling (Quelle IPA).....                                      | 66 |
|     | Use Case 8: Smart Factory Architecture (Quelle IPA).....                                           | 67 |
|     | A 2: Forschungsbedarf entsprechend der Use Cases .....                                             | 68 |
|     | A3: Zusammenfassung der Kernaussagen zur Motivation des Forschungsbedarfs.....                     | 69 |

#### Vorbemerkung

*Alle Personenbezeichnungen in den Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 beziehen sich ungeachtet ihrer grammatikalischen Form auf Männer und Frauen.*

# 1. DAS ZUKUNFTSPROJEKT INDUSTRIE 4.0 – DEUTSCHLAND ALS WETTBEWERBSFÄHIGEN PRODUKTIONSSTANDORT SICHERN

Die deutsche Wirtschaft ist wie keine andere auf die Erforschung, Entwicklung und Fertigung von Produktionstechnologien spezialisiert. In diesem Zusammenhang kommt dem Maschinen- und Anlagenbau mit einem Umsatz von 200,5 Mrd. Euro und rund 931.000 Beschäftigten (Durchschnitt 2011) als Befähiger (Enabler) und Integrator eine besondere Bedeutung für die Wirtschaft zu. Mit 7,8 Millionen direkt Beschäftigten und weiteren 7,1 Millionen indirekt Beschäftigten sowie einem Handelsüberschuss von mehr als 100 Milliarden durch Industrieexporte ist das produzierende Gewerbe das Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Während in den meisten klassischen Industrieländern über viele Jahre ein Trend zur De-Industrialisierung festzustellen war, hat Deutschland konsequent auf seine industrielle Produktionsstärke und innovative Produktionstechnologien gesetzt. Entsprechend hoch ist der Anteil des produzierenden Gewerbes an der gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung (Abb.1).

Deutschland ist es so gelungen, die Anzahl der Beschäftigten im produzierenden Gewerbe in den letzten zehn Jahren weitgehend stabil zu halten und seine Führungsrolle als „Fabrikaurüster der Welt“ zu behaupten. Das deutsche Erfolgsmodell wird inzwischen von anderen Staaten als Vorbild genommen, sei es, um der eigenen De-Industrialisierung entgegenzuwirken oder um Technologiedefizite aufzuholen. Aufgrund dieser Entwicklungen ist mit einer Wettbewerbsverschärfung im Bereich der Produktion und Produktionstechnologien zu rechnen.

Derzeit ist der deutsche Maschinenbau vielfach Treiber von Innovationen in der Produktionstechnik und -ausrüstung. Insbesondere die Nachfrage nach ressourcenschonenden Technologien für eine *Green Economy* bietet Chancen, sich auf globalen Wachstumsmärkten als technischer Wegbereiter für Ressourceneffizienz und innovative Energieversorgungs- und Leichtbautechnologien neu zu positionieren. Der Maschinenbau und die mit ihm verbundenen Partnerbranchen (Zulieferer und Abnehmer) stehen dabei jedoch unter starkem Veränderungsdruck. Die globale Konkurrenz hat insbesondere durch das Auftreten neuer Wettbewerber aus Südostasien erheblich zugenommen. Zugleich wächst der Druck auf die heimische Industrie, ihre Liefer- und Wertschöpfungsstrukturen aber auch die Produkte zu internationalisieren. Die Verlagerung sowohl von Produktions- aber zunehmend auch Entwicklungsfunktionen in die sogenannten BRIC-Staaten (insbesondere China, Indien) ist die Folge – mit Chancen und Risiken für die Innovationsfähigkeit und Beschäftigung an unseren heimischen Standorten.

Die große Chance in diesem globalen Wettbewerb liegt in der Nutzung des Megatrends „Internet der Dinge und Dienste“ (*Internet of Things & Services*): In den vergangenen zwanzig Jahren hat das Internet die Welt erobert und über die Kommunikationstechnologie eine weltweite Vernetzung ermöglicht. Die Auswirkung auf unser tägliches Leben, die disruptiven Marktveränderungen und die dynamische Anpassung unserer sozialen

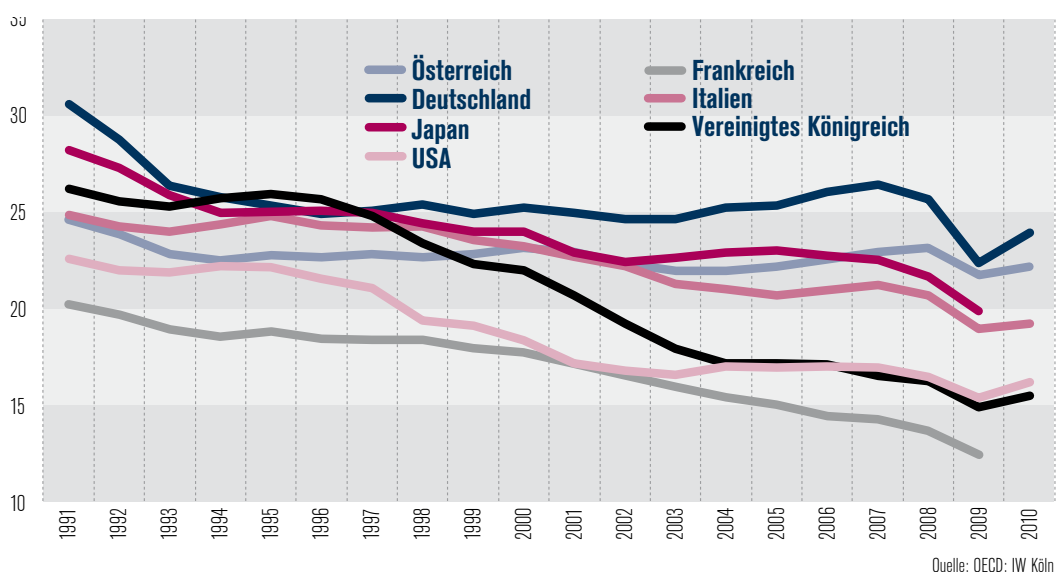


Abb. 1 – Industrieanteile im internationalen Vergleich (1991–2010)

Strukturen beginnen wir gerade erst zu verstehen, da bahnt sich schon die nächste technologische Umwälzung an: das **Internet der Dinge und Dienste** mit neuen Beteiligungsformen und neuen Wertschöpfungsnetzen. Die Leistungsfähigkeit eingebetteter Systeme (*Embedded Systems*) wächst dramatisch mit der Verbesserung von Sensorik und Aktuatorik. Es entstehen zunehmend autonome Systeme, die umfassend Daten über ihr Umfeld erfassen und in vielfältiger Weise darauf reagieren können. Werden diese Systeme drahtlos untereinander und mit den Daten und Diensten des Internets vernetzt, entsteht das Internet der Dinge. Der zweite Trend hin zu IP-basierter drahtloser Vernetzung in die mobile *Sensorcloud* ermöglicht inzwischen zunehmend eine Integration der technischen Prozesse mit den Geschäftsprozessen (s. ausführlich Kapitel 3.3).

Bei diesen so evolutionär entstehenden **Cyber-Physical Systems (CPS)**<sup>1</sup> werden Objekte bis hin zu Alltagsgegenständen durch Programmierbarkeit, Speichervermögen, Sensoren und Kommunikationsfähigkeiten intelligent. Sie können dadurch direkt oder über das Internet durch sogenannte *Machine-to-Machine (M2M)*-Kommunikation eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich wechselseitig steuern. Dies verbessert die Durchführung industrieller Prozesse in der Produktion, dem *Engineering* für die Industrie, der Materialverwendung und des Lieferketten- und Lebenszyklusmanagements enorm und führt so zu einer **neuen Form der Industrialisierung: Industrie 4.0**. Die Cyber Physical Systems für Smart Factories (Intelligente Fabriken) lassen sich auch als **Cyber-Physical Production Systems (CPPS)** bezeichnen.

Zielsetzung des **Zukunftsprojekts Industrie 4.0** ist es nicht nur, CPPS technisch zu ermöglichen, sondern damit auch neue Produkte und Verfahren für den Export zu generieren. Mit diesem Ansatz sollen vier Ziele erreicht werden, damit Deutschland sowohl zum Leitmarkt als auch zum Leitanbieter von CPPS wird:

1. **Die Schaffung neuer Formen der intelligenten Produktionstechnik**, um innovative Produkte für den Weltmarkt generieren zu können und heimische Fabriken ressourceneffizienter und flexibler zu machen
2. **Die Optimierung bestehender und die Erfindung neuer Produkte der Automatisierungstechnik**, um Deutschland in seiner Automatisierungskompetenz einen größeren Wettbewerbsvorteil zu sichern..
3. **Die Standort- und Beschäftigungssicherung durch intelligente Gestaltung der Produktion, des Engineerings und des Produktionsumfeldes**, vor allem angesichts des demografischen Wandels und der damit verbundenen Herausforderungen für eine altersgerechte Arbeitsgestaltung.

4. **Die Schaffung neuer kollaborativer Formen der Arbeitsorganisation** in der *Smart Factory*, die auf qualitative Anreicherung, interessante Arbeitszusammenhänge, zunehmende Eigenverantwortung und Selbstentfaltung ausgerichtet ist

Auf dem Gebiet der softwareintensiven eingebetteten Systeme hat sich Deutschland insbesondere im Automobil- und Maschinenbau bereits eine führende Stellung erarbeitet. Im Zuge der Hightech Strategie und der IKT-Strategie der Bundesregierung sowie dem IT-Gipfel-Prozess wurden mittels mehrerer Technologieprogramme und Förderprojekte bereits zentrale Arbeiten diesbezüglich geleistet.<sup>2</sup> So wurde mit der Nationalen *Roadmap Embedded Systems*<sup>3</sup> bereits auf dem Nationalen IT Gipfel 2009 auf die Bedeutung vernetzter eingebetteter Systeme hingewiesen, mit der integrierten Forschungsagenda *Cyber-Physical Systems* (2012)<sup>4</sup> wurden weitere integrierte Forschungsempfehlungen vorgelegt. In diesem evolutionären Trend der technischen und wirtschaftlichen Verschmelzung der virtuellen und physikalischen Welt zu *Cyber-Physical Systems* ist der Produktionsstandort Deutschland gut aufgestellt, um seine Wettbewerbsfähigkeit halten und ausbauen zu können.

Um sich mit innovativen Cyber-Physical Systems im internationalen Wettbewerb einen führenden Platz zu sichern, ist aufgrund des engen Zeitfensters jedoch eine schnelle Reaktion von Industrie, Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften und Gesellschaft geboten. Der Transformationsprozess muss daher insbesondere in der Produktion zügig gelingen, um die Zukunftsfähigkeit des deutschen Produktionsstandortes zu sichern und Arbeitsplätze zu erhalten. Die deutsche Industrie hat dann die Chance, ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig auszubauen.

1 In der Diskussion um CPS lassen sich die beiden Perspektiven „CPS als Integration von Physik und *Computing*“ versus „CPS als Integration eingebetteter Systeme und dem Internet“ nicht immer trennscharf auseinander halten. Dies gilt auch für die vorliegende Publikation.  
2 S. dazu die Aufzählung der Forschungsprogramme und Förderaktivitäten sowie Aktivitäten der Verbände und Exzellenzcluster / Sonderforschungsbereiche im thematischen Kontext Industrie 4.0 in den ersten Handlungsempfehlungen der Promotorengruppe KOMMUNIKATION zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0 vom 20. September 2011, Abb.3, S. 8.  
3 ZVEI (Hg.): *Nationale Roadmap Embedded Systems*, Frankfurt, 2009.  
4 Broy M. / Geisberger E. (Hg.): *Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems* (acatech STUDIE), Springer Vieweg, Heidelberg, 2012.

## 2. INDUSTRIE 4.0 – DIE VIERTE INDUSTRIELLE REVOLUTION GESTALTEN

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 adressiert den evolutionären technologischen Wandel des **Zusammenwachsens** moderner Technologien der Informationstechnik mit klassischen industriellen Prozessen zu *Cyber-Physical Systems* (CPS) und seine revolutionären Auswirkungen auf die Industrie.

Die künftige Industrieproduktion wird durch eine zunehmende Individualisierung der Produkte geprägt werden, die durch integrierte Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und deren Funktionalitäten untereinander und mit dem Internet vernetzt werden. Das Produkt „weiß“ demnach beispielsweise, wann es gefertigt wurde oder mit welchen Parametern es optimal bearbeitet werden kann. Diese Informationen können in Summe wiederum für die Optimierung der Geschäftsprozesse etwa zur Ressourceneffizienz genutzt werden. Dieser unumkehrbare Trend zu CPPS in Kombination mit dem Internet der Dinge verzahnt nicht nur die Produkte mit der Produktion, sondern wird die Geschäfts- und Wertschöpfungssysteme im Ganzen in hoher Geschwindigkeit verändern. Das Zusammenwachsen der realen mit der virtuellen Welt durch CPS eröffnet der Industrie somit neue Möglichkeiten für intelligente Produktionssysteme sowie für die Realisierung vernetzter Produktionen mit übergreifenden Logistik- und Wertschöpfungsketten. Dies geht einher mit bedeutenden Fortschritten beim *Engineering*, bei der Durchführung industrieller Prozesse, bei der Ressourceneffizienz und in der Umweltverträglichkeit sowie im Lieferketten- und Lebenszyklusmanagement.

Dieser revolutionäre Wandel lässt sich als eine vierte Stufe des Industrialisierungsprozesses betrachten, der mit der Einführung mechanischer Produktionsanlagen – welche die Warenfertigung revolutionierten – Ende des 18. Jahrhunderts begann (Abb. 2).

Diese erste und die zweite industrielle Revolution – die arbeitsteilige Massenproduktion von Gütern mithilfe elektrischer Energie seit der Wende zum 20. Jahrhundert – mündeten ab Mitte der 1970er Jahre in die bis heute andauernde dritte industrielle Revolution. Hierbei wurde mit dem Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien (IT) die Automatisierung von Produktionsprozessen weiter vorangetrieben und ein Teil der „Kopfarbeit“ von der Maschine übernommen. Die vertikale Vernetzung eingebetteter Systeme mit betriebswirtschaftlichen Prozessen in Fabriken und Unternehmen und deren horizontale Vernetzung zu verteilen, in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzwerken führen wie oben ausgeführt nun zur vierten Stufe der Industrialisierung – der „Industrie 4.0“.<sup>5</sup>

- 5 Der Diskurs über die dritte industrielle Revolution knüpft im Wesentlichen an einen neuen Innovationszyklus an, der durch die Nutzung und den Ausbau Erneuerbarer Energien, radikale Erhöhung der Ressourcenproduktivität, Anwendung neuer Materialien, Werkstoffe und Verfahren (Biomimicry) gekennzeichnet ist (vgl. exemplarisch Rifkin 2011). Das heißt, die dritte Revolution wird vor allem mit Blick auf Umweltfragen und eine Ökologisierung der Produktion („was wird produziert“) definiert.

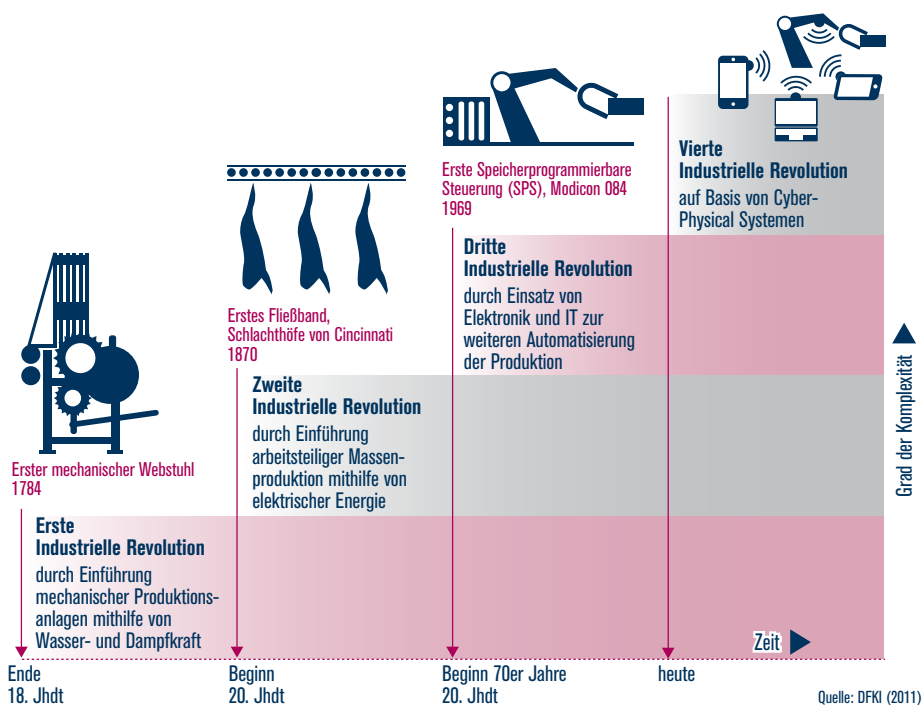


Abb. 2: Die 4 Stufen der Revolution

Für den Bestand und den Erfolg des Produktionsstandortes Deutschland ist es unabdingbar, diese vierte industrielle Revolution aktiv mitzugestalten, also autonome, selbststeuernde und wissensbasierte Produktionssysteme zu entwickeln, zu vermarkten und zu betreiben. Gleichzeitig müssen neuartige Anforderungen bewältigt werden:

- die Nachfrage nach individualisierten Produkten zu Preisen üblicher Massenprodukte, die steigende Leistungsfähigkeit sowie
- die Beherrschung der wachsenden Komplexität und der technischen Heterogenität der Produkte und die Entwicklung dazu notwendiger Produktionssysteme.

Dies erfordert künftig eine **ganzheitliche Sicht** auf die Produktion, denn komplexe **Abhängigkeiten** zwischen der **physischen und digitalen Welt** sind heute meist nur fallspezifisch durch die Informationstechnik abgebildet. Dabei zieht jede Änderung **aufwendige**, manuelle und oft anspruchsvolle Tätigkeiten nach sich. Es gilt daher, ein Netzwerk von Dienstleistungen, die *Engineering*-Aufgaben, die Fragen der Vermarktung und die Frage des jeweiligen Geschäftsplans (*Business Case*) ganzheitlich aufeinander abzustimmen, was durch den **konsequenten Einsatz moderner Informationstechnik** möglich wird. Neben dem technologischen Entwicklungspotenzial ist der **Mensch in der Industrie 4.0** zentraler und unabdingbarer Teil der Veränderung: Nicht nur als Kunde, sondern als zentrale Größe beim Entwurf und beim *Engineering* der CPPS und als Manager und Facharbeiter in der Produktion mit neuen kollaborativen Formen und multiplen Prozessen der Mensch-Mensch- (Soziale Netzwerke) und Mensch-Maschine-Interaktion.

## 2.1 Innovationsprozesse forcieren, Wertschöpfung erhalten, Beschäftigte einbeziehen

Der Einsatz von cyber-physischen Produktionssystemen und die Realisierung der Exportpotenziale werden ganz wesentlich davon abhängen, inwieweit die in Deutschland produzierten Technologien mit im In- und Ausland bereits verwendeten produktionstechnischen Anlagen und Komponenten kompatibel sind beziehungsweise sich trotz möglicherweise schwieriger Integrierbarkeit als technisch eindeutig überlegen erweisen und sich daher auf lange Sicht durchsetzen.

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 kann dabei an traditionelle Stärken der hiesigen Industrielandschaft anknüpfen:

- Marktführerschaft in vielen Teilbranchen der Industrie
- Innovationsführerschaft in *Embedded Systems* und *Industrial IT*
- Qualifizierte und hoch motivierte Beschäftigte
- Kurze Wege zu und teilweise intensive Kooperation mit Kunden und Lieferanten
- Leistungsfähige Forschungs- und Ausbildungseinrichtungen

Die Umsetzung der Industrie 4.0 zielt darauf ab, vorhandene technologische Potenziale zu heben, in einem systematisierten Innovationsprozess zu erschließen und mit den Kompetenzen, Leistungen und dem Wissen der Beschäftigten zu einem optimalen Gesamtpaket zusammenzufügen.

Das Neue an der Industrie 4.0 sind also nicht allein neue technische, sondern auch **neue soziale Infrastrukturen der Arbeit**, die die Einbindung der Beschäftigten in Innovationsprozesse sicherstellen. Entscheidend dafür sind neben umfassenden Qualifizierungs- und Weiterbildungsmaßnahmen Organisations- und Gestaltungsmodelle von Arbeit, die ein hohes Maß an selbstverantwortlicher Autonomie mit dezentralen Führungs- und Steuerungsformen kombinieren, die den Beschäftigten erweiterte Entscheidungs- und Beteiligungsspielräume sowie Möglichkeiten zur Belastungsregulation zugestehen.

Mit diesem **sozio-technischen Ansatz des Zukunftsprojekts Industrie 4.0** werden neue Räume für dringend benötigte Innovationen eröffnet, gestützt auf ein erweitertes Bewusstsein für die Bedeutung menschlicher Arbeit im Innovationsprozess.

## 2.2 Kernelement der Industrie 4.0 – die *Smart Factory*

Ein Kernelement der Industrie 4.0 ist die intelligente Fabrik – die **Smart Factory**. Sie zeichnet sich durch eine neue Intensität sozio-technischer Interaktion aller an der Produktion beteiligten Akteure und Ressourcen aus. Im Mittelpunkt steht eine **Vernetzung** von autonomen, sich situativ selbst steuernden, sich selbst konfigurierenden, wissensbasierten, sensorgestützten und räumlich verteilten Produktionsressourcen (Produktionsmaschinen, Roboter, Förder- und Lagersysteme, Betriebsmittel) inklusive derer Planungs- und Steuerungssysteme. Die *Smart Factory* zeichnet sich durch ein durchgängiges **Engineering** aus, das sowohl die Produktion als auch das produzierte Produkt umfasst, durch das die digitale und physische Welt nahtlos ineinandergreifen. Die *Smart Factory* ist zudem eingebettet in firmenübergreifende **Wertschöpfungsnetze** (s. Abb. 3)

Die Beschäftigten **steuern, regulieren und gestalten** die intelligent vernetzten Produktionsressourcen und die Produktionsschritte nach situativen und kontextabhängigen Zielvorgaben. Sie spielen damit in der *Smart Factory* die entscheidende und qualitätssichernde Rolle. Durch die *Smart Factory* wird die zunehmende Komplexität beherrschbar. Die *Smart Factory* bietet auf höchstem Produktivitäts- und Qualitätsniveau eine signifikant höhere Flexibilität und Resilienz und sichert einen optimalen Ressourceneinsatz.

In der voll ausgebauten *Smart Factory* der Industrie 4.0 herrscht eine völlig neue Produktionslogik: Die Produkte der *Smart Factory* sind eindeutig identifizierbar, jederzeit lokalisierbar und kennen ihre Historie, den aktuellen Zustand sowie alternative Wege zum Zielzustand. Alle Sensoren und Aktuatoren in der *Smart Factory* stellen ihre Daten als semantisch beschriebene Dienste bereit, die von den entstehenden Produkten gezielt angefordert werden können. Semantische M2M-Kommunikation mit aktiven digitalen Produktgedächtnissen macht das Produkt zum Informationsträger, zum Beobachter und zum Akteur.

|             | Gestern<br>Industrie 1.0 und 2.0                                                                                                                                 | Heute<br>Industrie 3.0                                                                                                                                           | Morgen<br>Industrie 4.0                                                                                                                                                      |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Supersystem | <b>Analog-Kommunikation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heimatmärkte</li> <li>• Großrechner</li> </ul>                                              | <b>Internet und Intranet</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exportmärkte</li> <li>• PCs</li> </ul>                                                     | <b>Internet der Dinge</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lokalisierte Märkte</li> <li>• Mobile &amp; Cloud Computing</li> </ul>                                    |
| System      | <b>Neo-Taylorismus</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorratsfertigung</li> <li>• Verrichtungsorientierung</li> <li>• Meister-Organisation</li> </ul>  | <b>Lean Production</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• JiT-Produktion</li> <li>• Prozessorientierung</li> <li>• Team-Organisation</li> </ul>            | <b>Smart Factory</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Individualproduktion</li> <li>• Resiliente Produktion</li> <li>• Augmented Operators</li> </ul>                |
| Subsystem   | <b>Mechanisierung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konv. Maschinen</li> <li>• Arbeitspläne</li> <li>• Zeichenbretter</li> <li>• Handräder</li> </ul> | <b>Automatisierung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CNC-Maschinen</li> <li>• ERP / MES</li> <li>• 3D-CAD / CAD-CAM</li> <li>• Bedienpulte</li> </ul> | <b>Virtualisierung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Social Machines</li> <li>• Virtual Production</li> <li>• Smart Products</li> <li>• Mobile Devices</li> </ul> |

Quelle: Trumpf

Abb. 3: Der Weg zur *Smart Factory*

Die *Smart Factory* als wesentlicher Bestandteil von Industrie 4.0 ermöglicht maßgeschneiderte Produkte und sichert damit den deutschen Wettbewerbsvorsprung in einer globalisierten Welt. Mit ihren Schnittstellen zu *Smart Mobility*, *Smart Logistics* und dem *Smart Grid* ist sie ein wichtiger Bestandteil zukünftiger intelligenter Infrastrukturen. Als intelligente Fabrik ermöglicht sie die Beherrschung der zunehmenden Komplexität der Produktionsabläufe für den Menschen und macht die Produktion attraktiv, urban-verträglich und wirtschaftlich:

- Die **Ressourceneffizienz** wird signifikant gesteigert; Bestände und Durchlaufzeiten kundenindividueller Produkte massiv verkürzt. Damit wird die an deutschen Produkten geschätzte Qualität und Produktivität nachhaltig ausgebaut.
- Die *Smart Factory* **beherrscht Störeinflüsse** und löst bestehende Grenzen auf. Wege, Layouts, Abfolgen, Betriebs- und Recyclingpunkte, Produkte und Technologien werden flexibilisiert. Sie entfaltet dazu ihr Potenzial durch die Erfüllung bisher als widersprüchlich geltender Anforderungen. In ihr teilen *Social Machines* ihr Wissen: Sie erkennen etwa durch Lernerfahrung die besten Parameter, mit denen sie bestimmte Werkstoffe bearbeiten können, erkennen und informieren in ihrem „sozialen Netzwerk“ andere mit ihnen vernetzte Maschinen, die diese neuen Einstellungen wiederum automatisch übernehmen.

*Smart Products* tragen eigenes Wissen und *Global Facilities* ermöglichen neuartige Wertschöpfungsnetzwerke.

- Die Virtuelle Produktion (*Virtual Production*) trägt durch Echtzeit-Abbilder der Produktion zur **Reduktion von Verschwendung** weit über bestehende Ansätze hinaus bei.
- Im **Mittelpunkt der Interaktionen in der Fabrik** stehen die **Beschäftigten** (*Augmented Operators*), die ihre Aufgaben durch die (virtuell) erweiterte Sicht auf die reale Fabrik besser wahrnehmen können. Sie erweitern ihre Fähigkeiten stetig und werden so vom Bediener zum kooperierenden Steuerer, Regulierer und Gestalter, der seine Expertise kontinuierlich einbringen kann (vergl. Abb. 4).

Die zukünftige multiadaptive *Smart Factory* wird keinesfalls menschenleer sein, sondern sie wird die **Beschäftigten als aktive Träger von Entscheidungen und Optimierungsprozessen** dringend benötigen. Die Beschäftigten werden wichtige Funktionen bei dem Entwurf, der Installation, der Umrüstung, der Wartung und der Reparatur komplexer *cyber*-physischer Produktionssysteme und der für das Internet der Dinge notwendigen neuartigen Netzkomponenten übernehmen. Neben den Beschäftigten sind auch alle weiteren Akteure (Zulieferer, Kunden, etc.) in die Interaktionen in der Fabrik mit eingebunden.

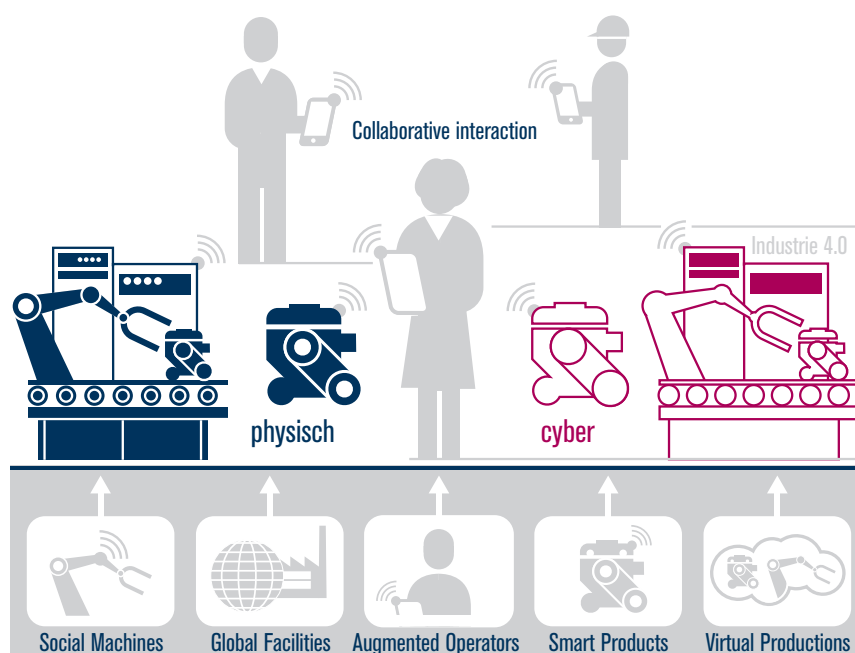
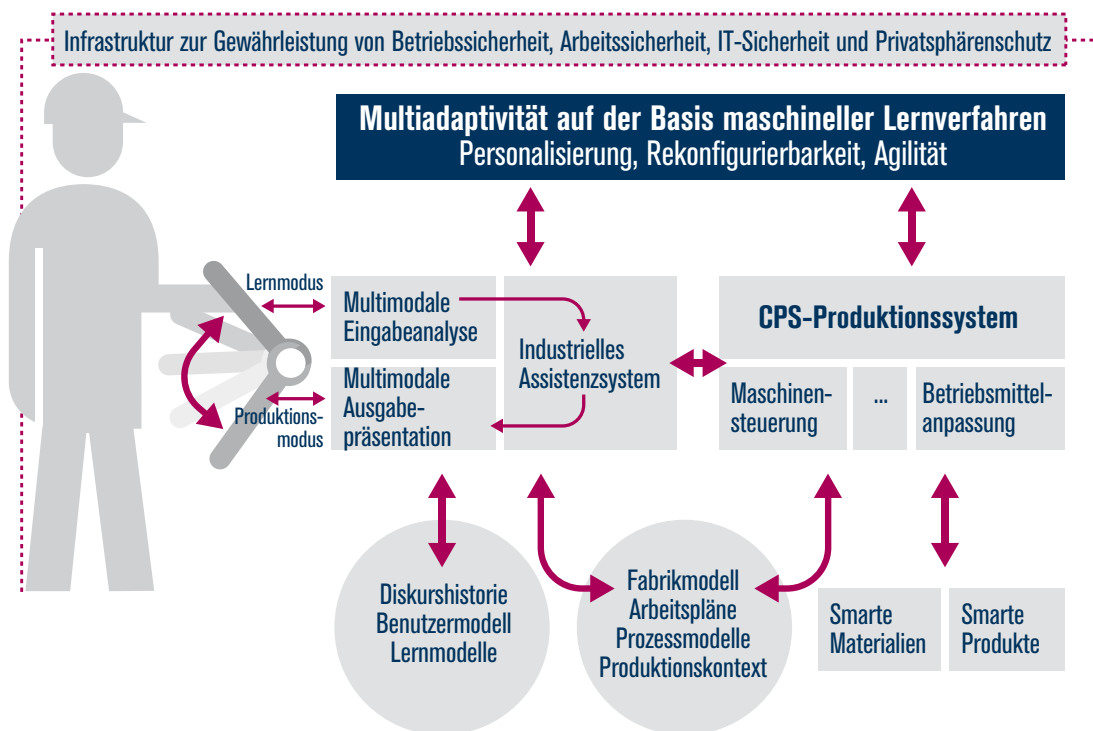


Abb. 4 – Interaktionen in der *Smart Factory* (Quelle: Trumpf)

Zur Bewältigung dieser neuen Anforderungen müssen die Beschäftigten von intelligenten Assistenzsystemen unterstützt werden, um ihre Arbeit zuverlässig und effizient durchführen zu können. Völlig **neuartige multimodale Benutzerschnittstellen** spielen hierfür eine entscheidende Rolle. Diese Schnittstellen nutzen einerseits den Aufgabenkontext der Beschäftigten für proaktive Assistenzfunktionen und unterstützen den Arbeiter gleichzeitig auch durch adaptiven Privatsphärenschutz – wobei sie gleichzeitig die Sicherheitsaspekte der *Smart Factory* berücksichtigen (vgl. Abb. 5).

