

4.4 Innovative Konzepte einer sich selbstorganisierenden Fahrzeugmontage am Beispiel des Forschungsprojekts SMART FACE

Lennart Sören Bochmann, Lars Gehrke,
Nils Gehrke, Christoph Mertens, Oliver Seiss

Zusammenfassung (Summary)

- Ziel des Beitrags ist die Darlegung der konzeptionellen Bestandteile einer sich selbstorganisierenden Fahrzeugmontage im Forschungsprojekt SMART FACE. Beschrieben werden Betriebs-, Planungs- und Steuerungskonzept einer Montage basierend auf dem Internet der Dinge-Prinzip.
- Inhaltlich werden zunächst die Motivation und der Hintergrund des interdisziplinären Forschungsprojekts beschrieben, ehe anschließend die konzeptionellen Arbeiten thematisiert werden. Im Folgenden wird auf die praktischen Ergebnisse des Projekts und den weiteren Verlauf des Projekts bis Projektende eingegangen.

Inhalt

1	Einführung.....	175
2	Hintergrund und Motivation.....	176
3	Zielsetzung des Forschungsprojekts	177
4	Vorgehensweise im Forschungsprojekt.....	179
5	Konzeptbeschreibung.....	180
5.1	Anforderungsanalyse.....	180
5.2	Betriebskonzept	182
5.3	Produktionsprogrammplanung.....	183
5.4	Produktionssteuerung	184
6	Ansätze für die praktische Umsetzung	186
6.1	Minidemonstrator.....	186
6.2	Maxidemonstratoren	188
7	Ausblick.....	188
8	Danksagung	189
9	Literaturverzeichnis	189

1 Einführung

Das Forschungsprojekt SMART FACE ist ein durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördertes öffentliches Forschungsprojekt und steht für Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung.

Um die Vision der Produktion der Zukunft im Kontext der Industrie 4.0 zu konkretisieren, soll in diesem interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojekt ein dezentral gesteuertes Produktionssystem konzipiert und pilotiert werden. Dieses basiert auf dem Internet der Dinge-Prinzip, in welchem physische Elemente durch integrierte Sensoren (bspw. RFID-Chips) eine Repräsentanz im Internet erhalten. Dort kommunizieren sie miteinander, sodass zum Beispiel Montage- und zu bearbeitende Teile ihren eigenen, optimalen Weg durch den Produktionsfluss finden.

Das Forschungsprojekt SMART FACE wird durch ein achtköpfiges Konsortium bearbeitet, welches sich interdisziplinär aus mehreren Forschungs-, Technologie- und Anwendungspartnern zusammensetzt. Forschungspartner sind die Technische Universität Dortmund und das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML). Als Technologiepartner beteiligen sich die SICK AG, Logata Digital Solutions GmbH, F/L/S Fuzzy Logik Systeme GmbH und Lanfer Automation GmbH & Co.KG. Als Anwendungspartner ermöglichen die Continental AG und die Volkswagen AG einen wertschöpfungskettenübergreifenden Ansatz (s. Abb. 1).



Abb. 1 Forschungs-, Technologie- und Anwendungspartner des Forschungsprojekts SMART FACE

In folgendem Beitrag werden die konzeptionellen Ansätze für das neuartige Produktionssystem veranschaulicht, die den Kern des sich noch in Bearbeitung befindenden Forschungsprojekts bilden. Zunächst werden Hintergrund und Motivation erläutert. Der Definition von Zielsetzung und Vorgehensweise folgt die Präsentation der auf den Feldern des Betriebskonzepts, der Produktionsprogrammplanung und Produktionssteuerung entwickelten Teilkonzepte. Eine erweiterte Sichtweise entsteht durch die Spezifikation der Verknüpfung der Teilkonzepte zum SMART FACE-Gesamtkonzept und dessen Überfüh-

rung in die praktische Umsetzung. Zum Abschluss des Beitrags wird ein Ausblick auf die noch folgenden Projektarbeiten gegeben.