Die vierte industrielle Revolution führt somit auch zu einem **Paradigmenwechsel in der Mensch-Technik- und Mensch-Umgebungs-Interaktion** mit neuartigen Formen der kollaborativen Fabrikarbeit. Die Verwirklichung der agilen multiadaptiven *Smart Factory* erfordert menschenzentrierte sozio-technische Fabrik- und Arbeitssysteme. Die Technik soll dabei die kognitive und physische Leistungsfähigkeit der Beschäftigten durch die richtige Balance von Unterstützung und Herausforderung fördern – insbesondere im Hinblick auf die industriellen Assistenzsysteme, die Mensch-Technik-Kooperation sowie die Aspekte der Qualifizierung und Weiterbildung. Unterstützend sollte auch die Arbeit dementsprechend organisiert werden (s. dazu Kap. 4.2.4 und Kap. 5.4)



Quelle: DFKI 2012

Abb. 5: Architektur einer agilen multiadaptiven *Smart Factory*



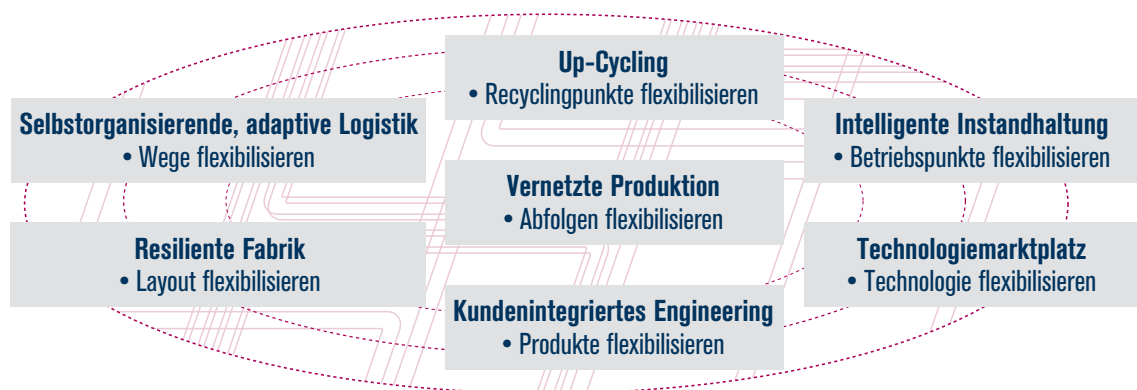
### 2.2.1 USE CASES UND ÜBERGEORDNETE MERKMALE ZU INDUSTRIE 4.0

Für die *Smart Factory* wurden acht Anwendungsbeispiele (*Use Cases*) definiert, mittels derer das Ziel einer hochflexiblen und robusten *Smart Factory* ganzheitlich auf allen Ebenen abgedeckt werden kann (s. Abb.6 und ausführlich in Anhang A.1). Gleichzeitig sollen die Vorteile der *Smart Factory* veranschaulicht und die technologischen Herausforderungen in ihrem Gesamtzusammenhang aufgezeigt werden.

Die Inhalte der Anwendungsbeispiele sind im Folgenden in Form dreier übergeordneter Merkmale der *Smart Factory* zusammengefasst, die für alle acht *Use Cases* gelten:

- Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke
- Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme
- Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus

Diese drei Merkmale werden in Kapitel 3 im Rahmen der dualen Strategie wieder aufgegriffen und erläutert.



Quelle: Trumpf

Abb. 6: Ziele der *Smart Factory* nach Themenschwerpunkten und *Use Cases*

## 1. HORIZONTALE INTEGRATION ÜBER WERTSCHÖPFUNGSNETZWERKE

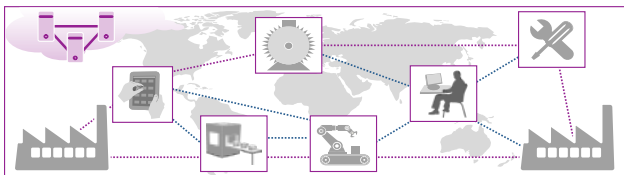


Abb.7 Horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke (Quelle: Siemens)

In der Industrie 4.0 erlaubt ein **echtzeitoptimiertes Wertschöpfungsnetzwerk** eine durchgängige Transparenz, flexible Reaktion auf Störungen und eine globale Optimierung über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk hinweg.

Möglich wird dies durch die CPPS-basierte Vernetzung von der Eingangslogistik über die Produktion, das Marketing, die Ausgangslogistik bis zum *Service*. Hierdurch werden Entwurf, Konfiguration, Bestellung, Planung und Produktion über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk kundenspezifisch mittels IKT verzahnt. Der gesamte Prozess von der Bestellung bis zur Lieferung kann dadurch zwischen den beteiligten Partnern in vielfältigen Dimensionen (Qualität, Zeit, Risiko, Robustheit, Preis, Umweltverträglichkeit etc.) dynamisch verhandelt werden. Dies wiederum führt zu einer **hochgradigen Flexibilität einzelner Produktionsstätten**, zu deren Vernetzung und Logistik und damit zur echtzeitoptimierten Realisierung einer bedarfsorientierten Produktion („wandelbare Fabrik“ und „selbstorganisierende adaptive Logistik“).

Voraussetzungen für diese durchgängige Vernetzung sind standardisierte, offene Schnittstellen sowie Prozesse, die Vertrauen und Sicherheit für alle an der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure ermöglichen. Es muss daher ein *Monitoring und Feedback* über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk (Fabrik, Logistik, Geschäftsbeziehungen) in Echtzeit erfolgen. Die Geschäftsprozesse im echtzeitoptimierten Wertschöpfungsnetzwerk müssen emergente (im Sinne der Herausbildung eines übergeordneten Mehrwerts für das Gesamtnetzwerk) Gesamteffekte und veränderliche Rahmenbedingungen (Recht, Risiko, Haftung, Exportkontrolle) berücksichtigen.

## 2. VERTIKALE INTEGRATION UND VERNETZTE PRODUKTIONSSYSTEME

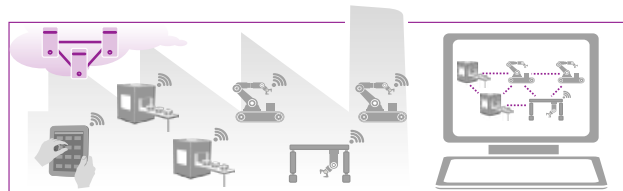


Abb. 8 – Vertikale Integration und vernetzte Produktionssysteme (Quelle: Siemens)

Die selbstorganisierende Fabrik in der Industrie 4.0 ermöglicht eine **variantenreiche kundenspezifisch individualisierte Produktion** mit verteilten und möglicherweise heterogenen Produktionsressourcen unter volatilen Randbedingungen (zum Beispiel kurzfristig veränderte Nachfrage, Bestände, plötzliche Störungen).

Die Fertigungsmodule in einer selbstorganisierenden Fabrik sind *plug & produce*-fähig, das heißt Ressourcen und Produkte vernetzen sich ad hoc. Material und Teile sind dadurch jederzeit lokalisierbar, sie navigieren sich selbständig durch das Produktionssystem und speichern die Historie aller erfolgten Navigations- und Bearbeitungsschritte ab. Dadurch entfallen administrative Bestandsführungs-, Buchungs- und Inventurprozesse. Mit intelligenter Sensorik und durchgängigen Daten – also vertikal integriert durch alle Ebenen der Automatisierungspyramide – überwacht die Fabrik sich gewissermaßen selbst: Sie erstellt ein kontinuierliches (virtuelles) Abbild ihrer Produktion und identifiziert und prognostiziert ungeplante Ereignisse. Die Selbstüberwachung ist in ein umfassendes Sicherheitskonzept integriert, in das der Mensch (*Augmented Operator*) jederzeit steuernd eingreifen kann. Störungen und Ad-hoc-Aufträge führen dabei zu automatischer Umplanung.

Auch das **Instandhaltungsmanagement erfolgt selbstorganisiert**. Ungeplante Ereignisse – wie etwa Maschinenausfall, Qualitätsschwankungen oder Änderungen der Produktspezifikation – werden automatisch identifiziert. Zustand und Verschleiß der Materialien werden kontinuierlich überwacht und prognostiziert. Durch diese Adaption des gesamten Produktionsprozesses werden ungeplante Maschinenstillstände vermieden.

### 3. DURCHGÄNGIGKEIT DES ENGINEERINGS ÜBER DEN GESAMTEN LEBENSZYKLUS

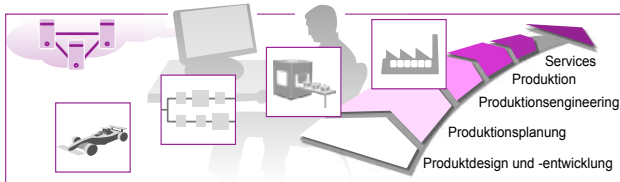


Abb. 9: *Seamless Engineering*: Vom Entwurf über den Betrieb bis zur Instandhaltung (Quelle: Siemens)

Die Ziele von Industrie 4.0 erfordern eine **Durchgängigkeit des Engineerings über den gesamten Lebenszyklus des Produkts und des zugehörigen Produktionssystems** hinweg. Für neuartige technische Produkte müssen die entsprechenden neuen oder modifizierten Produktionssysteme zeitlich verzahnt entwickelt werden. Dies führt zu einer integrierten Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produkt und Produktionssystem sowie der Abstimmung ihrer Lebenszyklen.

Die lebenszyklus-überspannende Betrachtung erlaubt die frühzeitige Berücksichtigung von Wartungs- und Instandhaltungskonzepten (Reuse von *Engineering*-Daten). Dies bedeutet, dass Wettbewerbsvorteile (Qualität, Service) bei Konsumprodukten erzielt werden, und erhöht im Fall der Verwendung dieser Produkte innerhalb einer weltweiten Fertigung die Verfügbarkeit des Produktionssystems. Diese Aspekte erfordern, dass die „richtigen“ Daten und Informationen allen Beteiligten in allen Lebenszyklus-Phasen zur Verfügung stehen müssen. Dazu sind Konzepte und Werkzeuglösungen erforderlich (Welche Daten müssen auf welcher Abstraktionsebene in welcher Phase vorgehalten werden?).

Durch eine konsequente Weiterentwicklung der *Systems Engineering*-Ansätze werden Synergieeffekte zwischen Produktionssystem und Produktentwicklung auf der methodischen Ebene erzielt. Die Konzeption eines übergreifenden Meta-Modells für modellbasiertes, disziplinübergreifendes Engineering und Methoden zur Abstraktion versus Verfeinerung sind hier zwei Beispiele, die sowohl auf eine Komponentenentwicklung als auch auf das Anlagen-*Engineering* angewendet werden können (s. Empfehlungen in Kapitel 4.2.3).

Das *Engineering* bildet in der Produktion nicht nur den **Verknüpfungspunkt zwischen Produktionssystem und Produkt**, sondern **stärkt auch die Rolle des Menschen**. Er ist der zentrale Akteur, der in den verschiedenen Entwicklungs- beziehungsweise Betriebsphasen unterstützt wird und in *team*-übergreifender Zusammenarbeit Innovationen schafft. Durchgängiges Engineering nutzt das Zusammenwachsen der digitalen und realen Welt. Aus Daten werden Modelle, die zu virtuellen Prototypen kombiniert werden und frühzeitige Validierungen und Verifikationen erlauben. Die damit entstehenden, neuen *Engineering-Workflows* gestalten die flexibler werdenden Prozesse. Heutige Werkzeuge und IT-Plattformen können durch entsprechend ausgearbeitete Migrationskonzepte einerseits wieder- und weiterverwendet werden, andererseits können sie auch in Zwischenschritten bereits Effizienzsteigerungen ermöglichen.

## 2.3 Techniktrend Internet der Dinge und Dienste – Chancen und Herausforderungen

In den vergangenen zwanzig Jahren hat das Internet die Welt erobert und über die Kommunikationstechnologie den Traum einer weltweit vernetzten Menschheit verwirklicht. Die Auswirkung auf unser tägliches Leben, die disruptiven Marktveränderungen und die dynamische Anpassung unserer sozialen Strukturen beginnen wir gerade erst zu verstehen, da bahnt sich schon die nächste Revolution an: das Internet der Dinge. Zusätzlich werden jetzt alle Dinge, Geräte, Maschinen, Sensoren und Aktoren in das Internet integriert und darüber selbst zu Akteuren. Es entsteht – gemeinsam mit den in sozialen *Online*-Netzwerken vernetzten Nutzern (*Internet of People*) – das Internet der Dinge und Dienste (*Internet of Things and Services* – Abb. 10), das eine nahtlose Verknüpfung der virtuellen und der physikalischen Welt ermöglicht.

Bereits in wenigen Jahren sollen so mehrere Milliarden von Geräten und Systemen in der Lage sein, selbständig Daten untereinander auszutauschen. Aufzüge oder Klimaanlage kommunizieren dann über das Netz mit der Wartungszentrale, die den Reparaturdienst koordiniert; Autos werden mit Leitsystemen in Kontakt treten und so ein aktuelles Bild der Wetter- und Verkehrssituation wiedergeben; *Container* können dann in Echtzeit ihre Position an das Logistikzentrum übermitteln, das automatisch den Lastwagen zu deren Abholung dirigiert und den notwendigen Lagerraum bereitstellt.

Die *Smart Factory* der Industrie 4.0 nutzt somit die Potenziale des Internets der Dinge und Dienste mittels CPPS und ist

dabei eng mit den anderen Anwendungsfeldern (*Smart Grid*, *Smart Mobility*<sup>6</sup>, *Smart Home / Smart Building*) vernetzt (s. Folgeabschnitt 3.2.1).

Die **Technologie-Basis** des Internets der Dinge und Dienste besteht aus den folgenden Teiltechnologien:

- **Elektronik** ermöglicht immer schnellere, günstigere, kleinere und energiesparendere Bausteine zum Betreiben von Kommunikation und Software,
- **Mikrosystemtechnik** ermöglicht immer kleinere, günstigere und leistungsfähigere Sensoren und Aktoren,
- **Kommunikationstechnologie** ermöglicht die immer günstigere, schnellere, weltweite, sekundenschnelle Verknüpfung von Prozessen und Datenbeständen,
- **Auto-ID** mittels Bar-, Data-Matrix-Code oder Radio-Frequency-Identifikation (RFID) ermöglicht die eindeutige Identifizierung einfachster Objekte und deren Verknüpfung mit der virtuellen Welt,
- **Mensch-Maschine-Schnittstellen** ermöglichen die intuitive Bedienung komplexer Systeme und die Interaktion mit ihnen auch ohne spezielle Ausbildung,

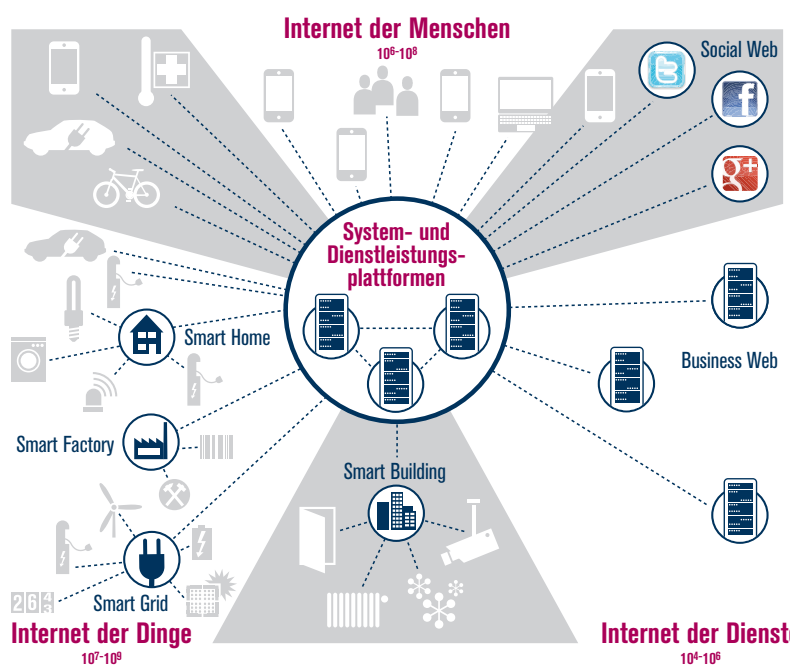


Abb. 10 Internet der Dinge und Dienste – Vernetzung von Menschen, Dingen und Systemen (Quelle: Bosch 2012)

- **Software** ermöglicht die weltweite dynamische Verteilung von Funktionalität und ist integraler Bestandteil für die Systemintegration über die Teilgewerke Mechanik, Elektrik und Elektronik hinweg. Die *Softwareentwicklung* stößt nicht an technische Grenzen, sondern hängt (als einzige Technologie) ausschließlich von der Kreativität und den Fähigkeiten des Menschen (Entwicklers) ab (s. dazu auch Kapitel 4.2.3).

Da sich diese Technologien gegenseitig beschleunigen und verbessern, ist von zukünftig noch rasanteren Veränderungsprozessen auszugehen.

Neben der technologischen Basis stellt der **Technologie-Trend Big Data** (dt. Erhebung, Analyse und Verarbeitung unvorstellbar großer Datenmengen) und die Frage des **Datenmanagements** auch die Industrie 4.0 vor zentrale Herausforderungen: Im Internet der Dinge und der Dienste werden künftig enorme Datenmengen verarbeitet. Wettbewerbsvorteile besitzt, wer es versteht, diese Daten sicher und erfolgreich zu sammeln, zu verwalten und einzusetzen. Diese Logik trifft auf Industrie 4.0 mit den umfangreichen Datenmengen aus der Produktion und der Logistik in ganz besonderem Maße zu.

Drei Entwicklungen resultieren aus den oben angeführten Technologie-Trends und bilden das Internet der Dinge, Dienste und Nutzer (Menschen). Diese (sozio-) technologischen Trends zu gestalten und zu beherrschen, ist Grundvoraussetzung für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0:

#### 1. **Smart Embedded Systems, mobile Dienste und ubiquitäres Computing:**

Teil der CPS sind intelligente eingebettete Systeme, die bereits heute kooperativ und vernetzt agieren, allerdings meist noch als geschlossene Systeme. Vor allem in der Automobilbranche und der Luftfahrt, aber auch in der Telekommunikations- und Automatisierungstechnik sowie in der Produktion existieren schon ortsungebundene Dienste und Assistenzfunktionen. Durch zunehmende Vernetzung, Interaktion, Kooperation und Nutzung von Mobilitätsdiensten und weiteren *Services* aus dem Netz sind diese Dienste jederzeit verfügbar und werden immer vielfältiger und reifer.

#### 2. **Internetbasierte Geschäftsprozesse:**

Vor allem im Handel und in der Logistik gibt es längst „intelligente“ und vernetzte Objekte (etwa mittels RFID-Technologie). Zunehmend wird dabei das digitale Produktgedächtnis der Objekte auch für die Prozessoptimierung genutzt, etwa beim Warenfluss. Die Objekte passen sich flexibel an *softwarege-* steuerte Unternehmensprozesse an und interagieren über das Web mit Kunden. Diese können beispielsweise über das Internet verfolgen, wo sich ein Produkt momentan innerhalb einer Logistikkette befindet. IT-Services dieser Art werden zuneh-

mend in die *Cloud*, also an externe Dienstleister, ausgelagert; ihr Betrieb ist dadurch unabhängig von einem Rechenzentrum an einem bestimmten Ort. Die IT-Systeme müssen auch für die Auslagerung klassischer IT- und Verwaltungsaufgaben aus den Unternehmen sowie für das Übertragen von Aufgaben im Zusammenhang mit Handel, Logistik, Prozesssteuerung und Abrechnung in die *Cloud* gerüstet sein.

#### 3. **Soziale Netzwerke und Communities (Web 2.0):**

Soziale Netzwerke bündeln heute große Mengen von Daten und Informationen. Das gilt auch für offene Wissensnetzwerke: Unternehmen nutzen zunehmend Wiki-Systeme zur breit angelegten Bereitstellung von Informationen und Wissen. Für die Unternehmen sind die Nutzer potenzielle Kunden und die Netzwerke potenzielle Werbe- und Vermarktungsplattformen. Mit zunehmender Profilbildung und Spezialisierung der Teilnehmer entsteht die Nachfrage nach neuen Diensten, etwa nach allgemeinen oder domänenspezifischen *Apps (Applications)* und vernetzten Anwendungen. Endgeräte wie *Smartphones* und *Tablets* steuern explizit und implizit eine Vielzahl von Sensoren bei – aus sozialen Netzwerken entsteht so ein *Cyber-Physical System*. Diesen Effekt gilt es, aktiv und kontrolliert zu nutzen.

*Communities* aus einzelnen oder eng gekoppelten Entwicklergruppen treiben die Innovation. Sie sind meist um Entwicklungsplattformen organisiert; dabei handelt es sich oft um *Open-Source*-Projekte, die *Software* mit offenen Quellcodes entwickeln, und zwar entweder in Selbstorganisation oder unter der Lenkung durch ein Unternehmen oder Konsortium.

Die oben genannten Trends erfordern konkrete Innovationen um, die Technologie CPS für die industrielle Produktion im Sinne von CPPS zu ertüchtigen. Dies meint, dem Anwender ein methodisches Rüstzeug zur Anwendung der Technologie CPPS zur Verfügung zu stellen sowie die Kooperation von CPPS mit Menschen optimal zu unterstützen:

#### • **Technologie von CPPS**

Heutige Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in der Produktionstechnik sind auf eine Fabrik (oder eine Fertigungslinie) innerhalb eines Unternehmens hinsichtlich der Kosten und der Effizienz optimiert. Um die Potenziale von CPS im Umfeld der Produktion heben zu können, sind die oben angeführten Basistechnologien der IKT (wie beispielsweise Modellierungssprachen, -techniken, Plattformen etc.) ausgehend von den geschäftlichen Treibern für die Automatisierungstechnik zu ertüchtigen. Aufgrund der vielfältigen Anforderungen sind dabei vor allem geeignete, auf die verschiedenen Anwendungsfälle abgestimmte Referenzarchitekturen zu entwickeln und in Standards zu überführen (s. Empfehlungen in Kapitel 3).

6 Mobilität / *Mobility* wird hier als integrierte Betrachtung von Personen- und Güterverkehr verwendet und umfasst damit auch den Bereich „Logistik“.

- **Anwendung von CPPS und methodische Aspekte**

Mit CPPS werden vertikale und horizontale Wertschöpfungsnetzwerke realisiert, in denen Dienstleistungen, das *Engineering*, die Produktion sowie die Vermarktung und Einbindung von Kundenforderungen durch den konsequenten Einsatz der Informationstechnik miteinander gekoppelt sind, was in Kapitel 3 und 4 mit folgenden Merkmalen weiter präzisiert wird:

1. **Horizontale Vernetzung** in verteilten, nahezu in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzen
2. **Vertikale Vernetzung** eingebetteter Systeme mit betriebswirtschaftlichen Prozessen in Fabriken und Unternehmen
3. **Durchgängigkeit** über die **gesamten Lebenszyklen** aller betrachteten Systeme, insbesondere im Hinblick auf *Engineering*, Produktion und Logistik

- **Mensch und Arbeit in der Kooperation mit CPPS**

In der durch Industrie 4.0 deutlich stärker vernetzten Welt werden auch an den Menschen neue Anforderungen gestellt. Dies gilt sowohl für die kreativen Planungs- und Entwicklungsprozesse als auch für den eher operativ geprägten Arbeitsprozess in Produktion und Logistik. Nur wenn der Mensch im Zentrum steht und in reale Ablaufprozesse geeignet und mit systemseitiger kontextabhängiger Unterstützung eingreifen kann, liefern CPPS einen wirklichen Mehrwert.

Die genannten Themen erfordern nachhaltige Forschungsanstrengungen, um Systeme zu schaffen, die tatsächlich die komplexen Anforderungen erfüllen und zu Systemen führen, die in ihrer Flexibilität und Unterstützung zur Komplexitätsreduktion und zur Beherrschung beitragen – und nicht selbst wieder Quelle zusätzlicher Komplexität sind (s. Kapitel 3 und 4.4).

## 2.4 Die Vision Industrie 4.0 als Teil einer intelligenten, vernetzten Welt

In einer „intelligenten, vernetzten Welt“ (*Smart Globalized World*) wird das Internet der Dinge und Dienste wie ausgeführt in unterschiedlichen Bedarfsfeldern genutzt werden: in der Energieversorgung (*Smart Grids*), in den Verkehrsnetzen (*Smart Mobility*, *Smart Logistics*) und in der Produktion (*Smart Factories*), wo Industrie 4.0 entsteht (S. Abb. 11).

Industrie 4.0 ermöglicht dabei vor allem eine **zunehmende Flexibilisierung** und **Robustheit** von *Engineering*-, Produktions- und Logistikprozessen. Dadurch können die **zunehmende Dynamik** und **Komplexität** nachhaltig beherrscht werden im Hinblick auf:

- maschinenbauliche und anlagentechnische Ausführung und Betrieb künftiger Produktionssysteme,
- *Lifecycle*-Betrachtungen bezüglich des zu produzierenden Produkts (*Product Lifecycle Management*, *PLM*), des dabei zugrunde liegenden technologischen Prozesses sowie der dabei genutzten Ressourcen einschließlich des Angebots der generell zur Verfügung stehenden Technologien,
- die Energieversorgung und Umweltbilanzierung künftiger Anlagen und Fabriken einschließlich der Material- und Rohstoffversorgung wie auch der Inter- und Intralogistik künftiger Fabriken und
- die Einbindung in immer umfangreichere und sich schneller ändernde umfassende Wertschöpfungsnetze.

CPPS erlauben dadurch, dass verteilte heterogene Prozesse und Strukturen zu handhabbaren, effizienten, dynamischen und selbstorganisierten Wertschöpfungsnetzen zusammenwachsen. Menschen und Maschinen kommunizieren ganz selbstverständlich in einem gemeinsamen „sozialen“ Netzwerk. Die physische und die digitale Welt **wachsen zusammen** und eröffnen neue Möglichkeiten hinsichtlich Bedienbarkeit, Komplexitätsbeherrschung und somit der Wertschöpfung.

- Die Flexibilität und dynamische Konfigurierbarkeit von **Produktionssystemen** unter Nutzung allgemeingültiger Planungs- und Steuerungskonzepte ermöglichen eine optimale Bedienung der sich kontinuierlich verändernden Kunden- und Marktanforderungen.
- Die steigende und zukünftig manuell nicht mehr beherrschbare Komplexität von **Engineering-Prozessen** ist damit auf eine höhere Planungs- und Abstraktionsebene ohne Medienbrüche verlagert, sodass sie intellektuell und umfangseitig im sich ständig ändernden Umfeld leistbar bleibt.

- Die globalen **Wertschöpfungsnetze** optimieren sich zukünftig selbst. Sie erfüllen komplexe technische und geschäftliche Anforderungen und beherrschen technische und geschäftliche Randbedingungen durch dynamische und selbstorganisierte Interaktion aller beteiligten Komponenten in der physischen und digitalen Welt.

Die multilaterale technische Integration der Entwicklungs- und Produktionsprozesse muss dabei sowohl innerhalb einer *Smart Factory* als auch in einer *Cloud*-gestützten Föderation von *Smart Factories* beherrschbar sein (vgl. Abschnitt 2.2).

Der hierfür notwendige Paradigmenwechsel hin zur Industrie 4.0 ist ein **langfristiges Vorhaben** und wird nur in einem evolutionären Prozess über dezentrale Umstellung von Teilbereichen möglich sein. Der vollständige Nutzen stellt sich erst später ein und muss über eine geschickte Migrationsstrategie mit frühem Teilnutzen angegangen werden.

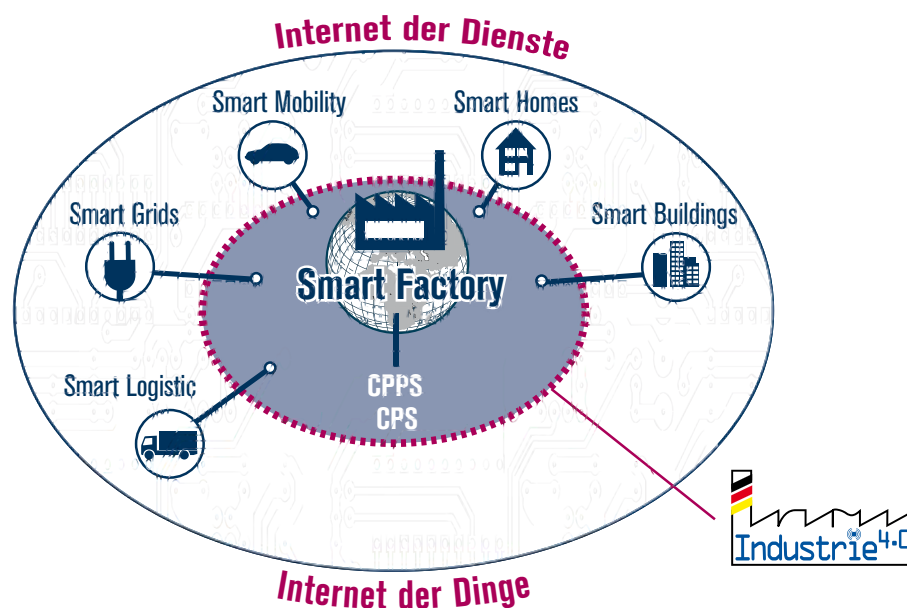


Abb. 11: Einordnung Industrie 4.0 und *Smart Factory* in einen Gesamtkontext.



### 3. DUALE STRATEGIE: LEITMARKT UND LEITANBIETERSCHAFT

Die vierte industrielle Revolution („Industrie 4.0“) bietet erhebliche Potenziale für die produzierende Industrie in Deutschland. Einerseits kann die vermehrte Einführung / der verstärkte Einsatz von **Cyber-Physical Systems (CPS)** in deutschen Fabriken den Produktionsstandort Deutschland durch Effizienzsteigerungen der heimischen Fertigung stärken. Andererseits birgt die technische Weiterentwicklung von CPS durch deutsche Unternehmen substantielle Chancen für den Export von Technologien und Produkten. Zielvorgabe bei der Umsetzung des Zukunftsvorgangs Industrie 4.0 sollte daher sein, die Marktpotenziale für die produzierende Industrie zu heben und mittels einer dualen Strategie Leitanbieterschaft und Leitmarkt für Industrie 4.0 zu erreichen (s. Abb. 12).

In den folgenden Abschnitten werden Voraussetzungen und Marktpotenziale für die CPS-Domäne „produzierende Industrie“ beschrieben, die mit der konsequenten Entwicklung und Einführung von **Cyber-Physical Production Systems (CPPS)** verbunden sind. Die Herleitung des sich in der Gesamtheit darstellenden Potenzials erfolgt schrittweise in den Abschnitten 3.1 (Leitanbieterperspektive) und 3.2 (Leitmarktperspektive). Im Abschnitt 3.3 werden die Leitanbieter- und Leitmarktperspektive synergetisch in einer dualen Strategie zusammengeführt.

#### 3.1 Leitanbieterperspektive

Die Leitanbieterperspektive beleuchtet die Potenziale von CPPS im Wesentlichen aus der Sicht der Ausrüsterindustrie. Die Ausrüsterindustrie für das produzierende Gewerbe ist grundsätzlich in einer guten Startposition, im Bereich der Entwicklung, des Betriebs und in der globalen Vermarktung von CPPS eine Führungsrolle einzunehmen – insbesondere, weil sie einerseits als Ausrüster CPPS entwickelt und andererseits im Rahmen der eigenen Produktion CPPS anwenden kann. Neben dem Maschinen- und Anlagenbau, der Automatisierungstechnik, dem *Engineering* und ausgewählten Bereichen der Informations- und Kommunikationstechnologie sind deutsche Unternehmen der Ausrüsterindustrie mit ihren technischen Lösungen weltweit führend.

Es kommt jetzt aber darauf an, technisch hochstehende Lösungen mit den neuen Möglichkeiten der Informationstechnologie intelligent zu verknüpfen, um so einen **Innovationssprung** einzuleiten. Nur durch das konsequente Zusammenführen der Informations- und Kommunikationstechnik mit den klassischen Hochtechnologieansätzen werden die Voraussetzungen geschaffen, die zunehmende Marktdynamik und Komplexität von globalen Marktabläufen zu beherrschen und daraus auch neue Marktpositionen für das eigene Unternehmen abzuleiten:

- Dazu ist es zunächst naheliegend, die **in anderen Anwendungsbereichen gewonnenen Erfahrungen** beim Aufbau von CPS zu nutzen und sie im Hinblick auf die besonderen Bedürfnisse der Produktion weiterzuentwickeln.
- Daneben wird es auch notwendig werden, **eine hochleistungsfähige Infrastruktur zum Datenaustausch zu realisieren** und angepasste Methoden und Systeme zur Datensicherheit und zum *Know-how*-Schutz zu erforschen, um auf dieser Basis alle relevanten Geschäftsprozesse, wie beispielsweise die integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung, das *Engineering*, die Produktion und die Logistik, neu zu gestalten.