2 Hintergrund und Motivation

Kürzer werdende Produktionszyklen und die steigende Variantenvielfalt bei gleichzeitig zunehmenden Produktionsmengen sind seit Jahren dominierende Entwicklungen in der industriellen Produktion (vgl. Schneider et al. 2010, S. 122, Kropik 2009, S. 6-12 und Bauernhansl 2014, S. 13). Produzenten unterschiedlichster Branchen stellen sich der Herausforderung, große Mengen variantenreicher Produkte in jeweils kleinen Losgrößen den Kundenanforderungen entsprechend, d.h. in der gewünschten Ausführung zum vereinbarten Liefertermin, wirtschaftlich herzustellen. Der Trend zur „Losgröße 1“ hat Einzug in die deutsche Automobilindustrie gehalten. Eine modellabhängige, herstellerübergreifende Variantenvielfalt von zum Teil 10^{26} Endvarianten ist dort längst Realität (vgl. Götz 2007, S. 19). Dieser Effekt wird auch durch die weiterhin an Bedeutung gewinnende Produktion von Elektrofahrzeugen verstärkt. Diese stellt besondere Anforderungen an die Produktion in der Automobilindustrie, da die technologischen Entwicklungen in der E-Mobilität nur schwer prognostizierbar und die Märkte entsprechend volatil sind (vgl. Dijk et al. 2013, S. 135-145).

Die Produktion von Fahrzeugen in Kleinserien, unter besonderer Berücksichtigung der spezifischen Produktionsrandbedingungen bei Elektrofahrzeugen, bildet den Use Case für SMART FACE. Im Fokus des Projekts steht die Fahrzeugendmontage, da diese gegenüber der Fertigung besonders große Flexibilisierungspotentiale hinsichtlich der Arbeitsvorgangssequenzen bietet. Die Bedeutung dieses Zusammenhangs wird im konzeptionellen Teil detailliert ausgeführt.

Das aus den beschriebenen Tendenzen resultierende kontinuierlich wachsende Maß an Komplexität muss durch die Kernaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung sowie der Betriebsweise der Produktionssysteme bewältigt werden. Im gegebenen Kontext umfasst die Produktionsplanung die zentrale Aufgabe der Produktionsprogrammplanung und damit primär die Bestimmung der Mengen der zu produzierenden Fahrzeugvarianten innerhalb determinierter Zeitintervalle. Die Produktionssteuerung überführt den Input aus der Planung in den Shopfloor. Reihenfolgen werden final gebildet, Ressourcen werden belegt und der Produktionsfortschritt überwacht. Unter der Betriebsweise, beziehungsweise dem Betrieb wird die Verknüpfung von Montagestrukturtypen, wie die Fließ- oder Inselmontage und den die Montage unterstützenden Logistikprozessen gefasst.

Die heutige variantenreiche Fließproduktion wird durch hocheffiziente Montagelinien und eine umfassende IT-Infrastruktur bewältigt. Alle Fahrzeuge folgen derselben festgelegten Sequenz von Montageabschnitten im Flussprinzip auf Modell-Mix-Montagelinien, zumal die Montageoperationen je nach Modell variieren können (vgl. Copaciu 2013, S. 2, Klug 2010, S. 61-62 und Dörmer 2013, S. 2-3). Die gegebenen, vor allem auf maximale Produktivität ausgelegten Strukturen sind prädestiniert für eine deterministische Nachfrage mit hohen Stückzahlen. Durch die kontinuierlich steigenden Flexibilitätsanforderun-

gen wird ein wachsender Bedarf an leistungsstarken Montagelinien für den Modell-Mix begründet, die eine möglichst gleichmäßige und hohe Auslastung der Montagearbeiter sicherstellen. Gerade auch infolge der unsicheren Nachfrage nach Elektrofahrzeugen werden die Potentiale geboten, die durch alternative Ansätze zur starr verketteten Fließproduktion erschlossen werden können. Zu den zentralen Potentialen zählt eine erhöhte Wandlungsfähigkeit der Montage, indem auf volatile Produktionsanforderungen und ungünstige Auftragssequenzen infolge des Modell-Mix flexibel und wirtschaftlich reagiert werden kann.

Auf der Planungs- und Steuerungsebene wird innerhalb eines hierarchisch gegliederten und zentral organisierten Planungsprozesses jedes Detail der Produktion iterativ und deterministisch festgelegt. Der Planungsspielraum verkleinert sich zunehmend, während der Detaillierungsgrad wächst. Die Planung erstreckt sich von der Jahresplanung, in der die Planzahlen für den Jahresabsatz festgelegt werden, bis hin zur Tagesplanung, in der konkrete Produktionsaufträge fest auf die Ressourcen verplant werden. Die Reihenfolge der Aufträge ist zeitlich und räumlich innerhalb der Schicht genau festgelegt. Eine dezentrale Steuerung des Materialflusses ist nicht vorgesehen. Die Flexibilität der Produktion wird Top-down gelenkt (vgl. Dörmer 2013, S. 34 und S. 49-50). Daraus folgt ein eingeschränktes Potential, die Reihenfolge von Produktionsaufträgen bzw. Arbeitsvorgängen schnell und flexibel ändern zu können. Das Erfordernis, gebildete Reihenfolgen zu ändern, wird z.B. durch kundenseitige Änderungswünsche, durch Eilaufträge oder auch Störungen während der Produktion begründet.