Abb.12: Globale Wettbewerbsfähigkeit durch die Duale Strategie.



In Einzelpunkten kann die Leitanbieterperspektive folgendermaßen zusammengefasst werden:

- In vielen Branchen des produzierenden Gewerbes sind deutsche Unternehmen weltweit technisch führend und deshalb **grundsätzlich gut in der Lage**, eine Leitanbieterposition im Bereich von CPPS zu entwickeln, anzuwenden und markt-relevant zu realisieren.
- Die Entwicklung einer Leitanbieterposition ist aber nur möglich, **wenn die vorhandenen Basistechnologien auf die Besonderheiten der Produktion angepasst beziehungsweise anwendungsorientiert weiterentwickelt** werden. Um Skaleneffekte zu erschließen und eine flächendeckende Wirkung zu erzielen, muss dies in zwei Richtungen geschehen:
  - Technische und informationstechnische Weiterentwicklung bereits realisierter Anlagen und Produktionen im Hinblick auf die Realisierung von CPPS-Fähigkeiten (*Brownfield*)
  - Erforschen und Entwickeln von Modellen und Konzepten zur Auslegung und Realisierung von CPPS-Produktionsstrukturen an neuen Standorten und für neue Märkte (*Greenfield*)
- Um die angestrebte Führungsrolle im Bereich CPPS nachhaltig auszufüllen, müssen **vorrangig Forschungs-, Technologie- und Qualifikationsentwicklungen** in folgenden Bereichen initiiert werden:
  - Entwicklung von Methoden und Beispielapplikationen im Bereich der automatisierungstechnischen Modellierung und Systemoptimierung, insbesondere unter Nutzung von KI-Methoden (Künstliche Intelligenz)
  - Nutzung und Weiterentwicklung der technischen Infrastruktur einschließlich leistungsfähiger Breitbandinformationsübertragungen
  - Ausbildung und Qualifizierung von Fachpersonal; Entwicklung von maßgeschneiderten, leistungsfähigen Organisationskonzepten für komplexe Arbeitszusammenhänge (Geschäftsverständnis, Produktentwicklung, Produktionssysteme einschließlich interdisziplinärer Kollaboration und Kooperation)
- Eine weitere wichtige Aufgabe ist, die **Technologien zu nutzen, um neu entstehende Wertschöpfungsnetze zu gestalten**. Dies beinhaltet
  - auf den verschiedenen Informationsebenen angepasste Systeme zur Datensicherheit und zum *Know-how*-Schutz zu entwickeln und einzusetzen sowie
  - neuer Geschäftsmodelle zu entwickeln, insbesondere die Produkte mit geeigneten Dienstleistungen zu verknüpfen.

### 3.2 Leitmarktperspektive

Leitmärkte für CPPS können sowohl durch die produzierenden Unternehmen in Deutschland als auch durch globale Produktionsmärkte realisiert werden. Insbesondere die im Abschnitt 4.1 adressierten Leitanbieter sind mit den eigenen Fertigungen, wenn hier CPPS realisiert sind, Repräsentanten von Leitmärkten.

Um Leitmärkte neu zu gestalten und erfolgreich zu bearbeiten, werden sowohl eine enge Vernetzung von an verschiedenen Standorten angesiedelten Teilen eines Unternehmens als auch insbesondere Kooperationen über Firmengrenzen hinweg erforderlich. Dies erfordert wiederum, dass eine logische Durchgängigkeit der verschiedenen Lebenszyklen bezogen auf das Produkt, Produktprogramm und die zugehörigen Produktionssysteme bestehen muss. Die Voraussetzungen und den Gestaltungsrahmen hierfür schaffen CPPS.

Eine Notwendigkeit und gleichzeitig eine besondere Herausforderung ist es, **in diese neu zu gestaltenden Wertschöpfungsnetze gleichzeitig heute schon global agierende Großunternehmen wie auch häufig noch regional agierende Klein- und Mittelstandsunternehmen (KMU) einzubinden**. Die heute vorhandene Stärke der produzierenden Industrie basiert wesentlich auf einer ausgewogenen Industriestruktur, die aus einer Vielzahl mittelständischer Unternehmen und in der Anzahl weniger Großunternehmen besteht. Viele KMU sind aber auf diesen Strukturwandel noch nicht vorbereitet, sei es aufgrund fehlender Fachkräfte oder aufgrund einer gewissen Zurückhaltung und Skepsis gegenüber einem noch unbekannten Technologieansatz.

Diese Hemmungen müssen überwunden werden, um die Strukturstärke aus Mittelstand und Großunternehmen auch weiterhin zu nutzen (s. dazu auch die Empfehlungen der Agenda CPS, 2012<sup>7</sup>).

Ein Schlüsselansatz zur Integration mittelständischer Unternehmen in globale Wertschöpfungsnetze ist, **einen auch in die Breite ausgerichteten Wissens- und Technologietransfer zu konzipieren und zu realisieren**. Beispielhaft können hier Pilotanwendungen und *Best Practice*-Realisierungen in der Vernetzung von Groß- und Mittelstandsindustrie helfen, die Potenziale vernetzter Wertschöpfungsketten sichtbar zu machen und auch den Mittelstand zu überzeugen, Methoden- und Organisationswerkzeuge sowie Technologien von Leitanbietern zu nutzen. Auf diese Weise werden Barrieren für mittelständische Unternehmen abgebaut, die Methoden von CPPS kennenzulernen, sie anzunehmen und im eigenen Unternehmensumfeld einzusetzen.

7 S. acatech POSITION agenda CPS (2011): Kapitel 6.5 Schlüsselrolle des Mittelstands für *Cyber-Physical Systems*: „[...] Neben vereinfachtem Zugang zu Forschungsprojekten sind weitere Maßnahmen für die Stärkung von KMUs in Unternehmensnetzen zu *Cyber-Physical Systems* erforderlich. Das betrifft Rahmenbedingungen, Organisationsmodelle und Netzwerke. Plattformen und Verbundprojekte sind zu schaffen, die gezielt den Mittelstand einbinden“, S. 33.

### 3.3 Die duale Strategie (CPPS Strategie) und ihre kennzeichnenden Merkmale

Im Einzelnen kann die Leitmarktperspektive in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Leitmärkte für CPPS werden durch die produzierenden Unternehmen im In- und Ausland einschließlich der beteiligten Wertschöpfungsnetzwerke gestaltet.
- Um erfolgreich Leitmärkte zu gestalten und zu bedienen, wird es zukünftig notwendig sein, **Vernetzungen über verschiedene Firmen und digitale Durchgängigkeit über die verschiedenen Lebenszyklen von Produkten und Produktionssystemen zu realisieren**. Dies ist ein originäres Ziel von CPPS.
- Ein Erfolgsfaktor für die Anwendung von CPPS in der produzierenden Industrie Deutschlands ist, **Methoden und Wege zu finden, die mittelständische Industrie beim Aufbau und beim Betrieb von CPPS frühzeitig einzubinden**.
- Um Leitmarktstrukturen aufzubauen, muss eine geeignete **Dateninfrastruktur** realisiert werden. Der schnelle und sichere Austausch großer Datenmengen ist eine Grundvoraussetzung.

Die Zielsetzungen von Industrie 4.0 werden nur dann optimal erreicht, wenn sowohl die Potenziale der Leitanbieterperspektive als auch jene der Leitmarktperspektive aufeinander abgestimmt und in einer Symbiose zusammengeführt werden. Dies wird im Folgenden als **duale Strategie** bezeichnet. Zusammenfassend können die folgenden grundsätzlichen Charakteristika einer **dualen CPPS-Strategie** genannt werden, in der die Technologien und Anwendungen von CPPS evolutionär weiterentwickelt werden, was in seiner Gesamtheit aber eine Revolution zur Folge haben wird (s. dazu auch Kap. 2.2):

- Aufbau von Wertschöpfungsketten und Wertschöpfungsnetzwerken über Firmengrenzen hinweg; dies wird im Folgenden als **horizontale Integration** bezeichnet.
- Aufbau und Realisierung von flexiblen und rekonfigurierbaren Produktionssystemen innerhalb eines Unternehmens; dies wird im Folgenden als **vertikale Integration** bezeichnet.
- Digitale **Durchgängigkeit des Engineerings** über den gesamten Lebenszyklus des Produkts und des zugehörigen Produktionssystems

Die zuvor genannten Merkmale sind wichtige Befähiger (*Enabler*) für die produzierende Industrie, um in einem Marktgeschehen mit hoher Volatilität stabile Unternehmenspositionen zu realisieren und außerdem die eigene Wertschöpfung auf sich ändernde Marktanforderungen flexibel anzupassen. Die Merkmale dieser dualen CPPS-Strategie versetzen produzierende Unternehmen in die Lage, in einem dynamischen Marktumfeld schnell, termintreu, fehlerfrei und zu Marktpreisen zu produzieren. Durch die strategische Entwicklung und Ertüchtigung der Ausrüsterindustrie dürfen **folgende Zusatznutzen** erwartet werden:

- Aus der führenden Position Deutschlands in der Ausrüsterindustrie heraus erfolgt eine konsequente Weiterführung und -entwicklung in den Bereich der Internettechnologien.
- CPPS-Leitanbieter ertüchtigen deutsche Unternehmen, insbesondere den Mittelstand, Zukunftstechnologien zu entwickeln, Marktpositionen auszubauen und Beschäftigung am Standort Deutschland zu erhalten.
- CPPS-Leitanbieter exportieren neben Teillösungen CPPS-Fabriken der Zukunft (*Smart Factories*).
- Durch horizontale Integration sind auch mittelständische Zulieferer in diesen Exportpfad eingebunden.
- Deutsche produzierende Unternehmen nutzen das gewonnene *Know-how* und Zeitvorteile zur Festigung und zum Ausbau der eigenen Wettbewerbsposition.

- Die deutsche Ausrüsterindustrie wendet pilotartig CPPS in nationalen Märkten an und realisiert so Applikationsanwendungen in nationalen Märkten. Dies steigert die Sichtbarkeit und das *Image* der deutschen Industrie.

Eine duale CPPS-Strategie ist von **drei zentralen Merkmalen** gekennzeichnet, die im Folgenden ausgeführt werden: die horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke, die vertikale Integration und Vernetzung der Produktionssysteme und die Durchgängigkeit des *Engineerings* über den gesamten Lebenszyklus.

### 3.3.1 HORIZONTALE INTEGRATION ÜBER WERTSCHÖPFUNGSNETZWERKE

Modelle, Konzeptionen und Realisierungen zur horizontalen Integration über Wertschöpfungsnetzwerke widmen sich der Beantwortung der Hauptfrage:

**Wie können die Geschäftsstrategie eines Unternehmens und neuartige Wertschöpfungsnetze sowie vollständig neue Geschäftsmodelle nachhaltig durch CPPS unterstützt werden?**

Bei der Bearbeitung dieses Forschungs-, Entwicklungs- und Anwendungskomplexes müssen folgende Einzelaspekte berücksichtigt werden:

- Eine Vernetzung über Unternehmensgrenzen hinweg berührt rechtliche Fragen, Haftungsfragen, Fragen des Exports und auch des *Risk Managements*. Durch Wechselwirkungen treten bei der Vernetzung oft emergente Gesamteffekte auf, auf die in kurzer Zeit durch geeignete Maßnahmen reagiert werden muss.
- Auf Basis des Produktprogramms und der Geschäftsstrategie beziehungsweise neuer Geschäftsmodelle ist es besonders wichtig, die eigene Marktposition (*Scale- / Scope-Orientierung*), Fragen des *In- und Outsourcings* zusammen mit den relevanten Fragen des *Know-how*-Schutzes sauber zu definieren.
- Bei horizontaler Integration von Wertschöpfungsketten gewinnen Fragen zur optimalen Bündelung von Sach- und Dienstleistungen sowie Qualifikationen und Wissen über Unternehmensgrenzen hinweg eine besondere Bedeutung.
- Das *Monitoring* und *Feedback* produktionsrelevanter Daten (Fabrik, Betriebsdaten, Logistik, *Outsourcing* etc.) muss konzipiert und prozesssicher realisiert werden.

- Die Festlegung und auch die dynamische Anpassung der gesamten Geschäfts- und Herstellungsprozesse von der Bereitstellung bis zur Lieferung müssen im Vorfeld konzipiert und realisiert werden. Beispielsweise können hier Fragen der Lieferzeit und Liefertreue, der Produktqualität und -haftung, umwelt- und ressourcenrelevante Fragestellungen, Preis etc. als signifikante Kriterien adressiert werden. Bei gleichzeitiger Vernetzung mit kundenspezifischen Forderungen und der kundenbezogenen Einbindung in den Gesamtprozess sind *Designfragen*, Konfiguration, Planung, Produktion und dynamische Anpassung von Produktionskapazitäten und Produktionsfähigkeiten (wandelbare Fabrik) und Logistik (selbstorganisierende, adaptive Logistik) im Bedarfsfall zu berücksichtigen.
- Der Schutz des eigenen *Know-hows* (*Security, Knowledge Management*) gegenüber vernetzten Partnern und auch gegenüber der Außenwelt muss gewährleistet sein.
- Unternehmensstrategische Fragen, wie die nach Ressourceneffizienz, nachhaltiger Produktions- und Wirkungsgradsteigerung, Energieeffizienz, *Life Cycle Design*, Qualifikations- und Personalentwicklung etc., müssen unternehmensindividuell berücksichtigt werden können.

### 3.3.2 VERTIKALE INTEGRATION UND VERNETZTE PRODUKTIONSSYSTEME

Bei der vertikalen Integration steht die Beantwortung der Frage im Vordergrund:

**Wie können Produktionssysteme unter Nutzung von CPPS flexibel und rekonfigurierbar gestaltet werden?**

Der Gestaltungsrahmen der vertikalen Integration ist im Allgemeinen die Fabrik, die Produktionsstätte. Hieraus leitet sich auch der synonym verwendete Begriff *Smart Factory* ab. Das allgemeine Kennzeichen einer *Smart Factory* ist, dass die Produktionsstrukturen nicht von vorneherein konkret und fest vorgegeben werden.

Stattdessen werden Konfigurationsregeln definiert, aus denen fallspezifisch und automatisiert eine konkrete Struktur (Topologie) samt allen damit verbundenen Abhängigkeiten in Bezug auf Modelle, Daten, Kommunikation und Algorithmen abgeleitet wird.

Im Einzelnen können folgende Aspekte wichtig sein:

- Digitale Durchgängigkeit von Aktor- und Sensorsignalen über verschiedene Ebenen bis zur ERP-Ebene (zum Beispiel Skalierbarkeit respektive Detailtreue in den Abstraktionsebenen, Echtzeitreaktionen, dynamische Anpassung von Modellen anhand von Ist-Daten, Auswertung und Abgleich von Modellen an Ist-Zuständen etc.)

- Modularisierung und Wiederverwendung (zum Beispiel Rekonfigurierbarkeit, Kategorisierung und Systematisierung von Modelltypen, Aufbau von Klassifizierungskonzepten, Interoperabilität, Standardisierung und Normung etc.)
- Vernetzung und Rekonfiguration von Produktionsumgebungen (etwa intelligente Anlagenfähigkeitsbeschreibungen, flexible Vorgabe von System-Zielen, Lernfähigkeit, Ad-hoc-Vernetzung, *plug&produce*, Selbstorganisation von Produktionssystemen einschließlich Determinismus und Robustheitsbewertung etc.)
- Unterstützung der Beschäftigten in der Produktion (Nachvollziehbarkeit von Ereignissen und Entscheidungen, Auslegung von Regulierungsfunktionen)
- Berechnungen und Bewertungen der *End-to-End-Performance* (Gesamtdurchsatz, Gesamtanlageneffektivität (OEE), Energie- und Ressourcenverbrauch etc.)
- Berücksichtigung und Implementierung der notwendigen Sicherheits- und Arbeitsschutzmaßnahmen

### 3.3.3 DURCHGÄNGIGKEIT DES ENGINEERINGS ÜBER DEN GESAMTEN LEBENSZYKLUS

Die angestrebte digitale Durchgängigkeit des gesamten *Engineering*s und damit Verschmelzung der digitalen und realen Welt über den Lebenszyklus eines Produkts über Firmengrenzen hinaus und auch unter Einbeziehung von Kundenforderungen wirft folgende Hauptfrage auf:

**Wie können die Geschäftsprozesse einschließlich des *Engineering Workflows* mithilfe von CPPS durchgängig gestaltet werden?**

Dazu sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Durchgängigkeit über alle unterschiedlichen Lebenszyklen (beispielsweise *Product-Lifecycle-Management*, Produktionssystem-*Lifecycle-Management*-Konzepte, Werkzeugunterstützung, Abstraktion / Verfeinerung etc.)
- Disziplinübergreifende Zusammenarbeit und Unternehmensbereich-überschreitendes Zusammenwachsen der digitalen und realen Welt (beispielsweise *Virtual Systems Engineering*, Entwicklungsmethoden, Anforderungsermittlung und Architekturentwurf, frühzeitige Validierung / Verifikation beispielsweise durch Simulation, Skalierbarkeit und Detailtreue etc.), um die im Engineering notwendige Kreativität der Beschäftigten nachhaltig zu unterstützen
- Qualifizierung und Unterstützung des involvierten Fachpersonals bei der Entwicklung und beim *Engineering* (beispielsweise Werkzeugunterstützung, Verständlichkeit und Einfachheit, Mensch-Maschine-Kommunikation im Sinne von Knowledge based Engineering etc.)
- Erhaltung des Werts der installierten Basis (beispielsweise Migration, unterschiedliche Innovationszyklen in der digitalen und realen Welt etc.)
- Berücksichtigung unterschiedlicher strategischer Potenzialtreiber (beispielsweise in der Entwicklung von Produkten die höhere Flexibilität durch mehr Virtualität statt Prototypenbau, in der Produktion niedrigere Betriebskosten durch Fehlervermeidung und Betriebsunterstützung, im Anlagen-Engineering kürzere Projektlaufzeiten und bessere Risikobeherrschung durch verbesserte Projektabwicklungssystematiken etc.)

**Kernaussage:** Mit CPPS werden **vertikale und horizontale Wertschöpfungsnetzwerke realisiert**, in denen Dienstleistungen, das *Engineering*, die Produktion, die Logistik sowie die Vermarktung und Einbindung von Kundenforderungen durch den konsequenten Einsatz der Informationstechnik miteinander gekoppelt sind. Die Umsetzung des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 sollte sowohl hinsichtlich der Forschungsförderung als auch der konkreten Entwicklungs- und Umsetzungsschritte im Sinne einer dualen Strategie auf die beiden Zielsetzungen Leitmarkt und Leitanbieterschaft ausgerichtet sein.

## 4 WO LIEGT DER FORSCHUNGSBEDARF?

**Industrie 4.0 ist eines der Zukunftsprojekte der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung**, das mit insgesamt ca. 200 Millionen Euro im Rahmen des Aktionsplans der *High-Tech* Strategie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Kabinettsbeschlusses gefördert werden soll. Als Anregung und Orientierung für die Gestaltung der entsprechenden Förderprogramme durch die Ministerien hat **der Arbeitskreis Industrie 4.0 die wichtigsten mittel- und langfristigen Forschungsbedarfe aus Sicht der Wirtschaft und Wissenschaft** ermittelt. Die folgenden Forschungsbedarfe vertiefen dabei die Empfehlungen der Promotorengruppe KOMMUNIKATION, die in Form zweier Berichte (Januar und September 2011) in der Forschungsunion vorgelegt wurden. Die darin enthaltenen Empfehlungen, die Ergebnisse des BMBF-geförderten Projekts „Integrierte Forschungsagenda *Cyber-Physical Systems*“<sup>8</sup> sowie der BMWi-Studie „Das wirtschaftliche Potential des Internets der Dienste“ umzusetzen, behalten entsprechend ihre Gültigkeit. Die folgenden Forschungsbedarfe sind daher als Ertüchtigung der IKT- und KI-Basistechnologien für die Automatisierungs- und Produktionstechnik einschließlich der Weiterführung genereller Forschungsbedarfe zu sehen, gleichzeitig als Konkretisierung der Handlungsbedarfe zur Realisierung der im Vorfeld beschriebenen Szenarien in dem konkreten Anwendungsbereich „industrielle Produktion“.

<sup>8</sup> S. Forschungsempfehlungen zu CPS in der Produktion: „Der Einsatz von *Cyber-Physical Systems* in Produktionssystemen führt zur „*Smart Factory*“. Deren Produkte, Ressourcen und Prozesse sind durch *Cyber-Physical Systems* charakterisiert; durch deren spezifische Eigenschaften bietet sie Vorteile in Bezug auf Qualität, Zeit und Kosten gegenüber klassischen Produktionssystemen. Empfohlen wird, im Rahmen der 2011 gestarteten Initiative „Industrie 4.0“ ein entsprechendes Projekt aufzusetzen mit dem Ziel, technologische und wirtschaftliche Hemmnisse zu beseitigen und die Realisierung und den Einsatz von *Smart Factories* zu forcieren.“ acatech POSITION agenda CPS (2011), S. 35.

### 4.1 Leitlinien und Struktur der Handlungsempfehlungen

**Interdisziplinarität** ist eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung der durch CPPS erforderlichen „Vernetzung“ in der Produktionsforschung. Die bereichsübergreifende, interdisziplinäre Zusammenarbeit ist Befähiger (*Enabler*) für den mittelständisch geprägten Maschinen- und Anlagenbau, um schneller am Markt zu agieren und sich als Leitanbieter vieler neuer Produkte, Dienstleistungen oder Geschäftsmodelle zu etablieren. Interdisziplinarität bedeutet zudem, dass die Beschäftigten mit ihren Fähigkeiten und Erfahrungen sowohl in die kreativen Entwurfs- und Planungsprozesse als auch in das operative Arbeitsumfeld stärker eingebunden werden. CPPS erfordern daher auch neue Arbeitsstrukturen, die insgesamt die Leistungsfähigkeit der Beschäftigten fördern.

#### 4.1.1 CLUSTERING DER HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Handlungsempfehlungen sind anhand von Zeithorizonten in drei *Cluster* aufgeteilt:

**Kurzfristig:** Handlungsempfehlungen, deren Umsetzung ohne Forschungsbedarf naheliegend ist und die kurzfristig umgesetzt werden können.

Hierzu kann auf bestehende und erprobte Methoden, Werkzeuge und Technologien zurückgegriffen werden. Die Umsetzungen können direkt initiiert werden, eine Unterstützung durch Forschungsprogramme ist nicht notwendig. Die Realisierung ist innerhalb eines Jahres möglich.

**Mittelfristig:** Handlungsempfehlungen, deren Umsetzung eine branchen- oder teilspezifische Entwicklung von Methoden, Werkzeugen oder Technologien erfordert. Deshalb ist eine anwendungsnahe Forschungsförderung notwendig. Die Methoden, Werkzeuge und Technologien zur Realisierung von CPPS-Strukturen liegen zwar vor, aber die Anwendung und Realisierung ist nicht naheliegend. Die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben für die Automatisierungs- und Produktionstechnik branchenspezifisch repräsentativen Charakter oder sie zeigen exemplarisch den Weg in neue Geschäftsmodelle, Pilotanwendungen etc. Der Entwicklungs- und Anpassungsbedarf hat vorwettbewerblichen Charakter. Die Realisierungszeit beträgt zwei bis drei Jahre. Danach werden die Ergebnisse sukzessive in breite Industrieanwendungen ausgerollt.

**Langfristig:** Handlungsempfehlungen, zu deren Umsetzung umfangreiche, längerfristig angelegte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind.

Sie dienen der grundsätzlichen Befähigung von Unternehmen, sich in Leitanbieterpositionen zu entwickeln oder Leitmärkte zu gestalten. Hierzu gehören zum Beispiel die Erforschung und Validierung von Modellen und Methoden zur Einbindung des Mittelstands in horizontale und vertikale Wertschöpfungsnetze. Außerdem müssen die übergeordneten Fragen zur Sicherheit und auch zur Dateninfrastruktur nachhaltig gelöst werden. Aber auch gezielte Grundlagenforschung muss initiiert werden. Der Zeithorizont beträgt mindestens fünf Jahre.

#### 4.1.2 MOTIVATION FÜR DIE MITTEL- BIS LANGFRISTIGE FORSCHUNG IN INDUSTRIE 4.0

In Industrie 4.0 werden die revolutionären Anwendungen vorrangig durch die Kooperation der Informations-, der Kommunikations-, der Produktions- und der Automatisierungstechnik erwartet. Dabei müssen Eigenschaften derzeitiger CPS erst mittelfristig für den Einsatz in Produktionssystemen tauglich gemacht werden, womit CPS zu CPPS migrieren. Neben dem physischen Einsatz der CPS-Komponenten im Produktionssystem liegt die Stärke des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus insbesondere in den zielgerichteten kreativen Entwicklungsprozessen zur Schaffung neuer CPPS.

Die damit verbundene höhere Stufe der „Vernetzung“ aufgrund der Durchgängigkeit von Modellen des Produkts, des Produktionsmittels und des Produktionssystems birgt langfristig noch immensen Forschungs-, Entwicklungs- sowie Standardisierungsbedarf. Dazu zählen auch eine Suche nach neuartigen Geschäftsmodellen sowie die auf Basis der Vernetzungsmöglichkeit mit sozialen Netzwerken einhergehende Untersuchung möglicher Begleitumstände dieser signifikant flexibilisierten Beschäftigungsverhältnisse.

Der Schwerpunkt zukünftiger Forschungstätigkeiten verlagert sich hin zur Untersuchung und Entwicklung vollständig beschreibbarer, aber noch beherrschbarer, Kontext-abhängiger (selbsttätig) regelbarer Produktionssysteme. Diese werden langfristig aus CPS-Funktionskomponenten bestehen, die disziplinübergreifen den modularen Baukastensystemen entstammen und entweder mit Assistenzfunktionen konfiguriert werden können oder sich während der Laufzeit synergetisch in eine bestehende Infrastruktur einbinden. Dabei wird die Verflechtung von virtuell geplanten und realen Prozessen signifikant zunehmen. Aus Forschungssicht ergibt sich daher die Notwendigkeit, langfristig modularisierte CPPS zu entwickeln, die Bestandteil einer exemplarischen *Smart Factory* sind.

**Fazit:** Industrie 4.0 ertüchtigt *Cyber-Physical Systems* zur Anwendung in der produzierenden Industrie durch eine modelltechnisch, architekturell, kommunikationstechnisch und interaktionsmäßig durchgängige Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse. Damit migrieren sie zu *Cyber-Physical Production Systems (CPPS)* und finden in smarten Produktionssystemen Verwendung.



## 4.2 Konsolidierte Forschungsempfehlungen

Die nachfolgenden konsolidierten Forschungsempfehlungen sind – neben dem *Cluster* Zeithorizont – gemäß der grundsätzlichen **drei Charakteristika der dualen CPPS-Strategie** aus Kapitel 3 geclustert und primär durch die Anwendung getrieben. Zusätzlich werden die beiden *Cluster* **Menschenzentrierung** und **Technologie** der CPPS aufgenommen, die eher durch die verfügbaren **IKT-Technologien** und **CPS-Produkte** getrieben sind. Dabei ist diese Abgrenzung auf keinen Fall scharf zu sehen, da naturgemäß viele Empfehlungen mehrere Cluster betreffen.

### 4.2.1 HORIZONTALE INTEGRATION ÜBER WERTSCHÖPFUNGSNETZWERKE

In diesem Abschnitt sind Forschungsempfehlungen formuliert, um die Geschäftsstrategie eines Unternehmens und neuartige Wertschöpfungsnetze sowie vollständig neue Geschäftsmodelle nachhaltig durch CPPS zu unterstützen.

#### 4.2.1.1 GESTALTUNG VON WERTSCHÖPFUNGSNETZWERKEN UND GESCHÄFTSMODELLEN

CPPS haben das Potenzial, im Sinne einer radikalen Disruption die Industrie zu revolutionieren und somit tradierte Geschäftsmodelle abzulösen. Deshalb müssen durch entsprechende Forschungsvorhaben die möglichen geschäftlichen Bedrohungen und Konsequenzen systematisch analysiert werden und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

- Im Sinne eines „Frameworks“ ist das Themenfeld **Wertschöpfungsnetzwerke** in einer systematischen Weise im Hinblick auf Zielsetzungen, Treiber, Potenziale und Randbedingungen zu strukturieren. Dazu gehört auch eine umfassende Zusammenstellung von existierenden Beispielen, *Best-Practice*-Sammlungen und Erfahrungen aus anderen Industrien und eine Übertragung des Gedankenguts auf die Produktion **[mittelfristig]**.
- Es ist im Sinne eines übergreifenden „Frameworks“ das Thema **Geschäftsmodelle** in einer systematischen Weise zu strukturieren. Es gibt derzeit verschiedenste Ansätze dafür, allerdings sind diese oft nicht kompatibel zueinander. Ein gemeinsames Verständnis über Geschäftsmodelle ist eine zentrale Voraussetzung, um die Potenziale einer firmenübergreifenden Vernetzung nachhaltig heben zu können. Neben einer Vereinheitlichung und Konsolidierung existierender Ansätze ist ein systematisches Erfassen von *Best-Practices* und Erfahrungen, insbesondere auch aus anderen Branchen, notwendig sowie eine Übertragung auf die Produktion und Analyse der sich daraus ergebenden Konsequenzen **[mittelfristig]**.
- Es sind Methodiken zur **Analyse und Bewertung der wirtschaftlichen und technologischen Potenziale** von CPPS zu entwickeln, um Aussagen treffen zu können, unter welchen

Randbedingungen (beispielsweise im Hinblick auf Zeit, Geschäftsmodell, Branche etc.) sich der Einsatz von CPPS wirtschaftlich rechnet und unter welchen Bedingungen ein Einsatz von CPPS nicht zielführend sein könnte. Dazu sind die Voraussetzungen, Treiber und Konsequenzen von CPPS systematisch zu erarbeiten. Als Vorarbeit sollten hierzu die entsprechenden Kapitel und Abschnitte aus der Agenda CPS (2012) genutzt werden. **[mittelfristig]**.

- Neben einer systematischen Erarbeitung ist eine **umfassende Pilotierung** der erarbeiteten Konzepte notwendig, um die Themen wie (neue) Geschäftsstrategien, Geschäftsmodelle, Geschäftsprozesse unter stärkerer Einbeziehung von Kunden, Lieferanten, Partnern und Markt unter praktischen Gesichtspunkten zu beleuchten. Dazu sollten für die konkreten Beispiele *Business*-Pläne erstellt und Erfahrungen bezüglich einer „Orchestrierung“ gesammelt werden, was dann auch in Form von (zukünftigen) Anforderungen an CPPS als Plattform zur Unterstützung von Wertschöpfungsnetzwerken veröffentlicht werden sollte **[mittelfristig]**.
- Der Austausch und die Zusammenarbeit mit dem Querschnittsthema „**Geschäftsmodellinnovationen**“ der Forschungsunion wird empfohlen, um Synergieeffekte zu nutzen **[kurzfristig]**.

#### 4.2.1.2 GESTALTUNG UND SCHUTZ DES EIGENEN WISSENS

Das eigene Wissen ist von zentraler Bedeutung für ein Unternehmen. CPPS ermöglichen eine neue Dimension der Formalisierung von Wissen. Deshalb müssen adäquate, zuverlässige und wirtschaftliche Lösungen für den Schutz von Wissen entwickelt und etabliert werden. Die Promotorengruppe „Sicherheit“ der Forschungsunion erarbeitet dazu im Rahmen ihres Zukunftsprojekts „Sichere Identitäten“ übergreifende Handlungsempfehlungen; die Verzahnung zwischen Industrie 4.0 und diesem weiteren Zukunftsprojekt wird daher nachdrücklich empfohlen.

- Im Sinne einer **Wissens-Landkarte** sollte das im Kontext von CPPS relevante Wissen zusammengetragen und kategorisiert werden, um darauf aufbauend verschiedene Bedrohungsszenarien und Möglichkeiten für die unterschiedlichen Arten von Wissen bezüglich Schutz beziehungsweise Management des Schutzes zu erarbeiten. Dabei sind gesetzliche und technische Randbedingungen, wie beispielsweise bei sicherheitskritischen Systemen die Offenlegung durch Sicherheitsnachweise, zu berücksichtigen. Es sind dazu auch *Best Practice-Communities* und Erfahrungsaustausche anzustoßen **[mittelfristig]**.
- Besondere Bedeutung kommt der Gestaltung des **Wissens über Produktionssysteme** zu. Hier sind insbesondere Fragen der Durchgängigkeit und Vollständigkeit von Wissensmodellen

über den gesamten Lebenszyklus sowie die Konsistenz zwischen der digitalen und realen Welt zu adressieren **[mittelfristig]**.

- Um das stetige Wachstum von Produktpiraterie und den Diebstahl geistigen Eigentums einzudämmen, müssen das Kopieren und das *Reverse-Engineering* von CPS- und CPPS-Produkten verhindert werden. Einen Forschungsaspekt sollte daher die Entwicklung **technischer Konzepte** für Kapselung und Schutz (zum Beispiel Plagiate, Gütesiegel, Echtheitszertifikate) von Wissen und Information bilden. Neben eindeutigen und sicheren Produktidentitäten, wie **digitale Typenschilder** und Wissensmodelle für den maschinellen Austausch von Fähigkeiten und Funktionalitäten, sind die Themen *Industrial IT-Security*, Verschlüsselungsmechanismen sowie „*Embedded Security*“ zum Schutz vor Produktpiraterie zu erforschen (s. dazu auch Bericht der Promotorengruppe Sicherheit) **[mittelfristig]**.
- Neben der Entwicklung von Methoden und Technologien ist die **praktische Erprobung** in Form von geeigneten Pilotierungen notwendig, wo die entwickelten Konzepte prototypisch in Form von Algorithmen, Applikationen und Fallstudien implementiert werden **[mittelfristig]**.
- Darüber hinaus sollten aber auch mögliche **neue Konzepte und Verfahren** zum Schutz von Wissen erforscht werden **[langfristig]**.

#### 4.2.1.3 STANDARDISIERUNG

Erst über ein gemeinsam getragenes, technisches und betriebswirtschaftliches Verständnis, das sich in entsprechenden Schnittstellen und Standards manifestiert, ist eine branchenweite Vernetzung von Industrie- und Logistikunternehmen möglich. Dieses Bewusstsein einschließlich der damit verbundenen Konsequenzen ist zu schaffen und gemeinsam zu gestalten.

- Es muss *bottom-up* die Diskussion einer **Standardisierungsstrategie** für Industrie 4.0 initiiert werden. Im Verlaufe dieses Prozesses müssen bereits existierende Ansätze zur Standardisierung (nicht nur Technologien wie Identifikationskonzepte, sondern auch mechatronische wie etwa funktionale Betrachtungen, Prozesse und *Workflows*, *High-level-Architekturen* etc.) im Hinblick auf Verwendbarkeit im Kontext von CPPS analysiert und bewertet werden. Daraus sollte eine Roadmap bezüglich der Umsetzung abgeleitet werden (welche vorhandenen Normen / Richtlinien sind anwendbar beziehungsweise anzupassen, wo ist Handlungsbedarf bezüglich neuer Aktivitäten). Zu berücksichtigen sind dabei insbesondere auch Aufwand-Nutzen-Betrachtungen sowie der Aspekt der zeitlichen Umsetzung (s. hierzu auch die Empfehlungen zur Standardisierung in der Agenda CPS, S.31 und 32) **[kurzfristig]**.

- Im Sinne einer „*top-down*“-Institution sollte ein **Industrie 4.0-Arbeitskreis Standardisierung** eingesetzt werden, der offen und transparent organisiert ist und der aus einer ganzheitlichen Betrachtung heraus ein *Big Picture* der Standardisierung moderiert, Empfehlungen (beispielsweise bezüglich Migration) ausspricht, über Branchen- und Projektgrenzen hinweg Standardisierungsaktivitäten evaluiert und kommuniziert sowie durch Innovationsübertragung weitere Innovationen stimuliert. Wichtig ist dabei auch die Diskussion einer sinnvollen Grenze zwischen Standardisierung und Individualität sowie die Frage der beteiligten *Stakeholder* bei der Schaffung und Nutzung von Standards sowie gegebenenfalls Lizenzmodellen **[kurzfristig]**.

#### 4.2.1.4 SICHERSTELLUNG DER NACHHALTIGKEIT (SUSTAINABILITY)

Neben dem Erhalt (und der Erhöhung) des Wertes einer installierten Basis im Umfeld von CPPS muss bereits heute bei Produktionssystemen neben der Produktivität auch die **Ressourceneffizienz** als gleichrangig berücksichtigt werden. Besonders wichtig ist aber das ganzheitliche Denken in balancierten Kreisläufen, das den Einsatz von CPPS zukünftig leiten und prägen sollte.

- Der Aspekt der **Werterhaltung der installierten Basis von Produktionsanlagen** (diskret, kontinuierlich oder in der Kombination) muss betrachtet werden. Zukünftig werden zumindest in Europa meist existierende Produktionssysteme zu modernisieren sein, wo man insbesondere die deutlich unterschiedliche Länge der Innovationszyklen in der digitalen und realen Welt berücksichtigen muss. Dazu sind geeignete Strategien und Konzepte zu erarbeiten **[mittelfristig]**.
- Die Potenziale der **Ressourceneffizienz, Produktivitäts- und Wirkungsgradsteigerung**, Energieeffizienz, Energiebetrachtung wie das Vermeiden von Energiespitzen, *Material Lifecycle Assessment*, *Recycling* etc. müssen konsequent ausgeschöpft werden. Dabei ist unter Nutzung von CPPS das Gesamtoptimum bezüglich Produktivität und Wirkungsgrad einschließlich Ressourceneffizienz zu betrachten. Notwendig sind die Entwicklung entsprechender Methoden und Konzepte sowie die Pilotierung durch prototypische Umsetzungen **[mittelfristig]**.
- Neben dem verstärkten Betrachten neuer Recyclingstrategien, wie beispielsweise eine „saubere“ Rückgewinnung von seltenen Erden, ist insbesondere ein ganzheitliches **Denken in balancierten übergeordneten Zyklen** bezüglich Material und Energie notwendig. Dies wird einerseits verstärkt Auswirkungen auf ein ressourcenschonendes, montagegerechtes und neuartiges Design künftiger Komponenten in Produktionsumgebungen haben, andererseits steht eine ökologische Gesamtbetrachtung (*CO<sub>2</sub>-Footprint*, *Sustainability-Index* usw.) im Mittelpunkt des Handelns. Dies wird sich insbesondere auch



positiv auf die Außenwahrnehmung eines Unternehmens in der Gesellschaft und am Arbeitsmarkt auswirken. Die Entwicklung und Einführung material- und energieeffizienter Technologien ist in der Breite zu forcieren **[langfristig]**.

#### 4.2.2 VERTIKALE INTEGRATION UND VERNETZTE PRODUKTIONSSYSTEME

Hier sind Forschungsempfehlungen adressiert, um Produktionssysteme unter Nutzung von CPPS flexibel und rekonfigurierbar zu gestalten.

##### 4.2.2.1 PRODUKTIONSRELEVANTE ENTWICKLUNG LOKAL ODERGLOBAL VERNETZTER UND ECHTZEIT FÄHIGER SENSOREN / AKTOREN

Durch CPPS ist eine signifikante Steigerung von zusätzlicher Sensorik aber auch neuer Aktorik in Produktionssystemen zu erwarten. Die damit verbundenen Herausforderungen sind sowohl wirtschaftlich als auch algorithmisch und informationstechnisch zu lösen.

- Es müssen Forschungsbestrebungen in Bezug auf eine **Ad-hoc-Verteilung und Vernetzung von Sensorik** initiiert werden. Dabei sollte unter anderem die Eigenparametrierung und -diagnose durch die Erkennung von kontextbehafteten Zusammenhängen im Vordergrund der Betrachtungen stehen. Außerdem ist die Untersuchung einer bildgestützten Auswertung in der Produktion zu forcieren **[mittelfristig]**.
- Ein weiterer Schwerpunkt sollte die systematische **Bestimmung von Lebensdauermodellen** bilden sowie die damit einhergehende Dynamisierung von Modellen der Simulation auf Basis von Messungen in der realen Produktion. Dies gilt sowohl für eine Komponente eines CPPS als auch für eine Ansammlung von Komponenten eines CPPS innerhalb eines smarten Produktionssystems **[mittelfristig]**.
- Softwareseitig müssen neben der Informationserfassung durch Sensoren insbesondere **Algorithmen und Methoden zur Informationsfilterung und -aufbereitung beziehungsweise zur intelligenten Verarbeitung** (Fusion) und zu deren expliziter Einbettung in standardisierte Frameworks entworfen werden.  
  
Dabei ist insbesondere die Einbringung erprobter Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) in die industrielle Automatisierungstechnik erforderlich zwecks Auswertung einer Vielzahl skalarer und komplexer Sensoren und ihrer Verdichtung zu höherwertigen Aussagen **[mittelfristig]**.
- Bezogen auf den kooperativen Arbeitsaspekt sollte auch die aktuatorisch unterstützte Assistenz des Beschäftigten im Vor-

dergrund stehen. Hier könnte die anwendungs-orientierte Forschung zu einer **neuen Generation von Leichtbaurobotern** führen. Diese ermöglichen beispielsweise, dass Fachkräfte gefahrlos arbeiten und sie als „Dienstleister“ unter deren Leitung zusätzliche dynamisch adressierbare Hilfen anbieten. Dabei wird ein menschenähnliches Reaktionsverhalten gefordert, um eine enge Zusammenarbeit als robuster Assistent zu gewährleisten **[mittelfristig]**.

##### 4.2.2.2 MODULARISIERUNG UND WIEDERVERWENDUNG

Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit von CPPS können nur erreicht werden, wenn den Produktionssystemen, die heute Unikate sind, zukünftig eine stringente Modularisierung zugrunde liegt und daraus eine systematische Wiederverwendung resultiert. Entscheidend ist, dass auch bei der Modularisierung und Wiederverwendung die Interdisziplinarität ein führendes Architekturprinzip ist.

- Wichtig ist in diesem Zusammenhang, disziplinübergreifend eine Bestandsaufnahme und damit einhergehende **Begriffsklärung** im Hinblick auf Modularität und Wiederverwendung durchzuführen. In den verschiedenen Disziplinen gibt es vielfältige disziplinspezifische Konzepte (Plattformen, Produktlinien, Baukästen etc.), die aber weder begrifflich noch konzeptionell disziplinübergreifend kompatibel sind. In diesem Prozess müssen in Hinblick auf die Klassifizierung und die während der Nutzung angestrebte Wandelbarkeit beziehungsweise Rekonfiguration alle Konzepte möglichst breit berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sollten in geeigneten Richtlinien dokumentiert werden, aber auch in die Lehre einfließen **[mittelfristig]**.
- Es sind **Konzepte, Methoden und Richtlinien** (im Sinne von Empfehlungen) zur Modularisierung zu erarbeiten. Neben einer Systematisierung und Typisierung sind Kriterien notwendig, um Modularisierungs- und Wiederverwendungskonzepte qualitativ, quantitativ sowie technisch als auch betriebswirtschaftlich zu bewerten. Flankierend dazu sollten *Best Practices* gesammelt und Erfahrungsaustausche angestoßen werden **[mittelfristig]**.
- Unter dem Gesichtspunkt der Automatisierung von Produktionsanlagen hat das Thema der **Dezentralisierung** eine besondere Bedeutung. Es ist wichtig zu verstehen, wo in einem konkreten Fall das „Optimum“ einer Dezentralisierung aus technischer und betriebswirtschaftlicher Sicht liegt. Übergeordnetes Ziel ist eine Interoperabilität zwischen unterschiedlichen beziehungsweise heterogenen *Engineering*- und Steuerungs- beziehungsweise kontinuierlichen und diskreten Regelungssystemen, wobei sich die Abhängigkeiten zur Laufzeit dynamisch verändern können **[mittelfristig]**.
- Die Konzepte und Methoden sind in **praxisrelevanten Anwendungsfällen** zu erproben, um so einen *Proof of Concept* zu erbringen **[mittelfristig]**.

#### 4.2.2.3 INTELLIGENZ, FLEXIBILITÄT UND WANDLUNGSFÄHIGKEIT

Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit erfordern, die im Folgenden spezifizierte Intelligenz eines Produktionssystems auf einer „höheren (Modell-) Ebene“ zu betrachten. Um die damit verbundenen Potenziale zu heben und diese Aspekte in der Praxis einsetzen zu können, müssen sie zunächst verstanden, dann angewandt und schließlich auch beherrscht werden.

- Neben den Potenzialen zukünftiger flexibler und wandlungsfähiger Produktionssysteme sind auch ganzheitlich die genauen **Anforderungen einschließlich der Treiber** an zukunftsweisende, wandelbare CPPS zu ermitteln und zu bewerten. Aus dieser Bewertung sind die treibenden architekturellen Merkmale wandelbarer CPPS in einer ganzheitlichen Sicht zu ermitteln **[mittelfristig]**.
- Flankierend zu einer systematischen Anforderungserhebung sind ausgewählte **Prototypen, Pilotanwendungen und Fallbeispiele** zu erstellen und zu bearbeiten, um frühzeitig ein Feedback aus der Praxis in die Weiterentwicklung der Methoden und Technologien einfließen zu lassen **[mittelfristig]**.
- Flexibilität und Wandelbarkeit erfordern aus der IKT angepasste beziehungsweise neue **Methoden, Konzepte und Beschreibungsmittel** in Form intelligenter Anlagen (fähigkeits-) beschreibungen, um flexibel die Vorgabe von Systemzielen formulieren zu können und dabei die Aspekte Lernfähigkeit und Ad-hoc-Vernetzung sowie *plug & produce* zu berücksichtigen **[langfristig]**.
- Zudem erfordern Flexibilität und Wandelbarkeit neue **Strategien** und **Algorithmen**. Dies betrifft optimierte Steuerungsstrategien für wandelbare Produktionssysteme, insbesondere unter den Aspekten der Dezentralisierung, der (Re-) Konfiguration und der Ad-hoc-Vernetzung. Letztendlich muss durch geeignete „Intelligenz“ die *End-to-end Performance* sichergestellt werden – und zwar nicht nur innerhalb eines Unternehmens, sondern über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk hinweg **[langfristig]**.
- Langfristig sind belastbare Antworten darauf notwendig, wie **emergente Gesamteffekte beherrscht** werden können (s. Kapitel 4.3). Es sind die verschiedenen Einflussfaktoren (etwa Komplexität und Dynamik, Selbstorganisation, Kognition, Lernfähigkeit etc.) und Anforderungen (wie Stabilität, Robustheit, Determinismus, Nachvollziehbarkeit, Zertifizierung, *Security* etc.) systematisch zu erfassen und im Hinblick auf mögliche Konsequenzen umfassend zu erforschen **[langfristig]**.

#### 4.2.3 DURCHGÄNGIGKEIT DES ENGINEERINGS ÜBER DEN GESAMTEN LEBENSZYKLUS

Hier sind die Forschungsempfehlungen adressiert, um Geschäftsprozesse einschließlich des *Engineering Workflows* mithilfe von CPPS durchgängig zu gestalten.

**Fazit:** Langfristig werden **produktlebenszyklusübergreifende Wissensmodelle**, die auch **interdisziplinäre Zusammenhänge** und die Automatisierungstechnik berücksichtigen, für den kreativen, den maschinellen sowie den menschenzentrierten Informationsaustausch benötigt.

#### 4.2.3.1 CO-MODELLIERUNG – BIDIREKTIONALE MODELLIERUNG DER REALEN UND VIRTUELLEN PRODUKTION

Das technische Verschmelzen der digitalen und physischen Welt verfolgt insbesondere zwei Ziele: Im Sinne von Planungsmodellen ermöglicht es, die kreative Wertschöpfung von Ingenieuren transparent zu machen und schafft damit die Grundlage, komplexe Systeme überhaupt erstellen zu können. Außerdem ermöglicht es, mithilfe von Erklärungsmodellen komplexe Systeme zu analysieren beziehungsweise *Design*-Entscheidungen von Ingenieuren zu validieren. **Über die Planungsmodelle hat also die digitale Welt signifikanten Einfluss auf das Design der realen Welt, über die Erklärungsmodelle hat umgekehrt die reale Welt Einfluss auf die Modelle der digitalen Welt.** Benötigt wird hierzu ein wissenschaftliches Fundament im Sinne einer produktionstechnischen Modellierungstheorie für den Maschinen- und Anlagenbau.

- Das Thema „**Modellierung technischer Systeme**“ ist in seiner **Begrifflichkeit** und in einem disziplinübergreifenden Ansatz zu systematisieren. Neben einem Abgleich der unterschiedlichsten Begriffe ist eine Erläuterung anhand von *Use Cases* beziehungsweise Szenarien sinnvoll. Darauf aufbauend muss ein Instrumentarium geschaffen werden, um verschiedene Treiber für eine Modellierung gemeinsam diskutieren zu können (etwa in der Entwicklung von Produkten höhere Flexibilität durch mehr Virtualität statt Prototypenbau, in der Produktion niedrigere Betriebskosten durch Fehlervermeidung und Betriebsunterstützung, im Anlagen-*Engineering* kürzere Projektlaufzeiten und bessere Risikobeherrschung durch verbesserte Projektabwicklungssystematiken). Um die nächste Generation Ingenieure geeignet vorzubereiten, sind die Ergebnisse sowie die Begrifflichkeiten ebenfalls in der Ausbildung sowie in der produktionstechnischen Lehre disziplinübergreifend aufzunehmen **[mittelfristig]**.
- Es sind bewährte Beschreibungsmittel und Methoden einschließlich damit verbundener Basistechnologien aus der Informatik im Hinblick auf einen breiten Einsatz in den Ingenieurwissenschaften zu ertüchtigen. Es bietet sich an, die **Automatisierung als Mittler** zwischen den verschiedenen Welten zu stärken, da sie die erforderliche Interdisziplinarität verinnerlicht hat. Darauf aufbauend können sowohl *Software*-Basiswerkzeuge interdisziplinär weiterentwickelt werden als auch disziplinübergreifend moderierend agieren **[mittelfristig]**.
- Es ist eine wissenschaftlich fundierte **Modellierungstheorie** zur Modellierung technischer Systeme zu entwickeln. Wichtige Elemente dieser Theorie sind eine definierte Semantik, die Formalisierung von Konzepten wie Abstraktion, Durchgängigkeit, Perspektiven, Aspekte, Abhängigkeiten, Typ-Instanz, Meta-Modellierung etc. Diese Theorie muss die Grundlage bilden, um Fragestellungen fundiert beantworten zu können,

etwa „Was sind gute Modelle?“, „Wie findet man die passenden Modelle?“, „Was kann in der digitalen und was in der realen Welt realisiert werden (etwa zusätzlicher physischer Sensor versus intelligente Auswertung bestehender Sensorik)?“

**[langfristig]**.

#### 4.2.3.2 ENTWICKLUNGSMETHODIK ZUR DISZIPLINÜBERGREIFENDEN ZUSAMMENARBEIT

Um digitale Modelle zielgerichtet einsetzen zu können, werden neben einem wissenschaftlichen Fundament Methodiken benötigt, um insbesondere die disziplinübergreifende Zusammenarbeit, sowohl innerhalb einer Firma als auch entlang der firmenübergreifenden Wertschöpfungskette, zu unterstützen.

Neben der Entwicklung solcher Methoden ist auch die Schulung und Anwendung solcher Methoden in der industriellen Breite und insbesondere im Mittelstand notwendig.

- Ein wichtiger Hebel ist die zielgerichtete **Nutzung von Modellen** im *Engineering* von technischen Systemen. Es muss verstanden werden, wie im Sinne des (*Virtual*) *Systems Engineering*s Modelle zur disziplinübergreifenden Zusammenarbeit genutzt werden können, um das *Engineering* zu optimieren. Das dazu notwendige Verständnis über die Anwendung von Modellen muss flächendeckend in Form eines Methodenbaukastens für durchgängiges Produkt-, Prozess- und Produktionsmittel-*Engineering* gelehrt beziehungsweise geschult werden. Dabei besteht Bedarf an einer geeigneten Kombination aus theoretischen und anwendungsbezogenen Inhalten. Wichtig ist ebenfalls, dass die zugrunde liegenden Konzepte (wie Skalierbarkeit, Simulation, Detailtreue, Dynamisierung, Echtzeit etc.) auch unabhängig von der Umsetzung in spezifischen Werkzeugen vermittelt werden. Die Vorarbeiten der Agenda CPS zum System Engineering sind dabei zu nutzen (s. Agenda CPS, Kap. 5.3 *Engineering*-Konzepte und Kompetenzen) **[mittelfristig]**.
- Entscheidend ist der Aufbau von **durchgängigen Informationsmodellen**. Dazu sind neben den Modellierungskonzepten auch die Anwendungen (wie Konstruktion, Simulation, virtuelle Inbetriebnahme, Wartung und Service, Bestellwesen, Dokumentenmanagement etc.) zu berücksichtigen, die sich aus einem durchgängigen Informationsmodell speisen sollen. Auch die Zusammenarbeit und die Wechselwirkungen im Rahmen der iterativen Produktentwicklung mit anderen Unternehmen müssen berücksichtigt werden. Es sind geeignete Leitfäden sowie ein disziplinübergreifendes Referenzmodell zu entwickeln und in Form von Pilotanwendungen auf ihre Praxistauglichkeit zu überprüfen **[mittelfristig]**.
- Sehr wichtig ist der **Einsatz von Modellen in frühen Phasen**, um über geeignetes *Frontloading-Design* Fehler frühzeitig entdecken und beseitigen zu können. Dies betrifft ebenfalls

Aktivitäten, die auftragsunabhängig zur Schaffung wieder-verwendbarer Ergebnisse durchgeführt werden. Es müssen Forschungsarbeiten vorangetrieben werden, die eine anwendbare Systematik entwickeln, wie bereits vor der eigentlichen Angebotsphase systematisch die Anforderungen sowie Aufwände im Rahmen von Entwicklung, Produktion, Montage und Inbetriebnahme geprüft werden können. Dies gelingt bei zunehmender Variantenvielfalt und dem Denken in Produktfamilien nur, falls auch in diesem Themenfeld eine vernetzte Methoden- und Werkzeugunterstützung vorliegt **[mittelfristig]**.

- Insbesondere das Thema **interdisziplinäre Simulation** ist zu bearbeiten. Hier ist zu untersuchen, welche Aspekte bereits durch eine disziplinübergreifende Simulation im PLM-Prozess a priori bestimmt beziehungsweise vorgegeben – und damit nicht weiter in der Realität verfolgt – werden und welche im Rahmen der operationalen Ausführung in der Produktion erst entstehen und erfasst beziehungsweise aggregiert werden müssen. Wichtig ist dabei insbesondere, die Balance zwischen Aufwand und Nutzen zu kennen **[mittelfristig bis langfristig]**.
- Auch die Nutzung von Modellen zur Entwicklung „höherwertiger“ **Steuerungs- und Optimierungsansätze für die automatisierte, menschintegrierte Produktion** ist zu bearbeiten. Dies bezieht sich sowohl auf die Maschinen- und Anlagenebene (Echtzeit) als auch auf die Ebene des gesamten Produktionssystems. **[mittelfristig bis langfristig]**.

Darüber hinaus ist insbesondere die klassische Erzeugung von Funktionsabläufen in Produktionssystemen durch **manuelle und iterative Programmierzyklen zu überdenken**. Hier können durch die Anwendung und Adaption kognitiver Basistechnologien aus der KI-Welt erhebliche Potenziale für die *softwareintensive* Inbetriebnahme und den Betrieb im Maschinen- und Anlagenbau erschlossen werden. **[mittelfristig bis langfristig]**.

#### 4.2.3.3 DURCHGÄNGIGKEIT UND WERKZEUG-UNTERSTÜTZUNG

Aufgrund der zunehmenden Komplexität der interdisziplinären Entwicklung ist eine leistungsfähige Werkzeugunterstützung – auch über Firmengrenzen hinweg – notwendig. Es müssen deshalb die sogenannten *Product Lifecycle Management*-Systeme (PLM) in Bezug auf die *Life-Cycle*-Betrachtungen des Produkts, des Produktionsmittels sowie der beteiligten Prozessabläufe geeignet erweitert und befähigt werden.

- Die zentrale Thematik der **Durchgängigkeit** sollte in Form eines *Big Picture* formalisiert werden. Es ist ein übergreifendes Konzept für einen durchgängigen Informationsfluss zu erstellen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fertigungstechnologien (diskret und kontinuierlich), Lebenszyklen (Produkt

und Produktionssystem), *Stakeholder* (Wertschöpfungsnetzwerk), aber auch Disziplinen, Rollen etc. **[mittelfristig]**.

- Durch eine systematische Zusammenführung von Anwendern und Entwicklung beziehungsweise durch das Produkt-Management von *Engineering*-Werkzeugen sollte werkzeugübergreifend eine Plattform als Referenz geschaffen werden, um die **Anforderungen an Engineering-Werkzeuge**, insbesondere im Hinblick auf Integration beziehungsweise Durchgängigkeit besser zu verstehen. Dabei sollten auch bereits existierende *User Groups* für spezifische *Engineering*-Werkzeuge mit eingebunden werden **[kurzfristig]**.
- Es sind tragfähige **Werkzeugkonzepte** zwecks durchgängiger Unterstützung des integrierten Produkt-, Prozess- und Ressourcen *engineerings* zu entwickeln. Dies betrifft beispielsweise Integrationsarchitekturen von (Software-) Werkzeugen, Datenmodelle und Datenkonsistenz, Kollaborationskonzepte insbesondere bezüglich weltweiter Zusammenarbeit und Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen, skalierbare Benutzerschnittstellen, Offenheit und Erweiterbarkeit, *Customizing* etc. **[mittelfristig]**.
- Aufgrund der Bedeutung der firmenübergreifenden Vernetzung sollte ein **Demonstrator** im Kontext „Logistik“ und „*Supply Chain*“ geschaffen werden. Hier sollte eine umfangreiche, integrierte *Engineering*-Werkzeugkette zum Einsatz kommen und es sollten Analysen zur Modellbildung einer globalen Funktionsbeschreibung (auf verschiedenen Ebenen der Modellbildung), eine Simulation sowie eine Operationalisierung eines „großen“ verteilten und selbststeuernden Systems für Fertigung, Montage und Logistik vorgesehen werden **[langfristig]**.
- Durch die Weiterentwicklung im Umfeld der Künstlichen Intelligenz (KI) können in der Produktionstechnik verstärkt kreative **Planungs- und Design-Aufgaben** durch geeignete Methoden und Algorithmen **unterstützt** werden. Diese Verfahren müssen prototypisch evaluiert werden und anschließend geeignet in *Engineering*-Werkzeuge für den Maschinen- und Anlagenbau integriert werden **[mittelfristig]**.

- Durch die verstärkte Abbildung informationstechnischer Modelle mit skalierbarem Inhalt spielt der effiziente Umgang mit **großen Datenmengen (*Big Data*)** in der Entwicklung von Produkten und der zugehörigen Produktionssysteme eine wichtige Rolle, was aber auch die während der Produktion eines Produktionssystems anfallenden Daten betrifft (s. Kapitel 3.2). Hierzu sind geeignete Konzepte, Werkzeuge und Algorithmen zu entwickeln **[mittelfristig bis langfristig]**.

- Darüber hinaus ist insbesondere die klassische Erzeugung von Funktionsabläufen in Produktionssystemen durch manuelle und iterative Programmierzyklen zu überdenken. Hier können durch die Anwendung und Adaption kognitiver Basis-

technologien aus der KI-Welt erhebliche Potenziale für die softwareintensive Inbetriebnahme und den Betrieb im Maschinen- und Anlagenbau erschlossen werden.  
[mittelfristig bis langfristig].

#### 4.2.4 MENSCH UND ARBEIT IN DER KOOPERATION MIT INDUSTRIE 4.0-SYSTEMEN

In der durch Industrie 4.0 deutlich stärker vernetzten Welt werden neue und andersartige Anforderungen an den Menschen und sein Arbeitsvermögen gestellt. Dies gilt sowohl für den **kreativen Planungsprozess** im Rahmen der Anforderungserhebung, des Produkt*designs* und der Produktentwicklung (virtuelle Welt) als auch für den eher **operativ geprägten Arbeitsprozess** in Produktion und Logistik (reale Welt). Nur wenn die Beschäftigten im Zentrum stehen und in reale Abläufe aktiv und mit systemseitiger, kontextabhängiger Unterstützung eingreifen können, liefern CPPS einen wirklichen Mehrwert. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten sollte daher auf **interdisziplinären Vorhaben** liegen, in denen sich die Systemelemente Produktionstechnologie, *Softwarearchitekturen* und lernförderliche Arbeitsorganisation an unterschiedliche Ziel- und Beschäftigtengruppen richten. Um zu gewährleisten, dass diese umfassenden Ansätze durchgängig und konsistent gestaltet sind, können sie nur **unter Beteiligung eines interdisziplinären Teams** mit Psychologen, Ergonomien, Sozial- und Arbeitswissenschaftlern sowie Medizinern und Designern erfolgreich bearbeitet werden (s. dazu auch das Kapitel 3.3 Mensch-Maschine-Interaktion und geteilte Kontrolle der Agenda CPS).

##### 4.2.4.1 KREATIVE PLANUNGSPROZESSE IN DER DIGITALEN WELT EFFIZIENT GESTALTEN

Die Komplexität in flexiblen, wandelbaren und vermehrt situationsabhängig parametrierbaren Produktionssystemen muss mittelfristig für den „Modellersteller und -transformator“ Mensch aufbereitet und adäquat skaliert werden. Die Beschäftigten sind somit an unterschiedlichsten Stellen und auf den unterschiedlichsten Ebenen Teil des Wertschöpfungsnetzes, sodass der typische Industrie 4.0-Arbeitsplatz nicht nur in diesem Punkt künftig individuell anpassbar gestaltet werden muss. Der kreative Planer oder Entwickler muss zunehmend die Komplexität variantenreicher Produktprogramme auch disziplinübergreifend erfassen und Zulieferungen durch Komponentenhersteller im Entwicklungsprozess anforderungsgerecht orchestrieren. Damit wird beispielsweise verhindert, dass eine Veränderung in einer Disziplin erst im Rahmen der Inbetriebnahme in einer anderen Disziplin (z.B. Montage, Inbetriebnahme) identifiziert wird. Durch vorgelagerte Simulationsuntersuchungen kann darüber hinaus verhindert werden, dass die Zielgrößen des (Gesamt-)Systems im Anwendungskontext nicht erfüllt werden können.

Neben der Entwicklung sollte auch in der Produktion und im *Service* darauf geachtet werden, dass die Kommunikation unter den Beschäftigten gefördert wird und Arbeitsunterstützung, Lernaufgaben sowie physisches Training in sinnvollen Intervallen in den Arbeitsalltag integriert werden. Zudem muss auch für alle Berufsgruppen Rücksicht auf die Arbeitsplatzergonomie und Belastbarkeit der Beschäftigten genommen werden. In Summe leitet sich langfristig ein Methodenbedarf zur Beherrschung der Komplexität ab, wobei die Modularität, die Filterung und Überschaubarkeit wichtige Hebel dafür sein können.

- Eine effiziente und nutzerfreundliche Bereitstellung von Informationen in der Entwurfs- und Entwicklungsphase sowie im Produktionsumfeld sollte die Modell-Komplexität vor dem Anwender verbergen sowie intuitiv, situationsbezogen und anwendungsgerecht sein. Hier sollten Aspekte des **Data-Minnings**, der **Workflow-Unterstützung**, des **Knowledge based Engineerings** einschließlich erweiterter **Auswertungen für Entwickler, Berater und Ingenieure** wissenschaftlich begleitet untersucht werden [mittel- bis langfristig].
- Es muss gewährleistet sein, dass auch bei dynamischen, Ad-hoc- oder nicht nachvollziehbaren Veränderungen in einer automatisierten Produktion dennoch eine adäquate technische und gegebenenfalls multimodale Unterstützung durch CPPS während der Inbetriebnahme, der Produktion oder im Servicefall vorhanden ist. Dazu müssen in Industrie 4.0 verstärkt **vollständige PLM- und Informationsmodelle untersucht und erweitert** werden. Diese Modellerweiterungen beziehen sich insbesondere auf die direkte Verknüpfung der Disziplinen wie beispielsweise Mechanik, Elektronik, Elektrotechnik, Softwaretechnik etc. [mittel- bis langfristig].
- Zudem fehlen in vielfältigen Bereichen des Produktionsumfelds **Möglichkeiten, die Erfahrungen und das Wissen der Beschäftigten aus dem operativen Umfeld in der Produktion in die Entwicklungsprozesse und -werkzeuge** einfließen zu lassen. Zur Optimierung des Gesamtprozesses sowie zur Unterstützung des situationsabhängigen lebenslangen Lernens in allen Bereichen des Unternehmens sollte diesem Aspekt ebenfalls ein besonderes Augenmerk geschenkt werden [langfristig].
- Darüber hinaus ist eine Erweiterung und **Erneuerung klassischer Lernmethoden und Methoden der Wissensrepräsentation** sinnvoll, da ein sich ständig änderndes Arbeitsumfeld vermutlich überfordert und Änderungen bereits vorliegen, bevor der eigentliche Lern- und Lehrprozesszyklus abgeschlossen ist [mittel- bis langfristig].