Diese vordergründigen Potentiale motivieren die Projektarbeiten in SMART FACE. Es entstehen neue Lösungen für die Produktionsprogrammplanung, Produktionssteuerung und das Betriebskonzept für eine variantenreiche Fahrzeugproduktion bei Kleinserien. Die Vision der Smart Factory – auch intelligente Fabrik – entsteht. Diese wird in den folgenden Abschnitten veranschaulicht.

3 Zielsetzung des Forschungsprojekts

Das übergeordnete Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojekts SMART FACE besteht in der Entwicklung nachhaltiger Konzepte, welche die speziellen und zuvor verdichteten Anforderungen der Produktion von (Elektro-) Fahrzeugen in Kleinserien bestmöglich erfüllen. Diese Konzepte sollen eine flexible, schlanke Planung der Produktion mit wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen vereinen. Verkörpert werden die Konzepte durch ein dezentral gesteuertes Produktionssystem nach dem Internet der Dinge-Prinzip. In diesem finden Montageobjekte und Bauteile ihren Weg eigenständig von Station zu Station. Die Abbildung 2 veranschaulicht den Ansatz der selbstorganisierenden Fabrik, die Smart Factory.

Der Betrieb der Smart Factory fordert wandlungsfähige Produktions- und Materialflussstrukturen. Zentrales Arbeitsziel ist daher die Entwicklung und Evaluation konzeptioneller Ansätze, die Alternativen zum durchgängigen Flussprinzip bieten. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, werden daher auch Ansätze erarbeitet, in denen Montagestationen und Montagecluster gemäß dem Verrichtungsprinzip flexibel miteinander verbunden sind.

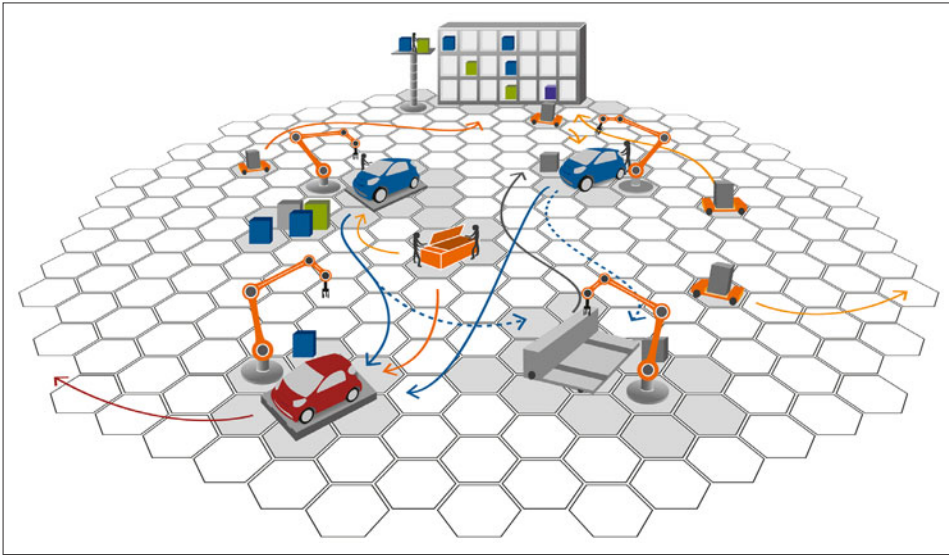


Abb. 2 Vision einer Smart Factory im Projekt SMART FACE (Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML 2015a).

Für diese besonders geeigneten Montagestrukturtypen werden kompatible Strategien der betriebsinternen wie auch betriebsexternen Materialbereitstellung entwickelt. Insbesondere im zuletzt genannten Punkt liegt ein wichtiger Erfolgsfaktor von SMART FACE begründet weshalb die Lieferanten direkt in die Konzeptentwicklung integriert werden. Die Kompatibilität mit in der Praxis etablierten Beschaffungsformen, wie etwa Just-in-Time oder Just-in-Sequence (vgl. Klug 2010, S. 299-308), soll im Projekt analysiert werden.