#### 4.2.4.2 OPERATIVE ARBEITSPROZESSE IN DER REALEN WELT BESCHÄFTIGTENORIENTIERT GESTALTEN

Der Mensch steht im künftigen smarten Produktionssystem im Mittelpunkt und die Technik soll seine kognitive und physische Leistungsfähigkeit durch die richtige Balance von Unterstützung und Herausforderung fördern – insbesondere die industriellen Assistenzsysteme, die Mensch-Technik-Kooperation sowie die Qualifizierung.

- Bei der Betrachtung eines Mensch-Maschine-Systems sollten vorgelagert **lernförderliche, sozial durchlässige Arbeitsorganisationskonzepte für die Industrie 4.0** entwickelt und erprobt werden. Dabei spielen die Arbeits- und Teamgestaltung, die Steuerung und Kooperation, Qualifizierungsmodule und die Berücksichtigung der produktiven Arbeitszeit eine Rolle. Der Prozess sollte durch wissenschaftliche Einrichtungen, Unternehmensnetzwerke und Gewerkschaften sowie betriebliche Interessenvertretungen begleitet werden **[kurzfristig]**.
- Kommt es zu ad hoc nicht nachvollziehbaren Veränderungen in einer automatisierten Produktion, sollte neben der beschriebenen Kontextgenerierung auch eine adäquate Informationspräsentation durch CPPS während der Inbetriebnahme, der Produktion oder im Servicefall auf multimodalen Endgeräten erfolgen.

Fachkräfte sollten durch **tragbare Sensorik, Aktuatorik** und (in die Berufskleidung) eingebettete Systeme unterstützt werden. Diese sollen zu einer **Erhöhung der Leistungs- und Ausdauerfähigkeit** beitragen. Hierzu sind zudem neuartige multimodale Benutzerschnittstellen erforderlich, die einerseits den Aufgabenkontext beschreiben, gleichzeitig aber auch adaptiven Privatsphärenschutz unterstützen **[mittel- bis langfristig]**.

- Eine (Weiter-) **Entwicklung** von (arbeitswissenschaftlichen) **Ansätzen zur Erforschung der gesundheitlichen Belastungen**, die von veränderten Mensch-Technik-System-Kooperationen und Sensornetzwerken (einschließlich des Beschäftigten) ausgehen, sollte ebenfalls Bestandteil einer umfassenden Forschungsaktivität sein. Differenziert nach Beschäftigtengruppen (vom Vertrieb über den Ingenieur einschließlich der Produktionsbeschäftigten) sollen reale gesundheitliche Folgen im Rahmen von Piloten (Gefährdungsanalysen) erfasst werden. Notwendig werden daher Arbeiten zur Entwicklung von technisch-organisatorisch fundierten Ergonomiekonzepten, die den besonderen Anforderungen der fortschreitenden Verschmelzung realer und virtueller Arbeitswelten für alle Beschäftigtengruppen Rechnung tragen **[mittel- bis langfristig]**.

- Eine wesentliche Rolle in dem Themenfeld Mensch-Technik-Interaktion kommt der Entwicklung von **interaktiven Systemen mit wahlfreier und symmetrischer Multimodalität** (Sprache, Gestik, *Touch*, physische Aktion, Blickbewegungen bis hin zu *Brain Computer Interface*) mit wechselseitiger Disambiguierung für die intuitive und einfache Interaktion mit hochkomplexen CPPS-basierten Fabriken zu. Diese interaktiven Systeme sollen den Beschäftigten eine freie Auswahl zwischen verschiedenen angesprochenen Sinnen situationsabhängig ermöglichen **[kurzfristig]**.
- Die beispielsweise in der *Servicerobotik* bereits prototypisch vorhandenen mobilen Plattformen sind für den Einsatzfall im Produktionsumfeld in der Regel nicht hinreichend robust oder es sind gravierende Einschränkungen bei der Produktivität zu erwarten. **Eine vom Roboter unterstützte kooperative Arbeit in einem Arbeitsraum ist** – nicht zuletzt aufgrund des Gefahrenpotenzials – somit derzeit **in vielen Bereichen nicht praktikabel realisierbar**. Hier gilt es, weitere Forschungsanstrengungen mit dem Fokus einer wirtschaftlichen Nutzung im Produktionsumfeld zu fördern **[mittelfristig]**.

#### 4.2.4.3 INNOVATIVE MULTIMODALE INDUSTRIELLE ASSISTENZSYSTEME ERFORSCHEN

In der künftigen *Smart Factory* werden neuartige Formen für die kollaborative Fabrikarbeit, gestützt durch intelligente Assistenzsysteme, entstehen.

- *Cyber*-physische und hoch automatisierte Produktionssysteme entstehen unter anderem durch drahtlose, dezentrale aber **interoperable semantische Kommunikation mit aktiven Produktgedächtnissen**, die in zu fertigenden Komponenten und Anlagemodulen eingebettet sind. Für die zustandsbasierte Installation, Umrüstung, Wartung und Reparatur dieser Systeme sind neue adaptierte Assistenzsysteme zu entwickeln **[kurzfristig]**.
- Darüber hinaus sind Methoden und Systeme für die **kontextbasierte Informationspräsentation über Maschinenzustände** sowie Verfahren zur Erfassung von sicherheits- und ressourcenrelevanten Informationen durch Ereigniserkennung, *Workflow*-Verfolgung und Sensorfusion zu erforschen **[kurzfristig]**.
- Durch den Einsatz von Methoden und Techniken der **erweiterten Realität** (*Augmented Reality*), der **Dualwelttechnologie** (*Dual Reality*) und der **synchronisierten und multiplen Welten** (Echtzeitsynchronisation von sensomotorischen und semantischen Fabrikmodellen mit realen *Smart Factories*) werden **partielle und kollaborative Teleoperationen** von hochkomplexen Komponenten, etwa bei der Fehlersuche, ermöglicht. Hierfür müssen neue CPS-orientierte Systeme

auf Basis erweiterter und dualer Realität erforscht werden **[kurz- bis mittelfristig]**.

- Es sind **lokationsbasierte Assistenzdienste** in industriellen Anlagen mittels neuartiger, robuster Tracking- und Positionserfassungssysteme für Innenräume zu entwickeln, um **ortsabhängig und kontextadaptiv Assistenz** für Fachkräfte anzubieten. Diese Assistenzdienste müssen ein hochpräzises *Tracking* aller Produkt- und Produktionsmodule ermöglichen und trotzdem robust in der Fertigungsumgebung arbeiten **[kurzfristig]**.
- Im Kontext der *Smart Factory* kommt der Erforschung von **Fernwartungstechnologien und -systemen** eine wesentliche Rolle zu. Durch solche Systeme können Fachkräfte in der *Smart Factory* vor Ort durch externe Experten, beispielsweise unter Verwendung von Dualwelttechnologien und Technologien der erweiterten Realität, angeleitet werden, um lokal Fehler eigenständig beheben zu können **[kurzfristig]**.
- Die Umsetzung von Industrie 4.0 führt innerhalb der *Smart Factory* zu neuem kollaborativen und kooperativen Verhalten zwischen den Beschäftigten. Hier sind etwa **neue Kooperationsformen unter Fachkräften** mithilfe von für die Arbeit in *Smart Factories* **angepassten sozialen Netzwerken und sozialen Medien zu erforschen**, um beispielsweise für höhere Arbeitszufriedenheit und den notwendigen kontinuierlichen **Wissenstransfer** zu sorgen sowie die **Teamarbeit** zu unterstützen und die Arbeitsabläufe zu optimieren. Ergänzt wird dies durch die Entwicklung von Arbeitsprozessen / Arbeitssystemen, die die Integration solcher Kooperationsformen erlauben **[mittelfristig]**.
- Um der Heterogenität der Belegschaft Rechnung zu tragen, müssen personalisierte und auf spezielle Zielgruppen leicht adaptierbare Interaktionssysteme entwickelt werden, die dem Einzelnen mehr Abwechslung und Freude an der Arbeit bei gleichzeitig höherer Effizienz bieten **[mittelfristig]**.
- Um konsistente Prozessplanung und Monitoring laufender Produktionsvorgänge mit optimierter Ergonomie ermöglichen zu können, müssen in Kontext von Industrie 4.0 neue Ansätze zur **Integration virtueller Menschmodelle zur Unterstützung der Simulation maschineller Produktionsabläufe** untersucht werden **[mittel- bis langfristig]**.

**Fazit:** Arbeiten in einem ständig veränderten Arbeitsumfeld mit immer komplexeren Werkzeugen und Assistenzsystemen führt zu extrem hohen Anforderungen an **Fähigkeiten** und **Wissen** der beteiligten **Produktionsressourcen** sowie das Arbeitsvermögen der Beschäftigten.

#### 4.2.4.4 BESCHÄFTIGUNGSFOLGEN UND AKZEPTANZ (-PROBLEME) ERFORSCHEN

Durch die Einführung und Erweiterung heutiger Systeme zur Mensch-Technik-Interaktion wird es aller Voraussicht nach zu maßgeblichen Veränderungen der zukünftigen Industriearbeit kommen, die sich in ihren Ausmaßen und Effekten für Produktions- und industrielle Dienstleistungstätigkeiten derzeit noch nicht prognostizieren lassen. Von daher sind quantitative Beschäftigungsfolgen sowie die grundsätzliche Akzeptanz zu erforschen:

- **Akzeptanzanalyse:** Aufbau einer Trendberichterstattung zum Umsetzungsstand von Industrie 4.0. Qualitative und quantitative Erfassung hemmender und förderlicher Aspekte der Umsetzung von Industrie 4.0 (einschließlich Qualifikations-, Arbeitszeit-, Leistungs-, Entgeltdimension) sowohl aus Beschäftigten- als auch Unternehmenssicht [**kurzfristig**].
- **Quantitative Analyse der Beschäftigungsfolgen:** Prospektive Abschätzung der quantitativen Beschäftigungseffekte, die sich aus der Umsetzung von Industrie 4.0 ergeben – differenziert nach Branchen, Beschäftigtengruppen und Tätigkeitsspektrum [**mittelfristig**].

#### 4.2.4.5 QUALIFIZIERUNG FÜR ALLE BESCHÄFTIGTENGROUPEN SICHERSTELLEN

Neue Arbeits- und Lernmethoden, Arbeitsabläufe, Verschiebungen in Altersstrukturen der Beschäftigten sowie signifikant veränderte Mensch-Technik-Interaktionen führen zu einem Qualifizierungsbedarf in allen Bereichen des Unternehmens.

- **Förderung digitaler Lerntechniken:** Digitalen Medien und innovativen Lerntechnologien muss eine herausragende Rolle in der Wissensvermittlung und Kompetenzentwicklung zukommen – auch, um die immer weniger Mitarbeiter möglichst wenig zur Ausbildung aus den Unternehmen zu reißen [**kurzfristig**].
- **Qualitative Erfassung des Bedarfs** von Qualifikationen und Kompetenzen differenziert nach Beschäftigtengruppen (Angelernte, Facharbeiter/innen, Techniker/innen, Ingenieure/innen) [**kurzfristig**].
- Auf Basis der Bedarfsanalysen Erforschung und Entwicklung von arbeitsplatznahen Formen des Qualifizierungs- und Kompetenzerwerbs – unter Einbeziehung und **Weiterentwicklung digitaler Lerntechniken** [**mittelfristig**].

#### 4.2.5 TECHNOLOGIE CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS (CPPS)

Heutige Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in der Produktionstechnik sind auf eine Fabrik (oder eine Fertigungslinie) innerhalb eines Unternehmens hinsichtlich der Kosten und der Effizienz optimiert. Aufgrund heterogener Anlagentechnik mit Steuerungsarchitekturen unterschiedlichster Hersteller für die automatisierte Produktion in Verbindung mit manuellen Arbeitsprozessen – wie etwa für die Komponenten- und Systemmontage – bieten heutige Produktionssysteme nur eine signifikant eingeschränkte Anzahl von Schnittstellen an. Diese wiederum liefern eine noch geringere Anzahl informations-technisch beeinflussbarer Optimierungskriterien für die Produktionsplanung. Zudem bringt die starke Informationskapselung auf den unterschiedlichen Ebenen der Produktion weitere Nachteile mit sich (s. ausführlich Kap. 5.2).

Um dennoch ein lokales Optimum des wirtschaftlichen Betriebs zu erreichen, wurden in der Vergangenheit viele Forschungen zur Entkopplung voneinander abhängiger einzelner Herstellungsprozesse durchgeführt. Insgesamt bildeten Aspekte der Organisationsentwicklung – wie beispielsweise die *Lean Production* oder auch *Lean Innovation* – die Basis für die heute bekannten unternehmensspezifischen Produktionssysteme (Toyota-, Bosch-, Siemens-, Trumpf-Produktionssystem etc.).

Technologisch konnten in der Vergangenheit aufgrund **fehlender Vernetzungsmöglichkeiten und fehlender angepasster IKT-Basistechnologien in der Produktion** diskutierte Konzepte des *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* nicht industrialisiert werden. Kürzere Lebenszyklen vermarktungsfähiger Produkte und die vielfach im Einzelunternehmen bereits vorhandene Vernetzung in der gesamten *Supply Chain* führen allerdings erneut zu nicht ausgewogenen Auftragseingängen, Beständen oder aber einer nicht „getakteten“ Produktion. Dadurch ist der Versuch, ein Gesamtoptimum über Unternehmensgrenzen hinaus zu erzielen, aufgrund fehlender technologischer Lösungen sowie Standardisierungen heute mit vielen Unsicherheiten verbunden. Darüber hinaus können Anforderungen, wie eine firmenübergreifende Vernetzung von Fertigung, Agilität und Flexibilität bezüglich Fertigungsänderungen (wegen nicht vorhandener Daten- und Prozessdurchgängigkeit in unterschiedlichen Ebenen der Produktion) nur in aufwändigen manuellen Änderungsprojekten gestellt werden. Das führt typischerweise zu längerem Produktionsstillstand und hohen Umstellungskosten.

An dieser Stelle setzt das Potenzial von CPPS im Rahmen von Industrie 4.0 an.



#### 4.2.5.1 BASISTECHNOLOGIEN DER IKT ERTÜCHTIGEN FÜR DIE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

Die Informatik hält viele Basistechnologien bereit, die für einen unmittelbaren Einsatz in der Automatisierungs- beziehungsweise Produktionstechnik konzeptionell überdacht und weiterentwickelt werden müssten. Von besonderer Bedeutung für die Industrie 4.0 ist jedoch die Gesamtintegration und Synthese dieser Basistechnologien, um beispielsweise durch intelligente Sensorik und Informationstechnologie die Orchestrierung hochgradig verteilter IT- und Produktionssysteme sicherzustellen. Methoden und Ansätze zur Synthese vorhandener Technologien und zum Transfer in das Produktionsumfeld sind noch nicht in ausreichendem Maße erarbeitet. Zudem fehlen derzeit valide Konzepte, Methoden und insbesondere Werkzeuge, um disziplinübergreifende produktionstechnische Modelle schnell zu erfassen und auf dieser Basis produktionsrelevante Entscheidungen zu treffen. Aus diesem Grund erachtet der Arbeitskreis die folgenden konsolidierten Forschungsempfehlungen als zentral:

- **Zum Zeitpunkt der Anforderungsaufnahme:** Das in der Informatik im Rahmen der Produktentwicklung und zur gezielten Aufnahme von Anforderungen etablierte *Requirement Engineering* ist für den Maschinen- und Anlagenbau nicht ausreichend. Werden Anforderungen für den Aufbau von Produktbaukästen verwendet, so liegen auch hier keine unmittelbar übertragbaren Ansätze aus den IKT vor. Die zur Bildung von Produktfamilien in der Software verwendeten Konzepte müssten ebenfalls auf den disziplinübergreifenden Entwurf im Maschinen- und Anlagenbau übertragen werden (s. dazu das Kapitel 5 Technologie- und Engineering-Herausforderungen der Agenda CPS) [langfristig].
- **Zum Zeitpunkt der Planung:** Für die iterative Planung von Produkt und Produktionssystem in den diversen Disziplinen mit unterschiedlichsten Mitarbeiterfähigkeiten und -kompetenzen wird eine beschreibende sowie unterstützende Architektur für Industrie 4.0 benötigt. Die dazu erforderlichen statischen und dynamischen Modelle können technisch beispielsweise in einer Ontologie abgebildet werden. Unter dem Fokus einer industriellen Anwendung in Industrie 4.0 bleibt allerdings bislang offen, wie die **Auswertungsmöglichkeiten einer umfangreichen Ontologie eines Produktionssystems** beispielsweise für eine Optimierung signifikant beschleunigt werden können [langfristig].
- **Zum Zeitpunkt der Ausführung in der Produktion:** Für die Produktion in einem kooperierenden und dezentralen Netzwerk von Fertigungseinrichtungen unterschiedlicher Firmen wird eine **verteilte dienstorientierte Architektur** (beispielsweise auf Basis der serviceorientierten Architektur SOA) benötigt, die ERP, Fertigung und Logistik über definierte *Services* und eine offene Datenbasis verknüpft [langfristig].
- **Zum Zeitpunkt der Ausführung in der Produktion:** Die Entwicklung hochzuverlässiger **Funkkommunikation** für industrielle Umgebungen sollte in industrienaher Forschung und **Entwicklung der Telekommunikationsfirmen** in IKT angegangen werden [mittelfristig].
- **Übergreifende Betrachtung von Planung und Betrieb:** In der produktionstechnischen Forschung sind **Methoden zur kontinuierlichen Echtzeitsimulation und Visualisierung über alle Ebenen und Firmengrenzen** hinweg zu erarbeiten (*Simulation and Monitoring of Services and Things*) [mittelfristig].
- **Informationsaustausch mit automatisierten Workflows:** Neben einem operativen gerichteten Informationsaustausch innerhalb einer Disziplin oder über disziplinspezifische Grenzen hinaus (Vertrieb, Entwicklung, Produktion, Service usw.) müssen für Industrie 4.0 in der *Supply Chain* unternehmensübergreifende Basisfunktionalitäten eines *Product-Life-Cycle-Management-Systems* bereitgestellt und weiterentwickelt werden. Dazu zählen im Wesentlichen für die Produktionstechnik anzupassende Managementsysteme aus den Bereichen Prozess Management, *Rules Management* etc. [mittelfristig].
- **Automatisierter und sicherer Informationsaustausch:** Entwicklung **standardisierter Wissensmodelle und Zugriffsmethoden**, die Umfang, Vertraulichkeit, Gültigkeitsdauer, Zugriffsrechte und Datenschutz von Prozessinformationen definieren und langfristig sicherstellen [langfristig].
- **Sicherer, schneller und nachhaltiger Informationsaustausch:** Im Gegensatz zur *Security* in klassischen IT-Systemen, für die bereits eine Vielzahl von Lösungsansätzen und Produkten existiert, sind heutige Produktionssysteme nur vergleichsweise schwach oder zumeist gar nicht abgesichert. Es sind daher *IT-Security* Methoden und Systeme neu zu entwickeln oder so zu überdenken, dass sie den industriellen Anforderungen hinsichtlich **Prozessumfeld, Realzeitverhalten, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit** genügen. *Security*-Konzepte für klassische IT-Systeme, *Cloud-Services* und *Industrial IT* müssen kompatibel und integrierbar sein, um ganzheitliche, system- und unternehmensübergreifende *Security*-Lösungen realisieren zu können (s. auch Kapitel 5.3) [mittelfristig].

#### 4.2.5.2 REFERENZARCHITEKTUREN ALS ERFOLGSINFRASTRUKTUR DER ZUKUNFT

Aufgrund der vielfältigen Erfordernisse – sowohl Modellierungssprachen, -techniken als auch Plattformen sind für den Einsatz in der Produktionstechnik tauglich zu gestalten –, rücken vermehrt Standardisierungsbemühungen in den Vordergrund der Betrachtungen. Um Skaleneffekte in CPPS zu erreichen, müssen zudem einerseits modularisierte smarte Produktionssysteme, die mit CPS interagieren, entwickelt werden sowie andererseits mittelfristig Produktionsdienste bereitgestellt werden, die zwangsläufig auf eine exemplarische – und für den Anwendungsfall sinnvolle – Referenzarchitektur zurückgreifen.

##### Was versteht man unter einer Referenzarchitektur?

Man spricht von einer Referenzarchitektur, wenn es sich um ein generisches Muster – also eine idealtypische Modellausprägung – für die Klasse der zu modellierenden Systeme und deren Architektur handelt. Um hochgradig verteilte Systeme umzusetzen, bedarf es (als Teil der Referenzarchitektur) einer geeigneten produktionstechnischen *Serviceplattform*. Sie muss bestimmte Funktionalitäten bieten, um mit den verschiedensten und möglicherweise verteilten Teilnehmern des Gesamtsystems zu interagieren. Mithilfe solcher Plattformen lassen sich regelbasierte, dynamische und selbststeuernde Anwendungen entwickeln, die neben einem umfassenden Ereignis- und Situationsmanagement alle Funktionen zur Verfügung stellen, um ein *smartes* Produktionssystem entstehen zu lassen.

Vorgaben für Referenzarchitekturen ergeben sich unter anderem aus SOA-Konzepten. Nach OASIS ist SOA ein Paradigma für die Strukturierung und Nutzung verteilter Funktionalität, die von unterschiedlichen Besitzern verantwortet wird.<sup>9</sup> Das SOA Paradigma baut darauf auf, dass technische Elemente der Anwendungsentwicklung (zum Beispiel Programmcode, Datenbankschemas und -abfragen, Konfigurationsdateien) zu höherwertigen, fachlich orientierten Komponenten zusammengefasst werden. Diese fachlichen SOA-Komponenten bieten Dienste an, die beispielsweise als Grundlage für die Automatisierung von Prozessabläufen dienen können. Sogenannte *Composite Applications* fassen mehrere fachliche SOA-Komponenten mittels der sogenannten *Service-Orchestrierung* zu neuen Applikationen zusammen.<sup>10</sup> Die Fachverbände sollten zur Schaffung und Durchsetzung einer Referenzarchitektur Industrie 4.0 aktiv eingebunden werden.

##### Beispiel für die Automobilindustrie – Autosar

*Autosar (AUTomotive Open System ARchitecture)* stellt ein mögliches Ausprägungskonzept einer Referenzarchitektur dar, das in Teilbereichen bereits Einzug in die automobilen Produktentwicklung gehalten hat. Hierbei besteht die grundsätzliche Möglichkeit, Applikationen und Funktionen zwischen unterschiedlichen Steuergeräten flexibel zu verschieben. Darüber hinaus begleitet

abschließend eine Simulation die Konfiguration eines gewählten Netzwerks. Die so durchgeführte generische Planung vom *Softwarecode* ohne direkten Bezug zu *Hardware-Zielpattformen* stellt die eigentliche Revolution des Konzepts dar.

Allerdings müssen auch bei dieser Referenzarchitektur weitere signifikante Forschungsanstrengungen unternommen werden, bevor das Konzept vollständig umgesetzt ist. Ein Versuch, die grundlegenden Gedanken und Konzepte auf die Bedarfe des Maschinenbaus und der Automatisierungstechnik anzupassen und weiterzuentwickeln, wird im Zuge von Industrie 4.0 und möglichen Standardisierungsbemühungen dringend empfohlen. Da im Umfeld der Produktion zudem andere Wertschöpfungsstrukturen etabliert sind und andere Produktlebenszyklen als in der automatisierten Produktentwicklung wirken, ergibt sich darüber hinaus ein Forschungsbedarf auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen.

##### Forschungsbedarf Referenzarchitektur

- Im Sinne einer **Landkarte** sind die bereits existierenden und etablierten Konzepte und Ausprägungen von „Referenzarchitekturen in der Automatisierung“ aufzunehmen und im Hinblick auf Weiterentwicklung und Migration im Kontext von CPPS zu bewerten [**kurzfristig**].
- Die **Erarbeitung von Referenzarchitekturen** für unterschiedliche Anwendungsfälle in der Industrie 4.0 ist Aufgabe einer Forschungsausschreibung. Die Forschung für Logistik-, Maschinen- und Fertigungsprozesse sollte zukünftig auf Basis solcher Referenzarchitekturen Lösungen erarbeiten und über Standardisierungsbemühungen Innovationen schneller zu den Firmen in die Märkte transportieren können [**mittelfristig**].
- Zur Unterstützung der Wandlungsfähigkeit und zur Flexibilisierung im Anlagenbetrieb wird ein **umsetzungsnahes Konzept** benötigt, das entsprechende heterogene Echtzeitanwendungen und Steuerungen orchestriert. Bei der Betrachtung einer einzelnen Maschine oder Anlage auf der Zellenebene könnte beispielsweise auf der aus der Automatisierungstechnik entstandenen Basistechnologie OPC-UA aufgesetzt werden. Hierbei sind neben *softwaretechnischen* Basisentwicklungen auch weitergehende Hardwareentwicklungen der Steuerungshersteller erforderlich [**mittelfristig**].
- Um die oben erwähnte starke Informationskapselung zu überwinden, muss für die Referenzarchitektur ein übergreifender, ganzheitlicher Ansatz gefunden werden, der die **Erfordernisse auf den unterschiedlichen Ebenen der Produktion berücksichtigt**. *Enterprise Resource Planning (ERP)*, *Manufacturing Execution System (MES)*, speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, PLC) und die Zellenebene bis hin zur Sensor- / Aktorebene als *Field Control Level* müssen sich dort einordnen lassen [**mittelfristig**].

- Um die Industrie 4.0 aus diesen Einzelanwendungen heraus auch losgelöst von bereits existierenden Ansätzen einer Referenzarchitektur auf einer abstrakteren wissenschaftlichen Ebene mit potenziellen Anwendern zu diskutieren, sollte zudem ein mögliches **Metamodell einer Referenzarchitektur** in einem Kompetenzzentrum, vergleichbar einem Fachausschuss diskutiert und entwickelt werden **[langfristig]**.
- Die Definition von „**Basis-Diensten**“ für eine (standardisierte) Kommunikation mit einer austauschbaren Informationsplattform gehört weiterhin zu den wichtigen Forschungsthemen. Dabei sollte die Plattform eine bestimmte Funktionalität bieten, um mit den verschiedensten und verteilten Teilnehmern des Gesamtsystems zu interagieren. Mithilfe solcher Plattformen lassen sich regelbasierte, dynamische und selbststeuernde Applikationen entwickeln, die neben einem umfassenden Ereignis- und Situationsmanagement alle Funktionen zur Verfügung stellen, um ein smartes Produktionssystem entstehen zu lassen **[mittelfristig]**.
- Im Sinne einer *lifecycle*-bezogenen Betrachtung müssen auch die benötigten **Engineering-Werkzeuge** als wesentliche Lieferanten von Modellen und Daten auf einer geeigneten Abstraktionsebene in die Referenzarchitektur einbezogen werden **[mittelfristig]**.

## 5 HANDLUNGSFELDER UND VORLÄUFIGE UMSETZUNGSEMPFEHLUNGEN

Mit der Fortentwicklung der *Cyber-Physical Systems* für die Industrie sind weitreichende Herausforderungen für den Standort Deutschland verbunden, sowohl genereller als auch spezieller Natur. Die Komplexität der Aufgabe zeigt sich technisch, methodisch und fachlich in der Forschung und Entwicklung, aber auch in der Nutzung und hinsichtlich der Auswirkungen der *Cyber-Physical Systems* auf Wirtschaft und Gesellschaft. Voraussetzung für die Festigung der Position Deutschlands zu *Cyber-Physical Systems* ist eine schnelle Ausrichtung der Infra-, Wirtschafts-, Arbeits- und Beschäftigungsstrukturen auf die Erfordernisse von *Cyber-Physical Systems*. Nur so kann Deutschland die Chancen für den Produktionsstandort nutzen (s. Kapitel 3.3. zu den technologischen Herausforderungen).

Konkret bedeutet dies gesamtgesellschaftliche Anstrengungen für eine branchenweite Vernetzung mit gemeinsamen **Normen und Standards** sowie einer **Referenzarchitektur** und einer **Infrastruktur**. Parallel dazu ist eine **innovative Arbeits-, Qualifizierungs- und Sozialorganisation** erforderlich, die die nachhaltige Entwicklung der Arbeitsfähigkeiten der Beschäftigten sicherstellen können. Nicht zuletzt gilt es, **Sicherheitsfragen** zu klären und **Know-how-Schutz** zu etablieren.

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 hat in seiner neunmonatigen Arbeitsphase die wichtigsten Handlungsfelder identifiziert und erste vorläufige Umsetzungsempfehlungen erarbeitet, die im Folgenden erläutert werden. Diese vorläufigen Empfehlungen sind nicht als abschließende Feststellungen zu verstehen, sondern vielmehr als Impulse, die Diskussionen fortzuführen und weitere Handlungsfelder zu erschließen. Perspektivisch sollen die Umsetzungsempfehlungen für die öffentliche Berichtsversion (Hannover Messe 2013) fortgeschrieben und ausgeführt werden, Gleiches gilt für die Kapitel „Rechtliche Rahmenbedingungen“ (Kap. 6.6) und „Wo stehen wir im internationalen Vergleich?“ (Kap. 7).

### 5.1 Normen und Standards

Erst über gemeinsam getragene technische und betriebswirtschaftliche Schnittstellen und Standards ist eine branchenweite Vernetzung von Industrie- und Logistikunternehmen möglich. Das Internet hat über De-facto-Standards die Welt vernetzt und die heutige informationstechnische Globalisierung erst ermöglicht (zum Beispiel TCP / IP-Protokollfamilie, *Web-Services*). Nicht nur die Internettechnologie hat die Welt revolutioniert, sondern auch die offene, transparente und schnelle Form der Standardisierung jenseits der nationalen Standardisierungsorganisationen. Bei der Bewältigung der technologischen Herausforderungen einer allgegenwärtigen Vernetzung von Systemen, Produkten und Produktionsstätten spielt die **Referenzarchitektur** eine zentrale Rolle.

#### 5.1.1 UMSETZUNGSWEGE ZUR STANDARDISIERUNG ERÖFFNEN

Die komplexen, vernetzten Technologiekombinationen der vierten industriellen Revolution erfordern zwingend eine Standardisierung, damit sie sich am Markt durchsetzen können. Über alle Branchen-, Technologie- und Ländergrenzen hinweg muss eine nahtlose Kommunikation zwischen den Komponenten einen unterbrechungsfreien Betrieb sicherstellen. Wie bereits dargestellt gibt es zwei Wege zur Erzielung eines Standards: über die Konsensbildung in Normungsgremien oder über die direkte Durchsetzung am Markt durch überragende Leistungsfähigkeit (oder ein Monopol).

Der erstgenannte Weg kann als entwicklungsbegleitende Normung parallel zu den Forschungsprojekten eingeschlagen werden. Die Forschungsergebnisse fließen dabei direkt in die Standards ein, während umgekehrt Normungserfordernisse die Forschungsinhalte modifizieren können.

Die „De-facto“-Standardisierung durch direkte Marktpenetration kann im Bereich der *Software* durch *Open Source Communities* beschleunigt werden. Diese tragen durch die Vielfalt der beteiligten Entwickler außerdem zu einer Qualitätssicherung bei. Passende Geschäfts- und Lizenzmodelle sind erforderlich, um die Investitionen der Unternehmen rückzuvergüten.

#### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt, bereits mit der nächsten Ausschreibung in einem oder mehreren Projekten eine Landkarte vorhandener Standards erstellen und geeignete Umsetzungsstrategien zu deren Standardisierung entwickeln zu lassen. In allen Forschungsprojekten zur Industrie 4.0 sollten dann Standardisierungsaspekte und -aktivitäten im Sinne dieser Umsetzungsstrategie empfohlen werden.

Von den Normungsorganisationen sollte im Sinne der entwicklungsbegleitenden Normung (EBN) eine Arbeitsgruppe „Industrie 4.0 Standardisierung“ eingesetzt werden, die über Branchen- und Projektgrenzen hinweg die Standardisierungsaktivitäten evaluiert und kommuniziert sowie durch Innovationsübertragung weitere Innovationen stimuliert. Diese sollten analog zur *Open-Source*-Standardisierung offen und transparent organisiert werden.

### 5.1.2 REFERENZARCHITEKTUREN FÜR INDUSTRIE 4.0 ALS ERFOLGSINFRASTRUKTUR DER ZUKUNFT

Die **Referenzarchitekturen für Industrie 4.0** können als Muster für konkrete Architekturen der Prozess- und IT-Systeme betrachtet werden (s. dazu ausführlich Kapitel 4.2.5.2). Sie sind branchenübergreifende Modelle der typischen Abstraktionsebenen und deren Schnittstellen entlang der gesamten *Supply Networks* basierend auf Architektur Anforderungen der relevanten *Stakeholder*.