Die Konzepte für die Programmplanung und Steuerung der Smart Factory, die mit dem Betriebskonzept harmonisieren müssen, sollen die zentrale Planung verschlanken und sie bis zu einem bestimmten Grad in eine sich selbstorganisierende Steuerung überführen. Es ist ein zentrales Teilziel des Projekts, den wirtschaftlich möglichen und sinnvollen Grad der Entkopplung zwischen zentraler Planung und dezentraler Steuerung zu identifizieren. Dazu soll initial mit der tiefsten Hierarchieebene des Planungsprozesses, der Tagesplanung auf Shopfloorebene, begonnen werden. Ziel ist die Flexibilisierung der festen Taktung im Rahmen dieser Planungsebene, indem die Produktionsaufträge an ein sich selbstorganisierendes Netzwerk von cyber-physischen Systemen (CPS) weitergegeben und abgearbeitet werden. Der konzeptionelle Ansatz ist der innerhalb des Projekts eingeführte und im Folgenden spezifizierte Volumentakt (vgl. Bochmann et al. 2015, S. 271), der das Potential bietet, Aufträge in flexibler Reihenfolge zu verarbeiten. Der Zusammenhang von Takt und Volumen soll analysiert und formal beschrieben werden.

So wird durch SMART FACE ein entscheidender Beitrag zu einer der wesentlichen Visionen der Industrie 4.0 geleistet – die “Individualisierung (Losgröße 1) zu den ökonomischen Konditionen eines Massenherstellers“ (vgl. Kagermann 2013, S. 2).

4 Vorgehensweise im Forschungsprojekt

Das Konsortium nähert sich den veranschaulichten Projektzielen, indem die Problemstellung Top-down in Teilaufgaben gegliedert und durch interdisziplinäre und cross-funktionale Projektteams bearbeitet wird. Aus einer aggregierten Perspektive ist das Vorgehen innerhalb des Projekts auf die folgenden, weitgehend parallelisierte Phasen zurückzuführen:

- Phase 1: Anforderungsanalyse
- Phase 2: Konzeptentwicklung
- Phase 3: Softwareentwicklung
- Phase 4: Hardwareentwicklung
- Phase 5: Validierung und Evaluation

Für die Spezifikation der durch SMART FACE zu erschließenden Potentiale und zur Identifikation konkreter Ansatzpunkte der Konzept-, Software- und Hardwareentwicklung wird eine differenzierte Anforderungsanalyse geleistet (**Phase 1**). Initial wird die Vision für die Smart Factory spezifiziert, indem relevante Zielgrößen identifiziert und priorisiert werden. Zusätzlich werden vor allem die im Ist-Zustand gegebenen Montage- und Zulieferprozesse bei der Volkswagen AG und Continental AG analysiert und hinsichtlich der Kompatibilität mit der Vision der Smart Factory evaluiert. Es resultiert ein differenziertes Anforderungsprofil an die konzeptionellen und technischen Arbeiten (s. Abschn. 5.1).

Auf Basis der aus Phase 1 abgeleiteten Anforderungen, wird ein integriertes Konzept für den Betrieb und zur Produktionsprogrammplanung und -steuerung der Smart Factory entwickelt (**Phase 2**). Dieses Konzept stellt den Kern im Projekt SMART FACE und den Fokus des vorliegenden Beitrags dar. Es wird innerhalb der Abschnitte 5.2 bis 5.4 veranschaulicht.

In **Phase 3** wird das integrierte Konzept softwaretechnisch durch die Entwicklung benötigter Komponenten realisiert und in Toolboxes der Projektpartner F/L/S und Fraunhofer IML implementiert. Zu diesen Arbeiten zählen mitunter die Entwicklung von Optimierungsverfahren zur optimalen Produktionsprozessplanung und die Entwicklung unterstützender Assistenzsysteme für die Programmplanung.

Dem Anspruch an eine ganzheitliche Konzeptentwicklung folgend werden durch die **Phase 4** die physikalischen Voraussetzungen zur Realisierung der neuen Konzepte geschaffen. Im Zentrum steht die Entwicklung einer kommunikationsorientierten Middleware über die verschiedenen Ebenen des Produktionssystems sowie die Konzeptionierung smarter Sensorik und Aktorik.

Phase 5 umfasst die Querschnittsfunktionen der Validierung und Evaluation der Projektergebnisse. Die Validierung differenziert analytische und technische Teilaspekte und ist aufgeteilt in eine die Projektarbeiten permanent begleitende Regelvalidierung und finale Validierung des Gesamtsystems. Zur Evaluation der Ergebnisse dienen auch die innerhalb des Projekts zu entwickelnden Demonstratoren, die Betrachtungsgegenstand des Abschnitts 6 sind.