Die Referenzarchitekturen für Industrie 4.0 können einen

- größeren Markt für Standard-Software-Firmen,
- Zugriff auf Standard-Software für Anlagenhersteller und
- die schnellere und günstigere Integration von Anlagen

bei den produzierenden Unternehmen ermöglichen und schaffen dadurch den Rahmen für ein attraktives *Business Ecosystem*. Referenzarchitekturen für Industrie 4.0 unterstützen Standardisierungsaktivitäten, indem sie auf vorhandene Standards wie etwa Kommunikationsprotokolle zurückgreifen und diese für Industrie 4.0 empfehlen, selbst als Standard dienen und damit eine einheitliche Basis für Interoperabilität, Kompatibilität und eine systematische Wiederverwendung schaffen.

Vorgaben für Referenzarchitekturen ergeben sich branchenübergreifend aus SOA-Konzepten in einer neuen Struktur. Verbände wie BITKOM, VDI, VDA, VDE, ZVEI, VDMA und BDI sollten für die Schaffung und Durchsetzung von Referenzarchitekturen für Industrie 4.0 aktiv werden.

#### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

**Forschung:** Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt ergänzend zu den Forschungsempfehlungen in Kapitel 4.2.5.3 die folgende Umsetzung:

**Marktanordnung:** Die Marktteilnehmer müssen darauf vertrauen können, mithilfe von Referenzarchitekturen ihr eigenes Geschäft besser ausbauen zu können. Hier sollten die Industrieverbände die Führungsrolle übernehmen und vertrauensbildende Maßnahmen durchführen.

**Aus- und Weiterbildung:** Die Anwendung von Referenzarchitekturen bei klassischen Maschinenbau- und bei produzierenden Unternehmen mit bisher nur geringem IT-Kompetenzbedarf muss durch Weiterbildung, Beratung und IT-Integrationsfirmen unterstützt werden. Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt, das Thema Referenzarchitekturen in den Bildungskanon der entsprechenden universitären Studiengänge und der Ausbildungsberufe aufzunehmen.

**Politische Rahmenbedingungen:** Empfohlen wird die Förderung von Projekten, Organisationen und Unternehmen, die wesentliche Beiträge zur Referenzarchitektur und deren Verbreitung leisten.

**Standardisierung:** Eine Definition von Kommunikations-, Schnittstellen- und Simulationsstandards ist erforderlich, die über Hierarchie- und Firmengrenzen hinweg zur Beschreibung von Produkten, Ressourcen und Technologiedaten führt. Ein Industriestandard lässt sich klassisch über die Gremienarbeit oder über die Mechanismen des Internets in *Open Source Communities* erzielen. Der zweite Weg bietet den Vorteil der höheren Geschwindigkeit sowie des lauffähigen Standards und die Investitionssicherheit über ein passendes Lizenzmodell der beteiligten Unternehmen

Der Arbeitskreis empfiehlt daher, die Vorarbeiten zu dem Thema Referenzarchitektur Industrie 4.0 unmittelbar in einer kleinen Projektgruppe zu beginnen, um ein entsprechendes Verbundprojekt vorzubereiten, in das die Ergebnisse der Projektgruppe münden.

Ziel sollte ein gut vorbereiteter Start in 2013 sein.

## 5.2 Revolution der IKT in der Fertigung – eine Infrastruktur für Informations-, Produktions- und Kommunikationstechnik

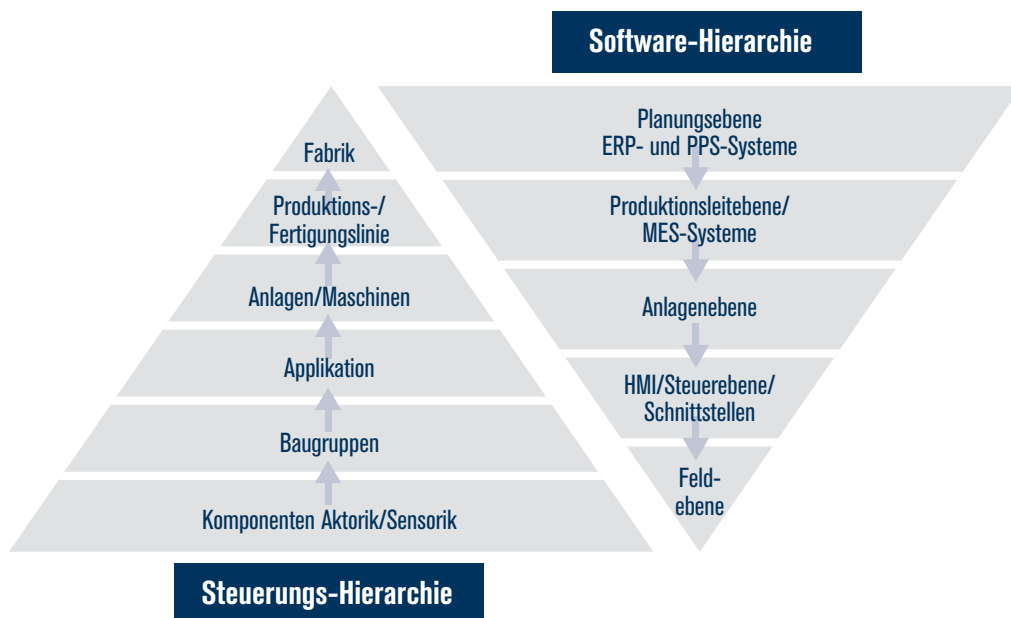
Im Gegensatz zu den heute etablierten Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in der Fertigung, die überwiegend in einer hierarchischen Ebenenstruktur angeordnet sind, erfordert die Industrie 4.0 eine kooperative Netzwerkarchitektur. Die folgenden Abschnitte skizzieren – ausgehend von den existierenden Basistechnologien – die Anforderungen an die Netzwerkarchitektur und die Breitbandinfrastruktur für die Industrie 4.0.

Heutige IKT in der Fertigung sind für eine Fabrik (oder eine Fertigungslinie) innerhalb eines Unternehmens fast ausschließlich hinsichtlich der Kosten und der Effizienz optimiert. Die IKT basiert auf einer hierarchischen, zum Teil proprietären, abgeschlossenen Architektur, die typischerweise in vier Ebenen aufgeteilt ist:

1. Planungsebene: *Enterprise Resource Planning (ERP)*
2. Produktionsleitebene: *Manufacturing Execution System (MES)*
3. Steuerebene: *Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, PLC)*
4. Feldebene: *Field Control Level (FLC)*

Die folgende Abbildung verdeutlicht die beiden unterschiedlichen Perspektiven aus Sicht der Steuerung und der *Software*, die heute noch vorherrschen (s. Abb. 13).

Anforderungen, wie etwa die firmenübergreifende Vernetzung von Fertigung, Agilität und Flexibilität bezüglich Fertigungsänderungen, können wegen nicht vorhandener Daten- und Prozessdurchgängigkeit nur in aufwendigen manuellen Änderungsprojekten gestellt werden, die alle oben genannten Ebenen betreffen. Das führt typischerweise zu längerem Produktionsstillstand und hohen Umstellungskosten.



Quelle: Festo 2012

Abb. 13 – Gängige Perspektiven in der IKT-Automatisierungstechnik heute (Quelle: Festo)

Verstehen wir die Produktion hingegen als ein **kooperierendes und dezentrales Netzwerk von Fertigungseinrichtungen** unterschiedlicher Firmen, so führt dies zu einer kooperativen verteilten Architektur (*Software Oriented Architecture*), die ERP, Fertigung und Logistik über *Services* und eine offene Datenbasis verknüpft (s. Abb. 14)

Dazu sind statische und dynamische Modelle über Maschinen und Fertigungsprozesse notwendig, um die Semantik und deren konzeptionelle Beziehungen in einer Ontologie abzubilden. Diese Modelle von Maschinen und Fertigungsprozessen liegen heute oft nicht vor (zum Beispiel oft nur aus Heuristik, daher also schwer modellierbar; kein einheitlicher Modellierungsansatz vorhanden). Erste Forschungsansätze existieren dazu in der mobilen Robotik oder als Teilmodelle im *Systems Engineering*. Diese Modelle sind zu vervollständigen, zu integrieren und in Engineering-Prozesse einzubringen, beispielsweise über die Erweiterung der CAD-Ansätze und der PLM-Methoden auf *softwareintensive Systeme*.

Angrenzende oder überlappende Prozesse wie Logistik, Diagnose, Qualitätssicherung, Instandhaltung, Energiemanagement, Umweltschutz, Mitarbeiterressourcenplanung werden heute (noch) nicht integriert betrachtet.

Durch einen **generischen Prozessansatz** können diese auf jeder Ebene (Fertigung, Linie, Maschine) selbstständig gelöst werden („Fraktale Fabrik“). Da in den Prozessdaten das gesamte wettbewerbsrelevante Wissen eines produzierenden Unternehmens steckt, muss der Datenaustausch bestens geschützt erfolgen und jeweils nur zwischen den erforderlichen Partnern, die ein entsprechendes Abkommen geschlossen haben. **Von einer Lösung dieser kommunikationstechnischen Aufgabe wird wesentlich das Vertrauen der industriellen Anwender abhängen.**

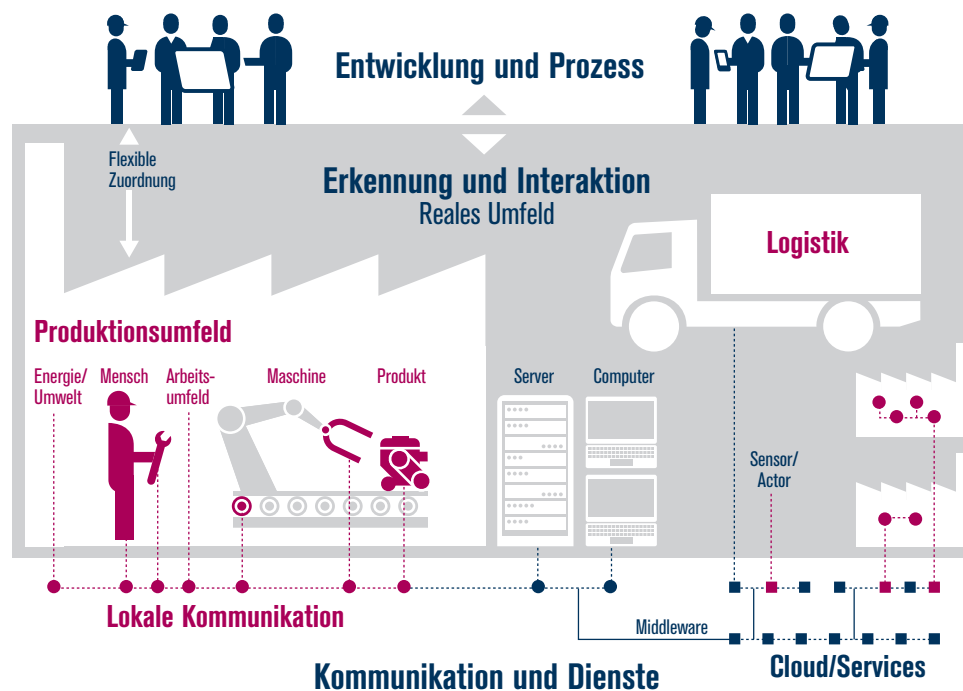


Abb. 14: Industrie 4.0-Vernetzungsmodell der *Smart Factory* mit dem realen Umfeld (Quelle: Beigl, KIT)



### 5.2.1. VORHANDENE BASISTECHNOLOGIEN

Für die Entwicklung und den Einsatz von CPPS in zukünftigen Produktionen sind die dafür notwendigen Basistechnologien Elektronik und Elektroniksysteme, IT-Systeme, Kommunikationssystem, IT-Sicherheit und Mensch-Technik Interaktion in ihren Grundsätzen vorhanden.

Von besonderer Bedeutung für die Industrie 4.0 ist jedoch die **Gesamtintegration und Synthese dieser Basistechnologien**, um beispielsweise durch intelligente Sensorik und Informationstechnologie die Orchestrierung hochgradig verteilter IT- und Produktionssysteme sicherzustellen. Methoden und Ansätze zur Synthese vorhandener Technologien und zum Transfer in das Produktionsumfeld sind noch nicht in ausreichendem Maße erarbeitet.

- **Service-Oriented-Architecture (SOA)**

SOA ist ein Paradigma für die Strukturierung und Nutzung verteilter Funktionalität, die von unterschiedlichen Besitzern verantwortet wird. Das SOA-Paradigma baut darauf auf, dass technische Elemente der Anwendungsentwicklung (zum Beispiel Programmcode, Datenbankschemas und -abfragen, Konfigurationsdateien) zu höherwertigen, fachlich orientierten Komponenten zusammengefasst werden. Diese fachlichen SOA-Komponenten bieten Dienste an, die beispielsweise als Grundlage für die Automatisierung von Prozessabläufen dienen können. Sogenannte „*Composite Applications*“ fassen mehrere fachliche SOA-Komponenten mittels der sogenannten *Service-Orchestrierung* zu neuen Applikationen zusammen.

- **Prozessmanagement**

Prozessmanagementsysteme helfen bei der Definition, Ausführung, Analyse, Überwachung und Optimierung von Prozessen, zum Beispiel von Fertigungsprozessen. Alle am Prozess beteiligten Geräte, Systeme und Personen werden orchestriert.

- **Rules Management**

Regeln in hochgradig verteilten Systemen müssen dynamisch änderbar sein, um dem hohen Änderungsaufkommen gerecht zu werden. *Rules Management* wird eingesetzt, um komplexe Regeln konsistent abzubilden. Regeln helfen Entscheidungen innerhalb von Prozessen zu automatisieren und sind ein wesentliches Element der Selbststeuerung von Prozessen.

- **Data-Management**

Data-Management deckt alle Aspekte hinsichtlich Datenerhaltung, Datenanalyse und Datenstrukturierung ab. Entsprechende Analysewerkzeuge helfen, aus Daten wertvolle Informationen zu gewinnen.

- **Event-Management**

Die zentrale Sammlung und Analyse von Systemereignissen, die überall in einem verteilten System entstehen und deswegen zentral beobachtet und ausgewertet werden müssen, um entsprechende Reaktionen und Eskalationen abzuleiten.

- **IT-Management: Management im Internet der Dinge und Dienste / Device Management**

Das Management im Internet der Dinge und Dienste umfasst die Verwaltung und Kontrolle der am System beteiligten Geräte (*Devices*). Es bietet unter anderem Funktionalitäten für *Software Provisioning*, *Remote Monitoring*, Konfigurationsmanagement, Lizenzmanagement, Fehlermanagement und Fernsteuerung.

- **Kommunikationstechnologie und Netzwerkmanagement**

Erfolgreich verbreitete Kommunikationstechnologie kann in der Fertigung für die kostengünstige und Ad-hoc-Vernetzung eingesetzt werden: 3G, 4G, Ethernet, TCP / IPv6, WLAN, RFID.

- **IT-Hardware**

Consumer- und Standard-IT-Hardware bringen immer günstiger mehr Rechenleistung und Speicherplatz in den Alltag: Server, PC, Smartphones, PDA, Tablet-PCs.

- **Security, Encryption und Public Key Infrastructure**

Die *IT-Security*-Technologie erlaubt es, Vertrauen von Marktteilnehmern in IT-Rechtstrukturen abzubilden und langfristig zu betreiben.

### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen

Um die für die Industrie 4.0 erforderliche Gesamtintegration der CPPS-Basistechnologien zu erreichen, fordert der Arbeitskreis Industrie 4.0 Beratungsunternehmen, Forschungs- und Weiterbildungseinrichtungen auf, zielgerichtet Produktionsunternehmen mit ihren Mitarbeitern auf den Einsatz moderner IKT sowie CPS im industriellen Umfeld (CPPS) vorzubereiten. Veränderungsprozesse und Modellprojekte zur Migration in die Industrie 4.0-Technologien sind zu entwerfen und zu begleiten, um eine Akzeptanz in allen beteiligten Unternehmensbereichen frühzeitig sicherzustellen.

### 5.2.2 AUSBAU BREITBANDINFRASTRUKTUR FÜR INDUSTRIE 4.0

Eine grundlegende Voraussetzung für die Industrie 4.0 ist der Ausbau der Netze (Stromnetz, Internet) bezüglich garantierter Latenzzeiten, Ausfallsicherheit, „*Quality of Services*“ und flächen-deckender Bandbreite. Analog zur Empfehlung des IT-Gipfels im Digitalen Infrastrukturen-Jahrbuch 2011 muss die Breitband-Internet-Infrastruktur in Deutschland – aber auch zu den produzierenden Partnerländern – massiv ausgebaut werden:<sup>11</sup>

„Bei Anwendungen im Maschinenbau und der Automatisierungstechnik kommt es auf eine hohe Funktionszuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kommunikationsverbindung an. Garantierte Latenzzeiten und Stabilität der Verbindungen sind von entscheidender Bedeutung, da sie eine direkte Auswirkung auf das Applikationsverhalten haben.“

„Netzbetreiber sollten die Wünsche von Generalunternehmern stärker wahrnehmen

- Verbindliche / verlässliche SLA (*Service Level Agreements*);
- Verfügbarkeit und Performance von Transportleistungen;
- Unterstützung beim *Debugging* / *Tracing* von Kommunikationsverbindung, insbesondere die Bereitstellung technischer Hilfsmittel hierfür;
- Bereitstellung von hochverfügbaren / garantierten Transportleistungen (fest / garantierte Bandbreite);
- mobilfunk-provider-übergreifende SMS-Empfangsbestätigung;
- provider-übergreifend standardisierte Application *Programming Interfaces* (APIs) für Provisionierung (SIM-Karten-Aktivierung / Deaktivierung);
- Tarifmanagement;
- Kostenkontrolle von Mobilfunkverträgen;
- Quality of Service (fest Bandbreite);
- globales *Roaming* zu vertretbaren Kosten;
- allgemein verfügbare Embedded-SIM-Karten;
- Satellitenlösungen für Funklöcher.“

#### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt nachdrücklich die Umsetzung der seitens der AG 2 „Digitale Infrastrukturen“ des Nationalen IT-Gipfels 2011 vorgelegten Empfehlungen zum Ausbau der Breitband-Internet-Infrastruktur in Deutschland.

Welche Bandbreiten und Echtzeitanforderung im Detail für die Industrie 4.0 bereitgestellt werden müssen, muss in Studien über konkrete Anwendungsfälle (s. *Use Cases*, Anhang A.1) erhoben werden.

<sup>11</sup> Digitale Infrastrukturen, Arbeitsgruppe 2, Jahrbuch 2011 / 2012, Nationaler IT Gipfel.

### 5.3 *Security*<sup>12</sup> und *Know-how*-Schutz

Bei *cyber*-physischen Produktionssystemen handelt es um hochgradig vernetzte Systemstrukturen mit einer Vielzahl von beteiligten Menschen, IT-Systemen, Automatisierungskomponenten und Maschinen. Zwischen den teilweise autonom agierenden technischen Systemkomponenten findet ein reger und oft zeitkritischer Daten- und Informationsaustausch statt.

CPPS werden nur dann realisiert und akzeptiert werden, wenn adäquate, zuverlässige und wirtschaftliche Lösungen zum Schutz des digitalen Prozess-*Know-hows* und zur Absicherung gegen Manipulation und Sabotagen entwickelt und etabliert werden. Im Gegensatz zur *Security* in klassischen IT-Systemen, für die bereits eine Vielzahl von Lösungsansätzen und Produkten existiert, sind heutige Produktionssysteme nur vergleichsweise schwach oder zumeist gar nicht abgesichert.

#### 5.3.1 BEDROHUNGEN FÜR INDUSTRIELLE SYSTEME

Betreiber von Produktionssystemen müssen sich angesichts zunehmender Vorfälle und Schwachstellen der *Security*-Thematik annehmen. So müssen das Risiko und Schadenspotenzial sowohl von nicht-zielgerichteter Schadsoftware als auch von gezielten, qualitativ hochwertigen und mit erheblichem Aufwand durchgeführten spezifischen Angriffen gegen Infrastrukturen im Produktionsumfeld berücksichtigt werden.

Dies gilt sowohl für Infrastrukturen, die unmittelbar mit dem Internet verbunden sind, als auch für diejenigen, welche auf mittelbarem Wege durch *Cyber*-Angriffe attackiert werden können.

Im Rahmen seiner Analysen zur *Cyber*-Sicherheit hat das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) in einer **TOP 10-Liste** die aktuellen Bedrohungen mit der höchsten Kritikalität zusammengestellt, denen sogenannte Industrial Control Systems (ICS) derzeit ausgesetzt sind:<sup>13</sup>

TOP 1. Unberechtigte Nutzung von Fernwartungszugängen

TOP 2. *Online*-Angriffe über *Office*- / *Enterprise*-Netze

TOP 3. Angriffe auf eingesetzte Standardkomponenten im ICS-Netz

TOP 4. (*Distributed*) *Denial-of-Service*-Angriffe

TOP 5. Menschliches Fehlverhalten und Sabotage

TOP 6. Einschleusen eines Schadcodes über Wechseldatenträger und externe *Hardware*

TOP 7. Lesen und Schreiben von Nachrichten im ICS-Netz

TOP 8. Unberechtigter Zugriff auf Ressourcen

TOP 9. Angriffe auf Netzwerkkomponenten

TOP 10. Technisches Fehlverhalten und höhere Gewalt

Die Rangordnung der Bedrohungen ergibt sich aus einer Betrachtung von Aspekten wie beispielsweise der Täterkreis, die Verbreitung und Ausnutzbarkeit der Schwachstellen sowie die möglichen technischen und wirtschaftlichen Folgen eines Angriffs. Nicht in diesen Top 10 enthalten sind weitere Bedrohungen, die heute zwar nachrangig sind, mit Blick auf die Industrie 4.0 aber wichtiger werden. Hierzu gehören beispielsweise der Einsatz von *Smartphones* und *Tablet-PCs* für Steuerungszwecke oder der Trend hin zu *Cloud Computing*. Gleichwohl sind solche und alle weiteren im konkreten Einzelfall relevanten Bedrohungen für die Absicherung im jeweiligen Anwendungsfall geeignet zu berücksichtigen. Darüber hinaus wurde der *Safety*-Aspekt explizit nicht behandelt.

<sup>12</sup> Im Kontext industrieller Sicherheit bezeichnet der Begriff „*Security*“ explizit die technische Sicherheit (beispielsweise der technischen Abläufe) in der Industrie, nicht den Aspekt der Sicherheit für die Beschäftigten (engl. *Safety*).

<sup>13</sup> BSI-Analysen zur *Cyber*-Sicherheit, BSI-A-CS 004, Version 1.00 vom 12.04.2012.

### 5.3.2 SECURITY-HANDLUNGSFELDER

Die Analyse des BSI, die in enger Zusammenarbeit mit *Security*-Experten aus der IT-Industrie und dem Maschinenbau entstanden ist, macht das breite Spektrum möglicher Bedrohungen deutlich. Es reicht deshalb nicht aus, sich auf einzelne Themenfelder wie *Cloud Security* oder *Industrial Security* zu konzentrieren, sondern es sind ganzheitliche und auf die Industrie 4.0 ausgerichtete Sicherheitskonzepte und -produkte zu entwickeln.

Die *IT-Security* im industriellen Umfeld ist ein noch vergleichsweise wenig beachtetes Themenfeld, das erst mit dem Auftauchen von Schadsoftware wie *Stuxnet*, *Duqu* oder *Flame* in den Blick der Öffentlichkeit gelangt ist. Dementsprechend gibt es eine Vielzahl von sowohl Handlungsfeldern als auch Chancen:

- **Industrie 4.0-Security als Teil der deutschen Sicherheitsforschung**

Technologisch sind bereits eine Reihe an Forschungsthemen, wie Produktidentitäten, Wissensmodelle oder *Embedded Security* (vgl. Kap. 4), absehbar. Bei der Erforschung und Entwicklung entsprechender Konzepte und Systeme ist auf eine enge Abstimmung mit und Kompatibilität zu anderen Projekten in der Sicherheitsforschung zu achten, wie sichere Identitäten, Cyber-Security oder der Schutz kritischer Infrastrukturen.

- **Industrie 4.0-Security braucht Unterstützung durch die Politik**

Aktivitäten wie das Zukunftsfeld „sichere Identitäten“, der Aufbau eines *Cyber*-Abwehrzentrums oder die Diskussion von *Security* im Rahmen des IT-Gipfels machen deutlich, dass sich die Politik aktiv um das Thema *Security* kümmert. Gerade in Bezug auf sichere deutsche Infrastrukturen und auf eindeutige rechtliche Rahmenbedingungen ist die Politik gefordert. Zukünftig sollte auch die Industrie 4.0-Security in die politische Betrachtung einbezogen werden. Dabei ist sicherzustellen, dass nicht nationale Hindernisse und Regulierungen aufgebaut werden, die den internationalen Wettbewerb beschränken.

- **Aufbau einer Security-Industrie für die Industrie 4.0 in Deutschland**

*Security*-Produkte für die klassische IT kommen vorwiegend aus anderen Staaten wie USA oder Israel. Parallel zur Entwicklung von *cyber*-physischen Systemen und CPS-Produkten bietet sich die Chance, in Deutschland eine eigene *Security*-Industrie für die Industrie 4.0 aufzubauen und die spezifischen Kenntnisse über Produktions- und Automationsprozesse, mechatronisches *Engineering* oder *Embedded Systems* als Wettbewerbsvorteil zu nutzen.

- **Security-Sensibilisierung der industriellen Mitarbeiter**

Bei der konkreten Realisierung von *Security*-Lösungen in Unternehmen ist die reine Implementierung technischer *Security*-Produkte nicht ausreichend. Eine der entscheidenden Schwachstellen liegt darin, dass die Mitarbeiter im Umgang mit *Security* nicht ausreichend geschult sind. Geeignete und auf das industrielle Umfeld ausgerichtete Sensibilisierungskampagnen könnten helfen, diese Defizite abzubauen.

- **Etablierung einer Arbeitsgruppe Security in der Industrie 4.0**

In Analogie zum „Arbeitskreis Sicherheit in der Wirtschaft“ wird die Einrichtung einer Arbeitsgruppe „*Security* in der Industrie 4.0“ empfohlen, in der die wissenschaftlichen, unternehmerischen und politischen Aktivitäten zu *Security* im Umfeld der Industrie 4.0 aufgegriffen und abgestimmt werden.

### 5.3.3 PRODUKTPIRATERIE UND KNOW-HOW-SCHUTZ

Die Innovationskraft des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus und die Attraktivität der weltweit angebotenen Produkte hat leider auch eine Kehrseite: nämlich Produktpiraterie. Laut einer aktuellen Umfrage des VDMA liegt der Umsatzverlust, der den deutschen Maschinen- und Anlagenbauern in 2011 entstanden ist, bei inzwischen knapp 8 Milliarden Euro, einer Steigerung um 24 Prozent gegenüber der letzten Umfrage vor zwei Jahren. Ein Umsatz in dieser Schadenshöhe würde der Branche knapp 37.000 Arbeitsplätze sichern. Inzwischen sind fast zwei Drittel der befragten Unternehmen betroffen, bei Unternehmen mit mehr als 1.000 Mitarbeitern, die zumeist international aktiv sind, liegt die Quote sogar bei 93 Prozent.

Problematisch sind allerdings nicht nur Umsatzverluste, sondern auch Imageschäden und der Verlust von *Know-how*. In Extremfällen äußert sich dies darin, dass frühere Plagiateure zu Wettbewerbern geworden sind. Neben dem sklavischen physikalischen Nachbau von Produkten geht es zunehmend auch um das gezielte Abgreifen von Unternehmens- und Produkt-*Know-how*.

Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung neuer Technologien und Methoden zum Schutz des eigenen Wissens von enormer Bedeutung (vgl. Kap. 4.2.1.2). Diese Entwicklung ist darüber hinaus auch politisch zu begleiten über:

- **Maßnahmen zur Eindämmung von Produktpiraterie**

Die Bundesregierung muss sich auf politischer Ebene weiterhin für die Eindämmung von Produktpiraterie einsetzen. So müssen beispielsweise nach dem Scheitern von ACTA neue Wege gefunden werden, um dem Vertrieb von Plagiaten über das Internet entgegenzuwirken.

- **Aufklärung über die Gefahren durch Wirtschaftsspionage**  
Im Verfassungsschutzbericht 2011 heißt es unter anderem „Für einige Nachrichtendienste sind besonders Aufklärungsziele in den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft und Technik von Interesse. Darum sind Sensibilisierung, Information und Aufklärung von Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen über die Gefahren durch Wirtschaftsspionage besonders wichtig.“
- **Schaffung eines Rechtsrahmens für den Know-how-Schutz bei CPPS-Systemen**  
Für den automatisierten und maschinellen Informationsaustausch in und zwischen CPPS-Systemen ist ein Rechtsrahmen zu entwickeln, der IP-Rechte, Vertraulichkeit, Gültigkeit und Zugriffsrechte definiert und sicherstellt.

#### 5.3.4 DATENSCHUTZ

Die Industrie 4.0 stellt besondere Anforderungen an den Datenschutz – insbesondere angesichts der technischen Möglichkeiten der Erfassung und Auswertung von Informationen zum Gesundheitszustand der Beschäftigten an den Maschinen der *Smart Factory*. Gerade in Deutschland herrscht im Zuge des Rechts auf informationelle Selbstbestimmung eine besondere Sensibilität hinsichtlich des Umgangs mit personenspezifischen Daten.

Der Arbeitskreis wird hierzu in der ausführlichen Berichtsversion (April 2013) erste Handlungsfelder in Abstimmung mit den Datenschutzexperten der Fachverbände vorlegen (s. Verweis in Kap. 5.6).

##### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 erachtet das Thema Sicherheit mit den Aspekten *Security*, *Know-how*-Schutz sowie Datenschutz als zentralen erfolgskritischen Faktor für die Industrie 4.0.

Er empfiehlt daher zur Erarbeitung von Umsetzungsempfehlungen den engen Austausch mit der Promotorengruppe Sicherheit der Forschungsunion, dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik und den Datenschutzexperten der Fachverbände.

Die ersten Umsetzungsempfehlungen werden mit der ausführlichen Berichtsversion im April 2013 vorgelegt werden.

## 5.4 Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) – Betriebliche Arbeitsorganisation und Arbeitsgestaltung

Man muss kein Prophet sein: Sollten *Cyber-Physical Systems* breitflächig in der industriellen Welt zum Einsatz kommen, sind in einem Zeitraum von fünf bis zehn Jahren erhebliche qualitative Veränderungen der Industriearbeit zu erwarten.

Zu den arbeitsrelevanten Auswirkungen liegen bislang keine gesicherten empirischen Befunde oder Prognosen vor. Mit Blick auf die hochautomatisierten Bereiche in der Halbleiter- und Automobilproduktion lässt sich indes fundiert spekulieren, dass mit einer verstärkten informationstechnischen Durchdringung und sensor-gestützten Vernetzung des Wertschöpfungsprozesses umfassende Mensch-Maschine- und System-Interaktionen an Bedeutung gewinnen werden: Multimedia-, *Social-Media*- und *Cloud*-Technologien, Endgeräte aus der Bürowelt (*Tablet-PCs*, *Smartphones*, *Ethernet*) und neuartige, adaptive Assistenzsysteme werden zunehmend Verbreitung in den industriellen Arbeitssystemen finden.

In kurz- bis mittelfristiger Perspektive wird sich der Arbeitsprozess im beständigen Wechsel virtueller und realer Werkbänke oder Schreibtische vollziehen. In langfristiger Perspektive werden Produktentwicklung und Produktion durchgängig virtuell gestaltet sein.

Für die Mehrzahl der Beschäftigten in der Fertigung produzierender Unternehmen ist zu vermuten, dass regulierende Tätigkeiten wie die Steuerung und Programmierung sowie die Störungs- und Fehlerbehebung weiter an Bedeutung gewinnen. Für Ingenieurinnen und Ingenieure in den Entwicklungsabteilungen ist im Verlauf des Zusammenwachsens von Produktions- und Informationstechnologie mit steigenden Anforderungen besonders an die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu rechnen. Anders gesagt: Wenn der *Software*-Anteil in klassischen mechanischen Produkten und Produktionsprozessen steigt, wächst auch der Bedarf an fachübergreifendem Wissen und Fähigkeiten sowie an Verständnis für die Arbeits- und Denkweisen korrespondierender Disziplinen und Fakultäten. Vor diesem Hintergrund sind folgende drei Handlungsfelder von Belang:

## 1. Ambivalente Folgen für Tätigkeitsprofile, Kompetenzen und Beschäftigung systematisch beobachten und hinsichtlich ihrer Auswirkungen für die Beschäftigten analysieren

Die Arbeit wird an alle Beschäftigten deutlich erhöhte Komplexitäts-, Abstraktions- und Problemlösungsanforderungen stellen („Denken in übergreifenden Prozessen“, „Komplexitätsreduzierung erlernen“). Darüber hinaus wird den Beschäftigten ein sehr hohes Maß an selbstgesteuertem Handeln, kommunikativen Kompetenzen und Fähigkeiten zur Selbstorganisation abverlangt. Kurzum: Die subjektiven Fähigkeiten und Potenziale der Beschäftigten werden noch stärker gefordert sein. Das bietet **Chancen** auf qualitative Anreicherung, interessante Arbeitszusammenhänge, zunehmende Eigenverantwortung und Selbstentfaltung. Indes implizieren die Anforderungen der neuen, virtuellen Arbeitswelt auch **Gefahren für Erhalt und Sicherung des Arbeitsvermögens**. Je mehr sich der Arbeitsalltag verdichtet und das technische Integrationsniveau in sich ständig flexibel ändernden Netzwerken ansteigt, können Arbeitsintensivierung, ein Verlust an Zeitsouveränität und eine steigende Spannung zwischen Virtualität und eigener Erfahrungswelt Raum ergreifen.