5 Konzeptbeschreibung

Die Schwerpunkte der konzeptionellen Arbeiten liegen auf dem Betriebskonzept, der Produktionsprogrammplanung und der Produktionssteuerung einer dezentral gesteuerten Montage nach dem Internet der Dinge-Prinzip (vgl. Bullinger 2007, S. XXIV-XXV und Meyer et al. 2006, S. 536-540). Aufgrund der wechselseitigen Abhängigkeiten dieser Aufgabenfelder, ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Gesamtkonzeptes, durch das die zu entwickelnden Teilkonzepte integriert werden, von entscheidender Bedeutung. Dazu bündelt das Gesamtkonzept die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Teilkonzepte systematisch anhand definierter Schnittstellen, Austauschbeziehungen und spezifischer Funktionalitäten.

Ausgehend von den produktionsrelevanten Rahmenbedingungen, wie z.B. Prognose- und langfristigen Planungsdaten über die zu produzierenden Jahresstückzahlen je Variante und die Variantenanzahl, wird das Betriebskonzept entwickelt, dessen Funktionalitäten beispielsweise auf die Festlegung des Montagelayouts, die Bestimmung benötigter Prozessfähigkeiten und die Ermittlung von Kapazitäten zurückzuführen sind. Entscheidender Bestandteil des Betriebskonzeptes ist die Schaffung eines digitalen Abbildes (vgl. Wegener 2014, S. 446-448) häufig auch als digitaler Schatten tituliert, das als Entscheidungsgrundlage für die Produktionsprogrammplanung wie auch die Produktionssteuerung dient. Der Idee des durchgängigen digitalen Engineerings folgend, wird das digitale Abbild anhand von Statusmeldungen kontinuierlich aktualisiert. Voraussetzung hierfür ist ein effizientes Zusammenspiel aus Datenmanagementsystem und cyber-physischen Systemen. Statusmeldungen werden aus Sensordaten der CPS generiert und durch deren repräsentative Agenten aus dem Multiagentensystem (MAS) gegenüber der Produktionssteuerung kommuniziert. So wird die Produktionssteuerung dazu befähigt, Entscheidungen auf Basis des aktuellen Systemzustandes des Betriebskonzeptes zu treffen. Liegt ein langfristig veränderter Systemzustand des Betriebskonzeptes vor, z.B. aufgrund eines Maschinenausfalls, findet zur Erhöhung der Planungsgenauigkeit ebenfalls eine Aktualisierung des digitalen Abbildes in der Produktionsprogrammplanung statt. Die Produktionsprogrammplanung bildet die im Folgenden vorgestellten Volumentakte und übergibt diese zur Verarbeitung an die Produktionssteuerung.

In den folgenden Abschnitten werden die Herausforderungen für die drei Konzept-schwerpunkte spezifiziert und die entwickelten konzeptionellen Ansätze veranschaulicht.

5.1 Anforderungsanalyse

Auf Basis der beschriebenen Vision für die Smart Factory und damit für das Gesamtkonzept im Projekt SMART FACE, wurde durch die Experten des Konsortiums eine umfangreiche Anforderungsanalyse an die zu entwickelnden Lösungen durchgeführt. Das aus dieser Analyse hervorgegangene Anforderungsprofil konkretisiert die Vorgaben für die Entwicklung von Teilkonzepten sowie der Software- und Hardwarekomponenten innerhalb des Projekts.

Die Anforderungsidentifizierung berücksichtigte die in Abschnitt 4 skizzierte Gegenüberstellung von Soll-Zustand und Ist-Zustand. Die den Soll-Zustand charakterisierenden Zielgrößen wurden anhand der MoSCoW-Priorisierungsmethode¹ durch die einzelnen Projektpartner gewichtet und in eine Gesamtgewichtung überführt. Aus der Spiegelung der Erkenntnisse der Ist-Analyse an den gewichteten Zielgrößen wurden konkrete Anforderungen an die konzeptionellen und technischen Projektarbeiten hergeleitet. Neben einer weiterführenden Spezifikation, z.B. hinsichtlich der Optimierungsrelevanz, wurden sie den inhaltlichen Arbeitsfeldern im Sinne eines Gestaltungsrahmens zugeordnet und übergeben.