Der Verlust an Handlungskompetenz, die Erfahrung der Entfremdung von der eigenen Tätigkeit durch eine fortschreitende Dematerialisierung und Virtualisierung von Geschäfts- und Arbeitsvorgängen wären die Folgen. Nicht auszuschließen ist, dass sich „alte“ und „neue“ Gefährdungen für das Arbeitsvermögen in neuer Qualität – sowohl in der Bedeutungs- als auch der Vernetzungsdimension – überlagern und Formen der Selbstausbeutung befördern. Deshalb kann man die Industrie 4.0 nicht mit Arbeitsverbesserungen gleichsetzen. Die Herausforderung besteht vielmehr darin, Lösungen zu finden, mit denen die Beschäftigten dafür gewonnen werden können, Stärken und Leistungen, Wissen und Kompetenzen in das Produktionssystem 4.0 einzubringen.

## 2. Arbeit auf Basis einer sozio-technischen Gestaltungsperspektive als lebendiges Potenzial in der Industrie 4.0 entwickeln und nutzen

Wie sich der Arbeitsalltag in einer Industrie 4.0 konkret darstellen wird, ist derzeit (noch) offen. Die *Smart Factory* enthält ein Potenzial für eine neue Arbeitskultur, könnte Wege zu einem intelligenten, an den Interessen der Beschäftigten orientierten Verständnis „guter Arbeit“ eröffnen. Indes wird sich dieses Potenzial nicht im Selbstlauf realisieren. Entscheidend dafür sind neben Weiterbildung Organisations- und Gestaltungsmodelle von Arbeit, die ein hohes Maß an selbstverantwortlicher Autonomie mit dezentralen Führungs- und Steuerungsformen kombinieren, die „loslassen“ und den Beschäftigten erweiterte Entscheidungs- und Beteiligungsspielräume sowie Möglichkeiten zur Belastungsregulation zugestehen.

Die Technik bietet Optionen in beide Richtungen. Die Systemauslegung kann sowohl als restriktive, kontrollierende Mikrosteuerung als auch als offenes Informationsfundament konfiguriert werden, auf dessen Basis der Beschäftigte entscheidet. Anders gesagt: Über die Qualität der Arbeit und der Arbeitsbedingungen entscheiden nicht die Technik oder technische Sachzwänge, sondern Wissenschaftlerinnen und Manager, die *Cyber-Physical-Systems* entwickeln und umsetzen.

Gefragt ist in diesem Zusammenhang eine **sozio-technische Gestaltungsperspektive**, in der Arbeitsorganisation, Technik- und *Software*architekturen in enger wechselseitiger Abstimmung, „aus einem Guss“ mit dem Fokus darauf entwickelt werden, intelligente, kooperative, selbst organisierte Interaktionen zwischen den Beschäftigten und / oder den technischen Operationssystemen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu ermöglichen.

### 3. Partizipative Arbeitsgestaltung in der Industrie 4.0 statt Neo-Taylorismus

Dass solche arbeitsorientierten Gestaltungsansätze gegenwärtig in der Industrie nur rudimentär verbreitet sind, verdeutlicht ein Blick auf die arbeitssoziologischen Befunde zum Ist-Zustand der Industriearbeit. Mit dem Ziel der Standardisierung und Optimierung von Arbeitsvollzügen werden heute in vielen Unternehmen sogenannte Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) in den Fertigungen und Büros der industriellen Kernsektoren eingeführt. Diese Systeme sind vielfach sehr restriktiv im Aufgabenzuschnitt ausgelegt und allzu häufig mit einem Verlust von Beteiligungsmöglichkeiten, Handlungsspielräumen sowie Dequalifizierung verbunden. Ein erstarkender Neo-Taylorismus muss aber keine zwangsläufige Begleiterscheinung Ganzheitlicher Produktionssysteme sein. Dies zeigen Beispiele insbesondere aus (hoch-) automatisierten Fertigungsabschnitten, in denen auch unter Standardisierungsbedingungen kompetentes, auf Beteiligung ausgerichtete Arbeits- und Innovationshandeln möglich ist – gestützt auf intelligente Organisations- und Qualifizierungskonzepte.

Damit ist die Entwicklungsrichtung für die Industrie 4.0 klar: Es ist schwer vorstellbar, dass dieses auf intelligente Informationsvernetzung ausgerichtete Zukunftsprojekt auf Basis eines Taylorismus 4.0 reüssieren kann. Eine weitere Radikalisierung des tayloristischen Gestaltungsansatzes kann nicht als aussichtsreicher Weg gelten, um die *Smart Factory* im Einvernehmen mit den Beschäftigten realisieren und damit neue Effizienzvorteile erschließen zu können. Gerade weil die Industrie 4.0 ein hochkomplexes, virtuelles System ist, braucht sie den Menschen als „Sensor“, Entscheider und Steuerer.

In diesem Zusammenhang kann die gewerkschaftliche Innovationsstrategie „Besser statt billiger“ tragfähige Standards und Handlungskorridore für eine „gute Arbeit“ und sichere Zukunft von Standorten und Beschäftigung aufzeigen. Diese Strategie umfasst einerseits arbeitspolitische Belange wie eine arbeitsorientierte Organisationsgestaltung, umfassende Beteiligung, Mitbestimmung und Qualifizierung. Andererseits ist sie mit globalen Wettbewerbsanforderungen kompatibel. „Besser statt billiger“ zieht auf Technologieführerschaft als Weichenstellung für die industrielle Zukunft Deutschlands. In dieser Perspektive stellen „gute Arbeit“, technologische Innovation und Mitbestimmung beim Projekt 4.0 keinen Widerspruch dar, sondern eine in die Zukunft weisende Kompasseneinstellung bei der Suche nach technologisch effizienten und sozial ausgewogenen Lösungen.

#### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 erachtet die oben ausgeführten drei Handlungsfelder als zentral, um das Potenzial der Industrie 4.0 für die Beschäftigten zu heben. Erste Umsetzungsempfehlungen sollten hierzu gemeinschaftlich – im Sinne einer Plattform „Zukunft der Arbeit“ – erarbeitet werden. Handlungsoptionen dafür werden in der kommenden Berichtsversion aufgezeigt werden.



## 5.5 Mensch-Maschine-Interaktion – Qualifizierung und Aus- und Weiterbildung

Die Umsetzung der Industrie 4.0 muss wie ausgeführt zu einem arbeitsorientierten sozio-technischen Fabrik- und Arbeitssystem führen und stellt die berufliche und akademische Aus- und Weiterbildung vor neue Herausforderungen.

Diese umfassen Erweiterungsbedarfe für die Aus- und Weiterbildung, sowohl von Entwicklern produktionstechnischer Komponenten als auch von deren Anwendern. Dieses gilt für alle Qualifizierungsstufen. Der Ausbau der Weiterbildung sollte dabei eine hohe Priorität haben. Ziel ist es, ein neues, ganzheitliches Organisationsverständnis zu vermitteln und Handlungssicherheit durch die Transparenz der Systeme zu befördern. Durch **lernförderliche Arbeitsorganisation und adäquate Qualifizierungsstrategien** soll eine menschenzentrierte Produktionsgestaltung ermöglicht werden, die den heterogenen Bildungs- und Erfahrungsstand und die unterschiedlichen Kompetenzbündel der Beschäftigten derart berücksichtigt, dass die Innovationsfähigkeit von Menschen und Unternehmen gestärkt wird. Darüber hinaus werden Industrie 4.0-Arbeitsplätze unter anderem unter Verwendung von CPS-Technologien so ausgelegt, dass die zwischenmenschliche Kommunikation unter den Beschäftigten befördert wird und Arbeitsunterstützung, Lernaufgaben sowie physisches Training in sinnvollen Intervallen in den Arbeitsalltag arbeitsplatznah integriert werden. Dabei muss stets Rücksicht auf die Belastbarkeit der Beschäftigten genommen werden.

Bei der Gestaltung der Arbeitsplätze müssen zudem die unterschiedlichen Rollen der Beschäftigten (von ungelernten Beschäftigten, Facharbeitern, Beschäftigten mit Meister- oder Techniker-ausbildung bis zum akademischen Personal mit *Bachelor-, Master- oder Ingenieurstudium*) sowie deren heterogener Bildungsstand und Kompetenzbündel berücksichtigt werden.

### Vorläufige Umsetzungsempfehlungen:

Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt die folgenden Maßnahmen zur Qualifizierung, Aus- und Weiterbildung in der Industrie 4.0:

- 1. Förderung von Modellvorhaben:** Für die Industrie 4.0 sind die berufliche und akademische Erstausbildung und die Weiterbildung weiterzuentwickeln beziehungsweise auszubauen und zu verzahnen. Die relevanten Ausbildungsinhalte müssen identifiziert und adäquat didaktisch und methodisch aufbereitet werden. Dazu sollten Aktivitäten in Förderprojekten verankert werden, aus denen sowohl Konzepte der Aus- und Weiterbildung entstehen. Insbesondere die Durchlässigkeit zwischen beruflicher und akademischer Bildung sowie zwischen verschiedenen Ausbildungsgängen und -systemen durch Kompetenz-basierung der Aus- und Weiterbildung und Anerkennung

„fachfremder“ Kompetenzen sollte ermöglicht und zugleich eine enge Kooperation zwischen Betrieb und Hochschulen gefördert werden.

- 2. Einrichtung und Förderung von „Netzwerken guter Praxis“:** Zur Sicherung von Wissenstransfer und der Nachhaltigkeit sollten „Netzwerke guter Praxis“ für Aus- und Weiterbildung wettbewerbsfähig ausgeschrieben werden. Diese Netzwerke haben die Aufgabe, Beispiele zu entwickeln und zu dokumentieren, aufzubereiten, Akteure zu vernetzen und den Transfer zu unterstützen.

- 3. Förderung der Entwicklung digitaler Lerntechniken:** Digitalen Medien und innovativen Lerntechnologien muss eine herausragende Rolle in der Wissensvermittlung und Kompetenzentwicklung zukommen. Um Qualifikationspotenziale zu erkennen und transparent zu machen, müssen Standards für die Anerkennung non-formaler und informeller Bildung entwickelt werden.

- 4. Erforschung von neuen Ansätzen für arbeitsplatz-nahen Wissens- und Kompetenzerwerb:** Vor dem Hintergrund des technischen und demografischen Wandels und im Hinblick auf die heterogenen Voraussetzungen der Lernenden (zum Beispiel Alter und Bildungs-, Erfahrungs- oder kultureller Hintergrund) müssen neue Ansätze für die Didaktik sowie die Konzeption etwa von Assistenzsystemen entwickelt werden. Insbesondere ist auf arbeitsplatznahe Weiterbildung zu achten, die Gesundheit, Bewegung und Lebensführung als Voraussetzungen für ein längeres Arbeitsleben einschließen. Es ist eine lernförderliche Arbeitsorganisation zu schaffen, dazu sind entsprechende *Trainingskonzepte*, Analysemethoden und Führungskonzepte zu entwickeln. Eine lernförderliche Arbeitsorganisation ist ferner Grundlage für lebensbegleitendes Lernen und sollte daher gerade im Hinblick auf die zu erwartende schnelle technische Veränderung bei CPS-basierten Systemen Ziel einer *Smart Factory* sein. Die Effektivität von arbeitsplatznahe und externem Lernen einerseits und allgemeinem und beruflichem Lernen andererseits sollte im Vergleich weiter erforscht werden.

- 5. Förderung von Querschnittskonzepten zu Fragen der Arbeitsorganisation:** Alle Maßnahmen zur Qualifizierung, Aus- und Weiterbildung für Industrie 4.0 erfordern eine umfassende Begleitforschung in Form von Forschungs- und Umsetzungspartnerschaften. Grundlegend zu untersuchen sind dabei Fragen der Arbeitsorganisation, Prozessgestaltung, Steuerung und Kooperation sowie ihre Konsequenzen für die Entwicklung der beruflichen Tätigkeit und der Qualifikation in Industrie 4.0, einschließlich des Erhalts der Beschäftigungsfähigkeit in einem längeren Leben.

## 5.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Industrie 4.0 wirft eine Reihe juristischer Fragestellungen auf, die sich durch die technischen Neuerungen wie beispielsweise die Durchgängigkeit des *Engineerings* durch die komplette Wertschöpfungskette oder auch die Möglichkeit der Erfassung persönlicher Daten der Beschäftigten ergeben. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für Industrie 4.0 umfassen dabei Haftungsfragen, urheberrechtliche Fragestellungen, Produktpiraterie, IP-Schutz aber auch kartellrechtliche Fragen oder das Thema Datenschutz (s. Kapitel 5.3.2). Zielsetzung ist es, dafür erste Handlungsfelder zu benennen und mögliche Handlungsoptionen zu skizzieren sowie möglichen Handlungsbedarf nicht zuletzt auch hinsichtlich der juristischen Ausbildung zu identifizieren.

Das Kapitel und die entsprechenden Handlungsempfehlungen werden für die ausführliche Berichtsversion zur Hannover Messe 2013 erarbeitet.

## 5.7 Vorläufige Umsetzungsempfehlungen für die duale Strategie

Um sowohl die detailliert hergeleitete duale Strategie mit den drei Merkmalen – horizontale Integration, vertikale Integration (*Smart Factory*) und Durchgängigkeit des *Engineerings* – zu verfolgen und gleichzeitig die Beschäftigten in den einzelnen (mittelständisch geprägten) Unternehmen auf Industrie 4.0 geeignet vorzubereiten als auch die Basis für die künftig verwendeten Technologien in einer vermehrt automatisierten Produktion zu legen, empfiehlt die Promotorengruppe KOMMUNIKATION der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft:

### 1. ENTWICKLUNG VON TECHNOLOGIE-ROADMAPS UND KOORDINATION

#### a) Koordination von Technologie-Roadmaps

Hierzu zählt die eigentliche **Entwicklung der Roadmap**, die Suche nach geeigneten **Best-Practice-Beispielen** sowie die **Auswahl geeigneter Industrie- und Forschungspartner**. Neben diesen Aspekten der Koordination sollten in regelmäßigen Abständen **Fortschrittsberichte** der abgeschlossenen, geplanten und laufenden Aktivitäten verfasst sowie die Roadmap aktuellen Entwicklungstendenzen angepasst werden.

#### b) Koordination von Umsetzungsaktivitäten

Neben der Koordination von Technologie-Roadmaps sollte auch der zeitliche Ablauf der einzelnen Förderprojekte überwacht werden. Hierbei ist insbesondere die **Verzahnung mit weiteren Industrie- und Hochschulpartnern** wichtig, um durch diesen Vernetzungsgedanken auch die technologischen Ziele der Industrie 4.0 schnell und ohne Redundanzen zu erreichen.

### 2. FÖRDERUNG DER KONSOLIDIERTEN FORSCHUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Förderung der konsolidierten Forschungsempfehlungen in Verbundprojekten zwischen Industrie und Forschungseinrichtung muss vorbereitet, ausgeschrieben und umgesetzt werden. In öffentlichen Wettbewerbsverfahren sollten Ideen generiert und neue Konzepte vorgestellt und entwickelt werden können. Neben einer reinen Forschungsprojektfinanzierung, die durch die Bundesebene (BMWi und BMBF) bereitgestellt werden müsste, sollten die im Folgenden formulierten weitergehenden Maßnahmen verstetigt werden.

### 3. WEITERBILDUNG UND QUALIFIKATION

Die (Weiter-) Bildung und Qualifizierung der erforderlichen Fach- und Führungskräfte auf Basis von Technologie-Roadmaps wird sowohl im akademischen und beruflichen Bereich an Stellenwert gewinnen. Hierbei ist neben Weiterbildungsangeboten für die Industrie auch der Aufbau von Studiengängen und Vorlesungen für den akademischen Nachwuchs zu berücksichtigen.

#### 4. INTERNATIONALISIERUNG

Um die duale Strategie, Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter in der Produktionstechnik zu etablieren, weiter zu stärken und im internationalen Vergleich zu bestehen, sollten internationale Bestrebungen im Kontext CPS oder aber der Industrie 3.0 beziehungsweise 4.0 systematisch analysiert werden.

Deutschland muss mit seinen dezentralen und mittelständisch geprägten Strukturen im Maschinen- und Anlagenbau befähigt werden, die Führungsrolle bei der Integration von neuen Technologien der IKT und der KI in die Produktion weiter auszubauen. Sollten weitere strukturelle oder qualifikationsabhängige Anforderungen aus diesem internationalen Wettbewerb entstehen, sollten diese ebenfalls in die Strategie Industrie 4.0 integriert werden.

#### 5. EINRICHTUNG VON INDUSTRIE 4.0-KOMPETENZZENTREN

Die adressierten Forschungs- und Entwicklungsthemen innerhalb der Industrie 4.0 haben hohe Relevanz. Langfristig wird empfohlen:

##### a) Der Aufbau eines Kompetenzatlas (Transparenz über den Status quo)

Um in einer durch die Industrie 4.0 vernetzten Welt auch der Vernetzung des verfügbaren Wissens sowie der Kompetenzträger in Unternehmen und Forschungseinrichtungen Rechnung zu tragen, wird der **Aufbau eines Kompetenzatlas** empfohlen. Hier sollten ebenfalls die aktuellen Forschungsaktivitäten in der Industrie und an den Forschungseinrichtungen bezogen auf die adressierten Themen einfließen.

##### b) Die Koordination von Forschungsaktivitäten innerhalb der Kompetenzzentren

Zur weiteren Förderung von Stärken an einzelnen Forschungs- und Entwicklungsstandorten wird eine enge Verzahnung von Industrie- und Forschungseinrichtungen empfohlen. Diese kann insbesondere für die **interdisziplinäre Zusammenarbeit von Informatikern, Ingenieuren und Automatisierern** genutzt werden, um künftig weitergehende Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Verbund abzustimmen.

##### c) Die Unterstützung als Innovationsinkubatoren

Um die mögliche Kommerzialisierung von technologiegetriebenen Innovationen aus der Industrie 4.0 heraus zu gestalten, sollte eine Art „Innovationsinkubator“ strukturiert und organisiert werden. Dieser könnte unter anderem auch aus den initiierten Förderprojekten entstehende *Start-ups* anleiten und in der ersten Phase der Geschäftsmodellfindung begleiten oder beraten.

#### 6. AUFBAU EINER INDUSTRIE 4.0-COMMUNITY

##### a) Unterstützung von Standardisierungs- und Normungsaktivitäten

Um den Auf- und Ausbau einer Industrie 4.0-*Community* zu unterstützen, sollten Projekte in der Industrie 4.0 nicht als Einzellösungen entwickelt und vollständig losgelöst voneinander betrachtet werden. Hier gilt es zunächst eine gemeinsame Sprache zu finden, Begriffe im Kontext von Industrie 4.0 disziplinübergreifend zu definieren. Darüber hinaus sollte zur Durchsetzung der in Deutschland über Förderprojekte initiierten Technologieentwicklung proaktiv über Standardisierungsbeziehungsweise Normungsbestrebungen nachgedacht werden, um die entwickelte Technologie für eine breite Masse bereitzustellen. Aus diesem Grund sollte über die Förderung firmenübergreifender Arbeitsgruppen zur Erarbeitung von Standards nachgedacht werden. Ziel dieser Bemühungen muss es allerdings sein, dass ein breiter Konsens bei der Entwicklung der Standards gefunden wird.

##### b) Wert einer Industrie 4.0-Community

Eine Industrie 4.0-*Community* befruchtet zudem den Austausch zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie. Dieser könnte zudem noch durch die Organisation von Konferenzen, Newslettern oder die Beteiligung in Zeitschriften manifestiert werden (s. Kapitel 7.).

##### c) Gesellschaftliche Verpflichtung

Letztendlich trägt diese Form der Zusammenarbeit dazu bei, dass sowohl in der Industrie als auch in der Gesellschaft das Thema Industrie 4.0 Rückhalt erfährt und Mechanismen, wie wir sie aus unserem täglichen multimedialen Umfeld kennen, langfristig auch in der produzierenden Industrie üblich werden.

#### 7. AUFBAU VON DEMONSTRATIONSFABRIKEN

Die Industrie 4.0 kann nur dann in allen Facetten einer breiten Öffentlichkeit präsentiert werden, wenn durch eine Systemintegration in **Demonstrationsfabriken** ihre positiven Effekte verdeutlicht werden. Demonstrationsfabriken sollten an **unterschiedlichen Standorten in Deutschland** entstehen und in der Lage sein, exemplarische Prozessketten abzubilden und eine **Validierung der in Forschungsverbünden** zwischen Industrie und Forschung entwickelten Konzepte zu ermöglichen. Aus diesen Demonstrationsfabriken ergeben sich letztendlich **weitere Handlungsbedarfe** für die ganzheitliche Umsetzung von Industrie 4.0.

## 6 WO STEHEN WIR IM INTERNATIONALEN VERGLEICH?

Die Industrie 4.0 ist als Zukunftsprojekt für die Standortsicherung im internationalen Wettbewerb nur durch profunde Kenntnisse zu bewältigen. Neben Deutschland haben auch andere Länder die Herausforderungen für die Industrie als einen strategisch wichtigen Trend identifiziert, etwa die USA und Australien. Hier wird der Fokus aber stärker auf die Technologie gelegt, beispielsweise in einem *Special Report „IT and Operational Technology Alignment“* des IT-Analysten Gartner.<sup>14</sup> Gartner bezeichnet das Feld „Industrie 4.0“ als die Konvergenz von betrieblicher Informationstechnologie (IT) und „Operational Technology (OT)“, die als „*physical-equipment-oriented technology*“ betitelt wird. Die Analysten sehen diesen Trend in mehreren Branchen: Gesundheitswesen, Transport, Verteidigung, Energie, Luft- und Raumfahrt, Produktion, Bergbau und Rohstoffproduktion. Gemeinsamen Standards, Plattformen und Schnittstellen werden neben der IT-Sicherheit besondere Bedeutung zugesprochen. Das Konzept „Operational Technology (OT)“ liegt wesentlich näher an den in Deutschland erfolgreichen eingebetteten *Software*-Systemen in der Fertigung als an der Revolution durch Industrie 4.0.

Unter dem Stichwort „*Manufacturing is going digital*“ spricht auch der Economist im April 2012 von einer „*third industrial revolution*“<sup>15</sup> und beschreibt insbesondere den disruptiven Charakter des Trends – sowohl für die etablierten Geschäftsmodelle existierender Unternehmen als auch für die klassische Industriepolitik der Regierungen: „*Consumers will have little difficulty adapting to the new age of better products, swiftly delivered. Governments, however, may find it harder. Their instinct is to protect industries and companies that already exist, not the upstarts that would destroy them.*“ Wenngleich hier von einer dritten und nicht einer vierten industriellen Revolution geschrieben wird, entspricht die im Artikel eingenommene Perspektive derjenigen der Autoren.

Für die ausführliche Berichtsversion 2013 soll eine erste Einordnung der deutschen Wirtschaft im Hinblick auf ihre gegenwärtige globale Wettbewerbsfähigkeit im Bereich CPS (*Benchmark / Internationaler Vergleich*) vorgenommen werden. Der Arbeitskreis Industrie 4.0 empfiehlt, hierzu eine Analyse des internationalen Benchmarks auch im Rahmen der Forschungsförderung zu unterstützen.

14 <http://www.gartner.com/technology/research/it-ot-alignment/>.

15 The Economist vom 12. April 2012; Artikel: The third industrial revolution – the digitisation of manufacturing will transform the way goods are made – and change the politics of jobs too. Printausgabe; Online unter: <http://www.economist.com/node/21553017>.

## 7 AUSBLICK AB 2013 – WISSENSTRANSFER & *COMMUNITY-BUILDING* AUF DER „PLATTFORM INDUSTRIE 4.0“

Die Industrie 4.0 ist nicht nur aus technologischer Perspektive, sondern auch in Bezug auf die Zusammenarbeit der einzubindenden Akteure (Unternehmen, Verbände, Forschung, Politik) ein auf hochgradige Vernetzung angewiesenes Zukunftsfeld. Die Vision Industrie 4.0 kann nur dann Realität werden, wenn die heute teilweise bestehenden Grenzen und Hemmnisse zwischen den Akteuren überwunden und abgebaut werden. Im Sinne einer gemeinschaftlichen Zielerreichung müssen kooperative und kommunikative Arbeits- und Informationsstrukturen geschaffen werden, welche die folgenden Integrationsmerkmale aufweisen:

- **disziplinübergreifend** (Produktionstechnik, Automatisierungstechnik, Informationstechnik, Arbeitswissenschaft),
- **branchenübergreifend** (Maschinenbau, Elektrotechnik, IKT),
- **verbandsübergreifend** (VDMA, ZVEI, BITKOM, BDI, IGM), und
- **unternehmensübergreifend** (alle Unternehmensgrößen, Anbieter und Anwender, Wertschöpfungsnetzwerke).

Bei der Zusammensetzung des Anfang 2012 etablierten Arbeitskreises Industrie 4.0 unter Co-Leitung von acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) und der Robert Bosch GmbH, wurden diese Integrationsanforderungen größtenteils erfüllt, mit einer starken Führungsrolle der beteiligten Unternehmen und Forschungsinstitute. Für die weiterführende Begleitung der Industrie 4.0 werden **Verbände** eine stärkere Rolle einnehmen müssen, um als Multiplikatoren die Zusammenarbeit unter den Akteuren und den Wissenstransfer in die Breite sicherzustellen.

Für die Fortführung und Begleitung des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 und für die Schaffung einer Industrie 4.0-*Community* soll eine „**Plattform Industrie 4.0**“ etabliert werden. Zentrales Organ ist ein industrieller Lenkungsreis mit Vertretern aus Industrie und Verbänden, dem ein wissenschaftlicher Beirat zur Seite gestellt wird.

Zur Unterstützung des Lenkungsreises, zur operativen Umsetzung und zur Koordination abgestimmter Aktivitäten wird die Einrichtung einer Geschäftsstelle Industrie 4.0 vorgeschlagen, über die insbesondere die folgenden Aufgabenfelder abgedeckt werden:

- Etablierung einer zentralen Anlaufstelle für interessierte Unternehmen, Institutionen, Politik und Öffentlichkeit
- Aufbau und Pflege eines gemeinsamen Informationsportals für den Wissenstransfer
- Operative und administrative Unterstützung des Lenkungsreises
- Fortführung der bisheriger Arbeitsgruppen oder Einrichtung neuer Arbeitsgruppen / Redaktionskreise
- Koordination der Interessen und Schwerpunkte der beteiligten Verbände und Institutionen
- Vernetzung mit anderen thematisch verwandten Plattformen oder Initiativen (zum Beispiel *it's OWL*, Autonomik)
- Öffentlichkeitsarbeit über Publikationen, Veranstaltungen oder Messen

Die operative und inhaltliche Weiterentwicklung der Industrie 4.0 soll wie bisher auf Arbeitsgruppenebene erfolgen, mit klar spezifizierten Themenfeldern. Basierend auf den Handlungsempfehlungen bieten sich folgende Arbeitsgruppen an:

- AG Standardisierung (Schnittstellen, Referenzarchitektur)
- AG Arbeitsgestaltung und -organisation
- AG Demonstrationsfabriken (*Smart Factories*)
- AG Geschäftsmodelle
- AG Industrial IT-Security
- AG Forschung
- AG Rechtliche Rahmenbedingungen
- AG Aus- und Weiterbildung
- AG Öffentlichkeitsarbeit

Die Entscheidung über Bildung, Konzeption und Zusammensetzung von Arbeitsgruppen erfolgt durch den industriellen Lenkungsreis.

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) und der Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie (ZVEI) erklären ihre Bereitschaft, die Geschäftsstelle zu betreiben. Angesichts der Bedeutung von Informations- und Kommunikationslösungen für das Thema Industrie 4.0 prüft der Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM) derzeit eine aktive Beteiligung an der gemeinsamen Plattform, der Geschäftsstelle und dem Industriellen Lenkungsreis. Art und Umfang dieser Beteiligung werden im Oktober 2012 durch das BITKOM-Präsidium festgelegt. Bis dahin werden die entsprechenden Beteiligungsmöglichkeiten offen gehalten.

Das folgende Bild skizziert einen Entwurf der Organisationsstruktur der Plattform Industrie 4.0 (Stand: 02.10.2012, S. Abb.15).

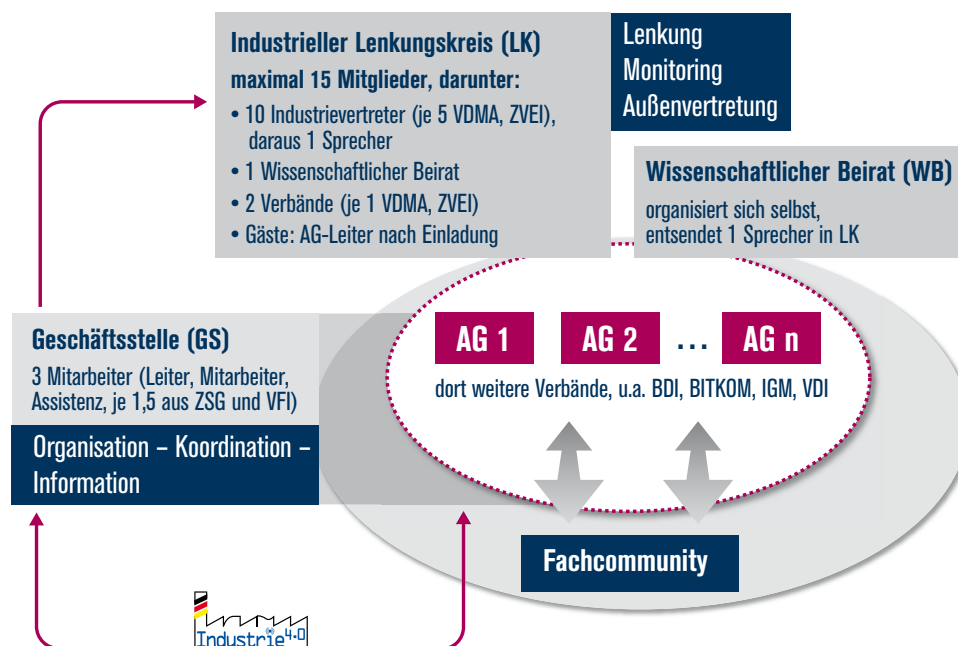
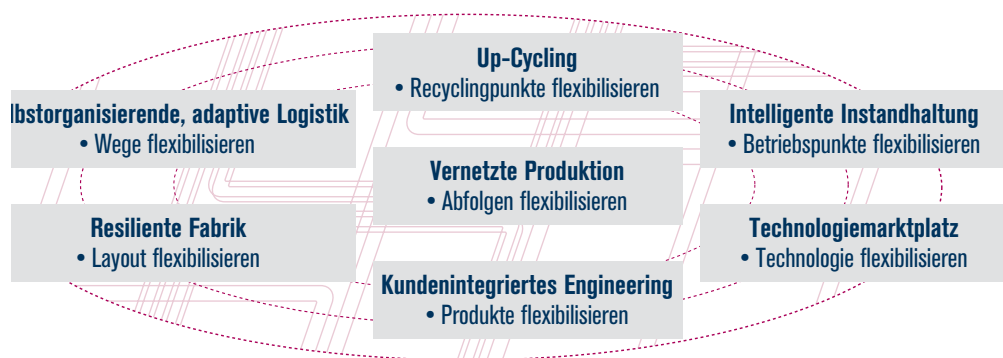


Abb. 15: Vorläufige Organisationsstruktur der „Plattform Industrie 4.0“

# A. ANHANG

## A1: Die Use Cases Industrie 4.0



Quelle: Trumpf

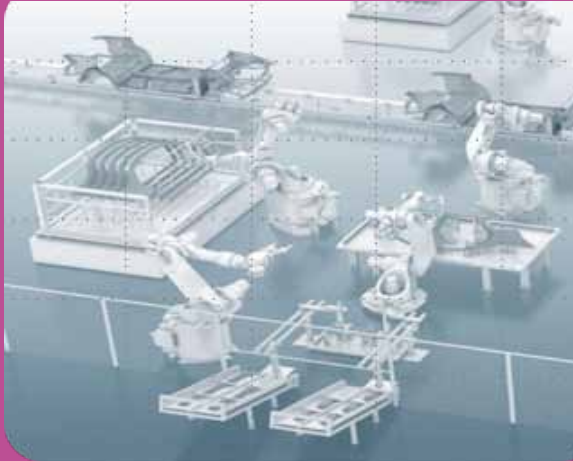
Abb. 16: Ziele der Smart Factory nach Themenschwerpunkten und Use Cases

|                                          |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ... berücksichtigte Aspekte              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| ... Schwerpunkt-Aspekt                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Resiliente Fabrik                        |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Technologiedaten-Marktplatz              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Intelligentes Instandhaltungs-Management |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Vernetzte Produktion                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Selbstorganisierende, adaptive Logistik  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Kundenintegriertes Engineering           |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Up-Cycling                               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |
| Smart Factory Architecture               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |                                                                                       |

Abb. 17: Die acht Uses Cases der Smart Factory



## USE CASE 1: RESILIENTE FABRIK (QUELLE: FESTO)



Resilienz bedeutet Widerstandsfähigkeit, aber auch Agilität, Adaptivität, Redundanz, Dezentralität und Lernfähigkeit. Ein breites Produktspektrum mit kundenspezifischen Merkmalen muss bei hochgradig saisonaler Nachfrage produziert werden.