Die am höchsten priorisierten Anforderungen des gewonnenen Anforderungsprofils sind in Abbildung 3 zusammengefasst und in aggregierter Weise dargestellt. Diese Anforderungen wurden jeweils maximal hoch priorisiert, d.h. „Must“ entsprechend der MoSCoW-Methode, sodass die gewählte Reihenfolge keinen Hinweis auf deren Bedeutung im Gesamtkontext gibt.²

	Anforderung	Erläuterung
Transparenz	Bestandstransparenz im Materialfluss	Allen Stationen entlang des Materialflusses liegen Informationen über Bestände an den Stationen entlang des Materialflusses vor
	Echzeit-Auftragsmanagement	Alle Partner des Wertschöpfungsnetzwerks haben Transparenz über Eingang und Bearbeitungsstatus von Kundenaufträgen
	Fertigungszeiten	Ist-Fertigungszeiten sind an relevanten Stellen entlang des Fertigungsflusses transparent und können ganzheitlich analysiert werden
	Daten und Informationen	Sicherstellung stets aktueller Datensätze und Parameter bei einem sich ändernden Produktionsportfolio (z.B. bei Modellpflege, Neuanlauf)
	Monitoring	Produktion lässt sich anhand definierter KPI überwachen und hinsichtlich ihrer Effizienz und Effektivität bewerten
Agilität	Volumenflexibilität	Die Produktion ist skalierbar hinsichtlich der realisierbaren Variantenvielfalt und der Outputleistung
	Produkt(mix)flexibilität	Die Fähigkeit eines Produktionssystems, verschiedene Produkte oder Produkte in unterschiedlicher Zusammenstellung zu fertigen
	Routingflexibilität	Möglichkeit der Reihenfolgeänderung der Arbeitsfolgen / Prozessabfolgen entlang der Wertschöpfungskette
	Layoutflexibilität	Das Fertigungslayout (Maschinenanordnung, Materialflusswege) ist flexibel und dynamisch konfigurierbar.
Wirtsch.	Wandlungsfähigkeit	Erweiterbarkeit / Rückbaufähigkeit der Produktionsanlagen im Sinne von Plug&Produce / Modularität
	Kosten	Die Herstellung kleinster Losgrößen (im Extremfall "Losgröße 1") soll zu den wirtschaftlichen Konditionen der Massenproduktion ermöglicht werden.

Abb. 3 Top-Liste der Anforderungen an die konzeptionellen und technischen Arbeiten (vgl. Bellmann et al. 2010, S. 229).

¹ Mit der MoSCoW-Priorisierungsmethode wird eine vierstufige Priorisierung mit den Abstufungen „Must“ (unbedingt erforderlich), „Should“ (sollte umgesetzt werden, wenn alle „Must“-Anforderungen trotzdem erfüllt werden können), „Could“ (kann umgesetzt werden, wenn die Erfüllung von höherwertigen Anforderungen nicht beeinträchtigt wird) und „Won't“ (wird nicht umgesetzt aber für weitere Priorisierungen vorgemerkt) verfolgt.

² Die Zielgrößen und ihre Eigenschaften wurden in diesem Beitrag bewusst vereinfacht dargestellt. Spezifikationen mit wenig Relevanz für die im Fokus stehende Konzeptentwicklung sind bewusst nicht dargestellt.

Das Ergebnis der kooperativen Gewichtung verdeutlicht unter anderem die besondere Relevanz der Kategorien Transparenz und Agilität in Bezug auf die zu entwickelnden Konzepte von SMART FACE. Weiterhin spiegeln die identifizierten Anforderungen die in der Literatur etablierte Zielvorstellung an eine Smart Factory wider (vgl. Spath et al. 2013, S. 129, Kagermann et al. 2013, S. 23-30 und Westkämper 2013, S. 254). Sowohl für die Konzept- als auch für die Software- und Hardwareentwicklung bilden diese Anforderungen entscheidenden Input.

5.2 Betriebskonzept

Das entwickelte Betriebskonzept für die dezentral gesteuerte Montage im Projekt SMART FACE orientiert sich stark an dem literarischen Verständnis der Smart Factory, in dem Prozessstationen ohne dedizierte logistische Verknüpfungen im Raum angeordnet sind und verschiedene Produktvarianten die Produktion auf individuellen Materialflusspfaden durchlaufen (vgl. Steegmüller und Zürn, S. 116-117). Dieses Verständnis der Smart Factory ist in Abbildung 2 skizziert. Somit wurden im Rahmen der Entwicklung des Betriebskonzeptes als Handlungsfelder die Montagestruktur, die Warenbereitstellung und die Lieferantenanbindung identifiziert. Abbildung 4 stellt die hierarchische Gliederung der Handlungsfelder dar, die als Vorgehensweise zur Entwicklung des Betriebskonzeptes gewählt wurden. Der gewählte Ansatz verfolgt den Materialfluss beginnend bei der Montage, deren Ablauf durch die Montagestruktur vorgegeben wird, über die Warenbereitstellung in der Intralogistik bis hin zur Lieferantenanbindung im Bereich der Inbound-Logistik. Durch diese Vorgehensweise werden die Anforderungen der produktionsnahen Konzepte stärker priorisiert als die Konzepte für den betriebsinternen und -externen Materialfluss. Dieses Vorgehen wird zum einen durch den hohen Forschungsbedarf im Bereich der Produktion in der Smart Factory begründet. Zum anderen steht in der Gesamtprozessbetrachtung die Wertschöpfung im Vordergrund. Die logistischen Prozesse dienen der Unterstützung der Produktionsprozesse, weshalb im ersten Schritt produktionsnahe Konzepte in den Fokus der Forschung rücken und die Logistik nachgelagert und in einem ganzheitlichen Kontext betrachtet wird.



Abb. 4 Hierarchische Gliederung der Handlungsfelder im Rahmen der Entwicklung des Betriebskonzeptes

Im Handlungsfeld der Montagestruktur werden die in Abschnitt 5.1 vorgestellten Anforderungen zur Bewertung existierender Montagestrukturtypen im Hinblick auf die Eignung in einer dezentral gesteuerten Montage verwendet. Resultierend aus dieser Bewertung stellen rekonfigurierbare Maschinensysteme (RMS) (vgl. Koren 1999, S. 528-532, Mehrabi et al. 2000, S. 404 und ElMaraghy 2006, S. 264-267) die am besten geeignete Montagestruktur dar und bilden somit die Grundlage für das entwickelte Betriebskonzept. RMS sind von der Montagestruktur der Inselfertigung (vgl. Schuh und Schmidt 2006, S. 131) ähnlich und besitzen eine erhöhte Durchlaufflexibilität durch multiple Prozessfähigkeiten einzelner Arbeitsstationen (vgl. Greschke et al. 2014, S. 161-163).

Neben der genauen Festlegung der räumlichen Anordnung der Montagestationen ist die Zuordnung von Prozessfähigkeiten ein entscheidender konzeptioneller Bestandteil des Betriebskonzepts. In dem entwickelten Szenario können Montagestationen mehrere Prozessfähigkeiten besitzen, wodurch eine Steigerung der Durchlaufflexibilität erreicht wird. Zur Zuordnung der Prozessfähigkeiten werden Cluster gebildet, die u.a. die benötigten Betriebsmittel und Werker berücksichtigen und sinnvoll gruppieren (vgl. Asprión 1997, S. 463-465 und Weidemann et al. 2015, S. 227-229).

Aufbauend auf dem Handlungsfeld der Montagestruktur werden kompatible Lösungen für die Intralogistik sowie Inbound-Logistik erarbeitet. Es soll ein ganzheitliches Optimum der Prozessabläufe in der Smart Factory erzielt werden. Hierauf konzentrieren sich die derzeit noch zu finalisierenden konzeptionellen Arbeiten des Projekts SMART FACE. Diese berücksichtigen unter anderem die Integration flexibler Lösungen für den Materialtransport zur Versorgung der Montageinseln, wie sie z. B. durch die verschiedenen Varianten Fahrerloser Transportfahrzeuge geboten werden. Auch die Spezifikation geeigneter Beschaffungsformen (vgl. Klug 2010, S. 289-298) hinsichtlich eines konsistenten, stabilen Gesamtkonzepts begründen relevante Teilaufgaben innerhalb dieses Arbeitsfeldes.

Das Betriebskonzept schafft die Rahmenbedingungen innerhalb derer Konzepte für die Produktionsprogrammplanung sowie die Produktionssteuerung entwickelt wurden. Diese werden in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben.

5.3 Produktionsprogrammplanung

In diesem Abschnitt wird der neue konzeptionelle Ansatz für die zukünftige Produktionsprogrammplanung in einer Smart Factory veranschaulicht. Das Wissen über Flexibilisierungspotentiale der Produktionsprozesse bildet dabei eine wesentliche Grundlage zur Entwicklung einer neuen Methodik der Produktionsprogrammplanung in einer Smart Factory im Kontext der Industrie 4.0.