Durch eine situative Anpassung der Produktionslinien wird eine *Just-in-time*-Produktion bei optimaler Kapazitätsauslastung erreicht.

### Systematisierung der Produktionsprozesse nach Standard- und Spezialmodulen

Im breiten Produktspektrum mit kundenspezifischen Merkmalen lassen sich gemeinsame Produktkomponenten mit ihren zugehörigen Bearbeitungsschritten identifizieren. Dadurch können die Produkte auf einer gemeinsamen Produktionslinie gefertigt werden. Erst im späteren Produktionsprozess werden produktspezifische Produktionsstationen benötigt.

Aufgrund des volatilen Produktmixes ist ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich der eingesetzten Bearbeitungsstationen erforderlich. Ein modulares Konzept ermöglicht die Wandlungsfähigkeit der Produktionslinie bezüglich Reihenfolge, Funktion und Anzahl der eingesetzten Produktionsmodule. Modularität und die Fähigkeit zur Selbstkonfiguration beziehen sich dabei auch auf die über alle Ebenen integrierte Software.

### Automatisierte Rekonfiguration in Abhängigkeit der Aufträge

Auf Basis einer *feature*-orientierten Beschreibung der Produkte und der Fähigkeiten der Produktionsmodule wird durch eine Online-Simulation der aktuellen Auftragsituation das optimale Anlagenlayout ermittelt. Wird ein Optimierungspotenzial erkannt, so erfolgt eine Rekonfiguration. Die *Plug & produce*-Fähigkeit ermöglicht es den Modulen, sich am Leitrechner anzumelden und ihre Fähigkeiten zu übermitteln. Daraufhin werden sie in den Produktionsprozess eingeplant und neue Kapazitäten, Liefertermine und Leistungsangaben für die Produktion werden ausgegeben.

### Überlassung von Modulen / Kapazitäten an Partnerfirmen

Bei Unterauslastung werden freie Kapazitäten oder Produktionsmodule Partnerfirmen zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus lassen sich Produktionslinien auch unternehmensübergreifend zusammenstellen.

### Disruptive Aspekte



- Einfacher und rascher Umbau der Produktionslinie entsprechend der Auftragsituation
- Integration von Individualprozessschritten in Fertigungslinien
- Plug & produce-Fähigkeit der Fertigungsmodule

### Enabler / Handlungsbedarf



- Schnittstellenstandards für universell kombinierbare Fertigungsmodule
- Fähigkeits- und funktionsorientierte Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe
- Modulare und selbstkonfigurierende *Software*
- Kontinuierliche Simulation von Auftragslage und Produktionslayout über alle Ebenen

## USE CASE 2: TECHNOLOGIEDATEN MARKTPLATZ (QUELLE: TRUMPF)



Auf einer Lasermaschine sollen Kundenteile aus beigestellten Blechtafeln produziert werden. Die auf der Maschine verfügbaren Technologiedaten liefern keine brauchbare Qualität. Für eine klassische Schneiddatenoptimierung steht weder Material noch Zeit zur Verfügung.

Durch Zugriff auf internes und externes Technologie-Know-how wird der Auftrag in der erwarteten Qualität termingerecht abgewickelt.

### Technologiedatenaustausch zwischen Maschinen

Die auf der Lasermaschine verfügbaren Technologiedaten ermöglichen keine ausreichende Bearbeitungsqualität. Eine automatische Suche auf vernetzten Produktionssystemen ergibt, dass auf einer Stanz-Laser-Kombi-Maschine in einem Zweigwerk geeignete materialspezifische Technologiedaten vorhanden sind. Diese Daten werden automatisch auf das Leistungsprofil der Lasermaschine angepasst und liefern auf Anhieb ein brauchbares Bearbeitungsergebnis.

### Technologiedatenabgleich zwischen Maschine und Herstellerdatenbank

Aufgrund der guten Ergebnisse stellt der Kunde einen größeren Auftrag im selben Kundenmaterial in Aussicht. Da die automatisch adaptierten Technologieparameter noch Potenzial zur Produktivitätsoptimierung lassen, wird der Vorlauf bis zum Auftragsbeginn genutzt, um über eine ad hoc angebundene Materialsensorik die Materialeigenschaften des Kundenmaterials exakt zu ermitteln. Ein automatischer Abgleich mit dem Technologieportal des Maschinenherstellers liefert einen auf die Zielmaschine optimierten Technologiedatensatz, der es ermöglicht, den Großauftrag durch optimale Ausnutzung der Maschine termingerecht abzuliefern.

### Handel von Technologiedaten auf öffentlichen Internetmarktplätzen

Bei weiteren Folgeaufträgen kommt neues Kundenmaterial zum Einsatz, für das weder auf den vernetzten Maschinen noch beim Hersteller geeignete Technologiedaten existieren. Aufgrund einer automatisierten Anfrage auf dem Technologie-marktplatz der Laserschneider ermittelt ein Dienstleister anhand der Materialeigenschaften einen geeigneten Technologiedatensatz und bietet diesen zur direkten Nutzung zum Verkauf an.

### Disruptive Aspekte



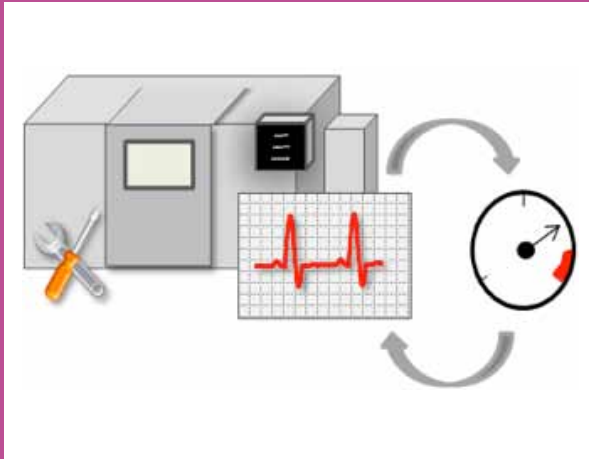
- Maschinenübergreifender Technologiedatenabgleich mit automatischer Adaption
- Automatisierte Technologiedatenbereitstellung auf Basis von Ad-hoc-Sensorik
- Unternehmensübergreifender Technologiedatenaustausch über öffentlichen Marktplatz

### Enabler / Handlungsbedarf



- Maschinen- / Technologiemodelle zur automatischen Adaption der Technologiedaten
- Technologiespezifische Ad-hoc-Materialsensorik beziehungsweise Material bringt Eigenschaften mit
- Standardisierte Beschreibung und Schutz von Technologiedaten

**USE CASE 3:**  
**INTELLIGENTES INSTANDHALTUNGSMANAGEMENT (QUELLE: WBK)**



Die indirekten Kosten ungeplanter Maschinenstillstände können die direkten Kosten einer Wartung oder Reparatur beträchtlich übersteigen.

Mit antizipierenden Instandhaltungskonzepten lassen sich für die Betreiber die Folgekosten ungeplanter Stillstände deutlich reduzieren

**Kein ungeplanter Stillstand durch rechtzeitige Wartung bei Nennbetrieb**

Mittels intelligenter, kostengünstig nachrüstbarer Sensorik können Daten über Lasten und Maschinenzustände in Echtzeit erfasst werden. Anhand dieser Daten können mit entsprechenden Algorithmen in Kombination mit lastabhängigen Zuverlässigkeitsanalysen detaillierte Prognosen über das Ausfallverhalten kritischer Komponenten erstellt werden. Diese Interaktionen ermöglichen den Mitarbeitern eine optimierte Instandhaltungseinsatzplanung und Ersatzteilerstellung. Komponentenabhängig kann die ideale Servicestrategie abgeleitet und konfiguriert werden. Ressourcen werden effizient eingesetzt und geschont, ungeplante Stillstände reduziert und das betroffene Instandhaltungs- und Betriebspersonal unterstützt.

**Variation des Nennbetriebs zur Gewinnung von Handlungsspielraum**

Des Weiteren ermöglichen die Echtzeitdaten eine adaptive Anpassung der Prozessparameter an die aktuelle Auslastung der Linie. So können bei lokal und temporär auftretenden Engpässen die Geschwindigkeiten vor- und nachgelagerter Produktionsressourcen reduziert werden, ohne dabei die Ausbringung zu senken, was zu einer geringen Lasteinbringung auf die Komponenten führt. Bei lieferzeitkritischen Aufträgen werden hingegen selbstständig maximale Geschwindigkeiten realisiert. Der Mensch gibt dabei das Zielsystem vor und interagiert direkt mit den Prognose-Tools. Somit ist eine permanente Optimierung der Ressourcen- und vor allem Energieeffizienz in Abhängigkeit von Auslastung und Lieferzeiten möglich.

**Alternative Produktionsprozesse nutzen**

Im Zusammenspiel mit der adaptiven Produktionssteuerung werden im Falle ungeplanter Stillstände durch *Cyber-Physical Systems* Ausweichstrategien auf alternative Produktionsprozesse ad hoc und ohne manuelles Eingreifen Dritter möglich, sodass die negativen Konsequenzen ungeplanter Stillstände abgemildert werden.

**Disruptive Aspekte**



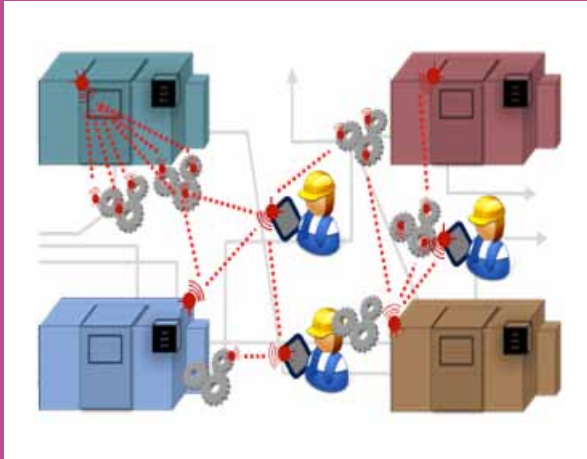
- Identifikation von Zustand und Verschleißvorrat
- Prognostizierbarkeit des Verschleißvorrats auf Basis der Betriebsparameter
- Automatische Identifikation optimaler Betriebs- und Wartungspunkte

**Enabler / Handlungsbedarf**



- Ad hoc vernetzbare Sensoren zur Systemzustandsidentifikation
- Umfassendes Systemabbild in Echtzeit
- Verschleißmodelle in Abhängigkeit der realen Betriebsparameter

#### USE CASE 4: VERNETZTE PRODUKTION (QUELLE: IWB)



Megatrends wie die Individualisierung von Produkten führen zusammen mit einem turbulenten Marktgeschehen zu komplexen Produktionsabläufen.

Angesichts dieser Randbedingungen müssen organisatorische Verluste durch adäquate Planung und Steuerung der Produktion vermieden werden, um die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen in Deutschland weiter auszubauen.

#### Das Produktionssystem reagiert selbständig auf ungeplante Ereignisse

Intelligente und vernetzte Produktionsressourcen und Produkte ermöglichen ein jederzeit bis ins Detail aktuelles Abbild der Fabrik. So können beispielsweise zusätzlich zu aktuellem Zustand, Ort und Fähigkeiten eines Produktionsmittels auch relevante Zustandsinformationen von Partnerfirmen im Liefernetzwerk berücksichtigt werden. Auf Basis des Echtzeitabbaus werden Produktionsabläufe geplant und gesteuert. Ungeplante Ereignisse wie Maschinenausfall, Produktspezifikationsänderung bei bereits laufender Produktion oder ein Expressauftrag werden ad hoc identifiziert. Das intelligente Planungs- und Steuerungssystem nimmt selbstständig durch einen Anforderungs-Fähigkeits-Abgleich eine Umplanung vor.

#### Das Produkt steuert sich selbst durch die Produktion

Intelligente Produkte sind durch ihre Ad-hoc-Vernetzungsfähigkeit sowie durch Mitführung einer digitalen Produktbeschreibung dazu befähigt, sich selbst durch die Produktion zu steuern. Um ihren Zielzustand zu erreichen, initiieren die Produkte dezentrale ad hoc aufgebaute Regelschleifen. In diese Schleifen sind sowohl Fertigungsressourcen als auch das Leitsystem eingebunden. Damit können viele Entscheidungen direkt auf Werkstattebene getroffen werden.

#### Der Mensch nutzt die Freiheitsgrade des Produktionssystems aufgrund Erfahrung / Kreativität

Im Zusammenwirken intelligenter Automatisierung mit der Erfahrung und der Kreativität von Menschen werden organisatorische Verluste in der Produktion sukzessive verringert. Zu diesem Zweck werden für die Produktionsmitarbeiter über ein mobiles Assistenzsystem kontextsensitiv Informationen über die aktuellen Leistungsdaten der Produktion als Entscheidungsgrundlage für eine kontinuierliche Optimierung bereitgestellt.

#### Disruptive Aspekte



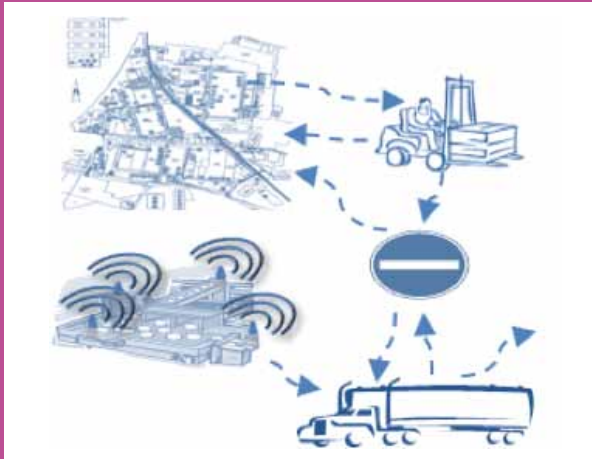
- Echtzeitfähige Produktionsplanung und -steuerung
- Selbststeuerungsfähigkeit für intelligente Produkte
- Kontextsensitive und multimodale Mitarbeiterinteraktion

#### Enabler / Handlungsbedarf



- Ad-hoc-Vernetzbarkeit von Produkten, Ressourcen und Assistenzsystemen
- Echtzeitsystemabbild der Produktion
- Kommunikationsstandards zur Beschreibung von Produkten und Ressourcen

**USE CASE 5:**  
**SELBSTORGANISIERENDE ADAPTIVE LOGISTIK (QUELLE: DAIMLER)**



In der vernetzten Produktion sind zuverlässige Produktionslogistikprozesse ausschlaggebend für den reibungsarmen, fehlerfreien Wertschöpfungsprozess. In Zukunft werden die Anforderungen an Stückzahl- und Variantenflexibilität weiter steigen, Engpässe und Belieferungsfehler werden wahrscheinlicher.

CP-Systeme tragen dazu bei, Material- und Teilebewegungen transparent zu machen. Sie bilden damit die technische Grundlage für eine dynamische Intralogistiksteuerung in einer flexiblen Fabrik.

**Traceability durch CPS**

In komplexen Produktionssystemen durchlaufen Zuliefer- und Unfertigerzeugnisse mehrere Transport-, Fertigungs- und Montageschritte. Insbesondere zur Steuerung von Montageprozessen ist die Kenntnis des Aufenthaltsorts von Material, Baugruppen, Aggregaten oder endmontierten Produkten entscheidend. Mit CP-Systemen werden die momentanen Aufenthaltsorte der Objekte erfasst und Prognosen des weiteren Verlaufs durch den Transport abgeleitet. Durch die *Traceability* der Bauteile wird der Montageprozess inklusive der vor- und nachgelagerten Produktionslogistikprozesse vollständig transparent.

**Papierlose und staplerfreie Intralogistik**

Durch CPS entfallen administrative Bestandsführungs-, Buchungs- und Inventurprozesse. Die papierlose Produktion kann somit für den Logistikbereich in bestehenden Produktionssystemen nachgerüstet werden. Die Einführung von CPS erweitert CPS statische Kanban-Prozesse um dynamische Methoden zur kurzfristigen Anpassung von Beständen, Transportmengen, Zyklen und Transportzielen durch die Produktionsablaufsteuerung, zum Beispiel beim Auftreten eines Fehlerfalls, Versorgungsengpässes oder alternativen Belieferungsszenarios. Durch Verknüpfung von fahrerlosen Transportfahrzeugen mit dezentralen CP-Systemen und mit zentraler Leitstandsteuerung entstehen autonom agierende Transportsysteme, die mehr als eine dedizierte Transportaufgabe erledigen können in Richtung einer staplerfreien Intralogistik im Werk.

**Unterstützung des Menschen in der Chaotischen Logistik**

Die Mitarbeiter werden von einem durchgängigen, skalierbaren und mobilen Assistenzsystem auf allen Prozessebenen der Logistik, vom Transport über Umschlag und Bestandsmanagement bis hin zur Kommissionierung, unterstützt.

**Disruptive Aspekte**



- Dynamische Reaktion auf (un-) vorhersehbare Änderungen im Produktionsablauf
- Fehlertoleranz in der Produktionslogistik
- Selbstregulierung in begrenztem Umfang

**Enabler / Handlungsbedarf**



- Ad hoc vernetzbare Sensoren zur temporären und zur permanenten Anwendung
- Traceability und Echtzeitsystemabbild
- Schnittstelle zu vorhandenen CPS und Elementen der Logistikkette

### USE CASE 6:

### KUNDENINTEGRIERTES ENGINEERING (QUELLE: IPA)



Immer weitreichendere Kundenanforderungen an Termintreue und späte Änderungen bewirken die Notwendigkeit eines grundsätzlichen Umdenkens im Zusammenspiel der klassischen Produktionsaufgaben mit dem Kunden / der *Supply Chain*. Durch eine Integration des Kunden in die entwickelnden, planenden und wertschöpfenden Tätigkeiten des beauftragten Unternehmens entstehen eine neue Transparenz und eine reaktive Produktion in idealer Synchronisation aller Beteiligten.

#### Einbeziehung des Kunden in die Wertschöpfungsprozesse

Die schnelle Marktbewegung und deren Auswirkungen auf die Produktionsplanung machen die Reaktionsfähigkeit des beauftragten Unternehmens zu einem Schlüssel des Erfolgs. Durch direkte Einbeziehung des Kunden ergeben sich neue Optimierungspotenziale, zum Beispiel in der Produktionsplanung des beauftragten Wertschöpfungsnetzes.

#### Produktionsorientiertes Design

Unterstützend wirken hier Systeme zur Auswirkungsprognose bei Änderungen im beauftragten Produkt inklusive eines Systems zur Ermittlung alternativer Wertschöpfungsszenarien („Szenariensystem“). Diese bewirken gleichzeitig für den Kunden eine neue Transparenz sowie für den Hersteller die Auslagerung von Tätigkeiten mit hohem Abstimmungsaufwand. Das „Szenariensystem“ erstreckt sich dabei über weite Bereiche, bis hin zu der Auswahlmöglichkeit der Schlüsseltechnologien eines Prozesses (beispielsweise Schneiden / Schweißen).

#### Beispiel Logistikdienstleister als Hersteller

Ein Logistikdienstleister erhält den Auftrag für ein auszulieferndes Produkt in Form der Produktpläne. Diese finalisiert er mit einigen kundenindividuellen Produktanpassungen (zum Beispiel Zuschnitt, Farbgebung, generative Fertigungsverfahren) im Logistikzentrum kurz vor Auslieferung und liefert dann direkt aus.

#### Beispiel Automobilproduktion

Über Konfiguratoren kann der Kunde mittels Live-Daten der Lieferkette entlang des kritischen Pfads zuverlässige Verfügbarkeiten, Lieferzeiten sowie optionsspezifische Meilensteine für Änderungen ermitteln. Das Szenariensystem erlaubt dabei über leichte Ausstattungsvariationen eine Beeinflussung des Auslieferungstermins.

#### Disruptive Aspekte



- Zulassen von Kundenänderungen zur spätestmöglichen Zeit im Produktionsprozess
- Präzise Terminaussagen auch nach optimierender Funktionsänderung im Produkt
- Moderne Geschäftsmodelle durch Einbindung des Kunden in die Produktentwicklung

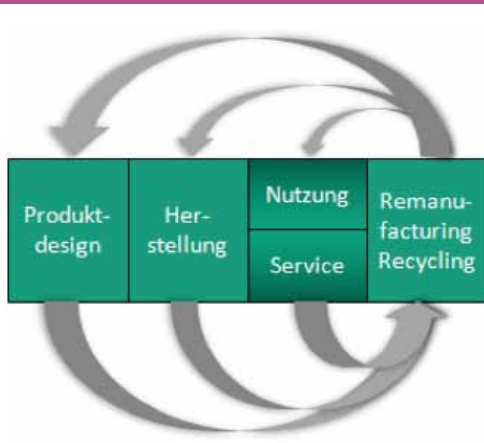
#### Enabler / Handlungsbedarf



- Nutzung von Echtzeitabbild und Systemmodell im Planungssystem
- Klare Beschreibungen aller Objekte entlang der *Supply Chain*
- Neue Handhabungsmethoden für den Umfang der Datenmengen



**USE CASE 7:**  
**NACHHALTIGKEIT DURCH UP-CYCLING (QUELLE IPA)**



Mit steigenden Rohstoffpreisen steigt auch deren Einfluss auf den Gesamtpreis des Produkts. Insbesondere bei *Hightech*-Produkten sind oftmals die Rohstoffe auch ein begrenzender Faktor (beispielsweise seltene Erden, Platin). Indem das Unternehmen seine Produkte nur noch Nutzung verkauft, behält es die Eigentumsrechte an den verwendeten Rohstoffen. Dies wird sinnvoll erst durch direkt im Produkt abgespeicherte Herstellungs-, Montage- und *Recycling*-informationen ermöglicht. Durch die umfassende Informationsbereitstellung wird anstelle eines *Down*- oder *Re-Cyclings* oftmals ein *Up-Cycling* ermöglicht.

**Rohstoff-, Komponenten- und Modulinformationen**

Bei Hightech-Produkten machen wenige sehr teure Rohmaterialien (Platin in Batterien, seltene Erden in Elektronik) einen erheblichen Anteil am Wert des Gesamtprodukts aus. Neue Geschäftsmodelle ermöglichen den Verbleib des Eigentumsrechts an den Rohstoffen beim Hersteller auch nach dem Produktverkauf. Sie nutzen dafür eine standardisierte Erfassung von Informationen bezüglich Herstellung, Nutzung und Rückführungsmöglichkeiten des Produkts zum Produzenten.

**Up-Cycling statt Re-Cycling**

Basierend auf den Herstellungs-, Montage- und Nutzungsdaten des Produkts kann jederzeit der Zustand der Produktbestandteile bestimmt werden. Baugruppen lassen sich aufgrund dieser Daten schnell analysieren und mitunter durch geringe Änderungen an den aktuellen Stand anpassen. Im Gegensatz zum klassischen *Re-Cycling* wird dadurch ein *Up-Cycling*, das heißt eine Wiedernutzung von ganzen Baugruppen (nicht Einzelbauteilen oder Rohstoffen) ermöglicht. Dadurch lassen sich erhebliche Effizienzsteigerungen, zum Beispiel beim Energieeinsatz, erreichen.

**Effizientes Re-Cycling**

Die Informationen über das Produkt ermöglichen eine Bewertung, ob eine sortenreine Rückgewinnung der Rohstoffe wirtschaftlich möglich ist. Dadurch kann eine Entscheidung über den sinnvollsten Weg der Weiterverwendung der Rohstoffe getroffen werden.

**Disruptive Aspekte**



- Die Eigentumsrechte an den verwendeten Rohstoffen verbleiben beim Hersteller
- Planung des *Up-Cyclings* der Rohstoffe schon bei der Entwicklung
- Dynamische Gestaltung des Lebenszyklus (Bewirtschaftung der Rohstoffe im Feld)

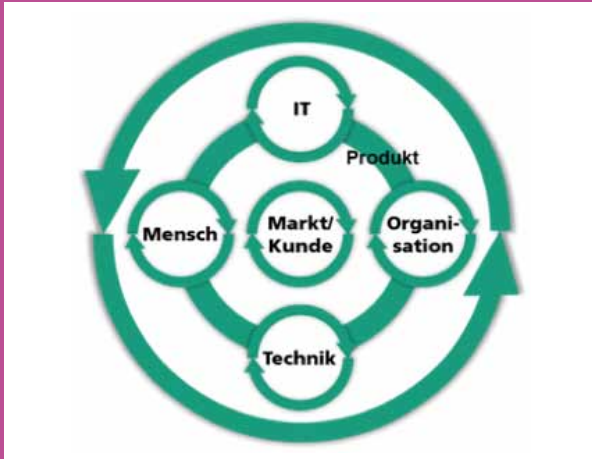
**Enabler / Handlungsbedarf**



- Speicherung der relevanten Daten am Produkt über den gesamten Lebenszyklus
- Hilfesystem für Schadensauswertungen auf Basis von Nutzungs- und Zustandsdaten
- Erarbeitung und Bewertung neuer Geschäftsmodelle



## USE CASE 8: SMART FACTORY ARCHITECTURE (QUELLE: IPA)



Haben viele Unternehmen den Gedanken des Lebenszyklus eines Produkts und mitunter auch des Fabriklebenszyklus bereits aufgegriffen, so wird auffällig, wie aufwendig die Synchronisation dieser Lebenszyklen ist. Analog zu diesen Lebenszyklen ergibt sich für die *Smart Factory* ein eigener Lebenszyklus, welcher je nach Produkt entsprechend gestaltet werden muss.

Die *Smart Factory* bietet dabei die Möglichkeit, einen umfassenden Lebenszyklus, durch die Ergänzung des MTO-Ansatzes mit IT, in einer übergeordneten Meta-Ebene zu etablieren.

### Smart Factory Lebenszyklusgestaltung

Die *Smart Factory* ist ein hochkomplexes System mit vielen Einzelteilnehmern die eigene Intelligenz besitzen. Der Lebenszyklus der *Smart Factory* ist daher weder mit dem Lebenszyklus des Produkts noch der Fabrik direkt vergleichbar, sondern ihr Lebenszyklus muss jeweils produktspezifisch gestaltet werden. Diese Gestaltung ist der erste Schritt auf dem Weg zur Nutzbarkeit der vielfältigen enthaltenen Informationen und ermöglicht durch die Summe der vielen integrierten Einzelintelligenzen ein Wissensmanagement bis auf den *Shopfloor*. Dieses Wissen wird dann jedoch aufgrund neuer Fragestellungen ausgewählt und klassifiziert: Man bewegt sich weg vom bisherigen „Warum hat es funktioniert?“ zu „Wie sieht es funktionierend aus?“. Dies ermöglicht ein sehr pragmatisches Wissensmanagement und die ideale Nutzung aller Ideallösungen. Insbesondere bei der Datenerfassung in großem Umfang im Rahmen der *Smart Factory* entstehen zwei direkte Herausforderungen, welche bis dato die Migration häufig unmöglich machen: Zum Ersten ist die entstehende Datenmenge sehr groß. Diese Datenmengen müssen nicht nur erfasst, sondern auch beherrscht werden, was durch eine mitunter notwendige Echtzeit- oder *Live*-Fähigkeit noch verstärkt wird.

### Anwendungsbeispiel

Nach Auftragseingang wird mithilfe einer Mustererkennung in den erledigten Aufträgen nach ähnlichen Aufträgen (in Bestand, Durchlaufzeit etc.) gesucht. Nach einer für den betrachteten Fall spezifischen Definition von Kriterien (Durchlaufzeit etc.) werden in einer dynamischen Analyse die erfolgreichsten Auftragsdurchläufe durch die Fabrik ausgewählt und es erfolgt direkt ein Vorschlag für die Auftragseinplanung. Dies erfordert im Hintergrund Methoden, welche sich nicht mehr den komplexen Ursachen, sondern bevorzugt den Relationen der Ein- und Ausgangsdaten widmen.

### Disruptive Aspekte



- Hohe Komplexität des Zusammenspiels im MTO unter Antrieb des Markts / Kunden
- Synchronisation der Lebenszyklen mitunter sehr aufwendig
- Schwieriger Informations- und Wissensfluss durch Trennung der Lebenszyklen

### Enabler / Handlungsbedarf



- Organisatorische, systemische und methodische Gestaltung der Lebenszyklen
- Intelligenz im System für die Ausschöpfung der Informationen / des Wissens in den großen Datenmengen, um einen gezielten Umgang mit Unsicherheiten zu ermöglichen
- Dezentralität, Interdisziplinarität unter Wahrung der Bedien- und Handhabbarkeit

## A 2 Forschungsbedarf entsprechend der *Use Cases*

Der Forschungsbedarf ergibt sich unter anderem aus den für die Anwendungsfälle der AG 1 benötigten *Enablern* sowie aus den disruptiven Aspekten der Anwendungsfälle.

### A 3 Zusammenfassung der Kernaussagen zur Motivation des Forschungsbedarfs

1. Die Anwendung von Methoden und Werkzeugen von *Cyber Physical Systems (CPS)* in der Produktion ist ein Hebel zur Unterstützung **interdisziplinärer Arbeit**.
2. **Industrie 4.0 ertüchtigt *Cyber-Physical Systems* zur Anwendung in der produzierenden Industrie** durch die modelltechnisch, architekturell, kommunikationstechnisch und interaktionsmäßig durchgängige Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse. Damit **migrieren sie zu *Cyber-Physical Production Systems (CPPS)*** und finden in smarten Produktionssystemen Verwendung.
3. **Smarte Produktionssysteme erfordern modularisierte, modellierte und bei Bedarf intelligente Ressourcen.**
4. **CPS eröffnen neue Handlungsoptionen; Referenzarchitekturen sowie Produktionsdienste** können für die unterschiedlichen Szenarien und Anwendungsfälle zielführend sein.
5. **CPPS eröffnen neue Arbeitsmöglichkeiten für die Beschäftigten im produzierenden Gewerbe.**
6. Der **Mensch steht im Mittelpunkt beim Entwurf CPS-basierter Assistenzsysteme** für die agile multiadaptive *Smart Factory*.
7. Die Verwirklichung der **agilen multiadaptiven *Smart Factory* erfordert menschenzentrierte soziotechnische Fabrik- und Arbeitssysteme.**
8. Arbeiten in einem ständig veränderten Arbeitsumfeld mit immer komplexeren Werkzeugen resultiert in extrem **hohen Anforderungen an Fähigkeiten und Wissen** der beteiligten Produktionsressourcen und Mitarbeiter.
9. **Smart Factories erfordern Konzepte für den Schutz des digitalen Prozess-Know-hows.**
10. **Mittelfristig sind eindeutige und sichere Produktidentitäten** oder die Nachführung der Produktdaten im Produktionssystem erforderlich.
11. **Langfristig werden Wissensmodelle, die auch interdisziplinäre Zusammenhänge und die Automatisierungstechnik berücksichtigen, für den maschinellen Informationsaustausch benötigt.**
12. In CPS-Systemen müssen ***Industrial-IT-Security-Methoden* Anwendung** finden und system- und unternehmensübergreifende Security-Lösungen ermöglichen
13. **CPPS-Fähigkeiten sind für Industrieausrüster und für den Betrieb von globalen Produktionen essentiell.** Langfristig befähigen CPPS deutsche Unternehmen, in nationalen und internationalen Märkten zu agieren.



**Forschungsunion**

Wirtschaft und Wissenschaft