Die klassische Produktionsprogrammplanung läuft in mehreren Stufen ab (vgl. Dörmer 2013, S. 34 und S. 49-50 und Schwede 2015, S. 23 und S. 28-34). Auf Ebene der taktischen Planung findet ausgehend von den Vertriebszahlen sowie der Unternehmensstrategie eine Jahresplanung statt, in welcher Jahresbedarfe für die Bauteile und Komponenten, ermittelt aus Stücklisten, festgelegt werden. Auf taktischer bzw. operativer Ebene werden dann rollierend in der Monats-, Wochen- und Tagesplanung Liefermengen abgestimmt, kurzfristige Just-in-Time und Just-in-Sequence Abrufe getätigt und schließlich die Zuord-

nung zu Werk und Linie durchgeführt (Sequenzierung bzw. Perlenkettenbildung). Basierend auf den geplanten Absatzzahlen in der Jahresplanung bis herunter zur Eintaktung der Fahrzeuge auf die Produktionslinien eines bestimmten Werks des Produktionsnetzwerks, findet die Produktionsprogrammplanung heute vollständig zentral statt. Dieses Konzept wird in einer dezentral gesteuerten Montage, welche das Ziel hat, wandlungsfähig zu sein und flexibel auf interne und externe Anforderungen zu reagieren, an seine Grenzen kommen. Daher bedarf es in der Vision von SMART FACE eines neuen und schlanken Konzeptes für die Produktionsprogrammplanung. Bei der Produktionsprogrammplanung in der Smart Factory fällt die Sequenzierung der Aufträge nicht länger dem Bereich der Planung zu. Vielmehr wird über die Abarbeitungsreihenfolge von den CPS auf dem Shopfloor entschieden (s. Abschn. 5.4). Ein vielversprechender Ansatz zur Produktionsprogrammplanung einer dezentral gesteuerten Fertigung stellt die Verwendung eines sog. Volumentaktes dar (vgl. Bochmann et al. 2015, S. 271).

In Abbildung 5 ist dargestellt, wie Kundenaufträge mittels eines Produktkonfigurators erzeugt werden. Anstelle einer Perlenkettenbildung werden die vorliegenden Aufträge jedoch in Volumentakte eingepplant, sodass eine möglichst gleichmäßige Auslastung des Produktionssystems unter Berücksichtigung von aktuellen und prognostizierten Kapazitäten und Ressourcen sichergestellt wird. Zur Ermittlung der entsprechenden Kennzahlen, werden relevante Sensordaten der CPS in geeigneter Form aggregiert und anschließend von der Produktionssteuerungsebene an die Produktionsplanung weitergereicht. Die aus der Produktion gemeldeten aktuellen Kapazitäten und Ressourcen werden im Rahmen einer Simulation verwendet, um eine möglichst gute Prognose für die zukünftige Konfiguration des Produktionssystems zu treffen und auf dieser Basis die Füllung der Volumentakte vorzunehmen. Die Qualität des Planungsergebnisses ist entscheidend für die ressourcengerechte Auslastung der Produktion. Außerdem werden auf Basis des Ergebnisses Lieferabrufe generiert, sodass auch für Teile mit mittlerer Beschaffungszeit die Versorgung sichergestellt werden kann (Horizontale Integration) (vgl. Günthner et al. 2014, S. 297ff.). Komponenten mit einer sehr langen Beschaffungszeit werden weiterhin auf Basis der Vertriebsprognosen beschafft werden müssen, während für solche mit kurzen Beschaffungszeiten Abrufe direkt von den CPS in der Produktion generiert werden können (s. Abschn. 5.4).

Ergebnis der Programmplanung ist der gefüllte Volumentakt, in dem Kundenaufträge ohne fixe Reihenfolge vorliegen, die jedoch mit zeitlichen Vorgaben bzgl. des zu erfüllenden Produktionsendes versehen sind, welche das Produktionssteuerungssystem als Zielwert annimmt. Das Konzept des Volumentaktes macht die Beschaffungsform Just-in-Sequence überflüssig, da die tatsächliche Sequenz der Aufträge erst durch die Produktionssteuerung entsteht, was im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

5.4 Produktionssteuerung

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Aufgabe der Produktionssteuerung. Auf Seiten des Shopfloors werden die aus der Produktionsprogrammplanung geplanten Volumentakte in einem Auftragspool gespeichert (s. Abb. 5).

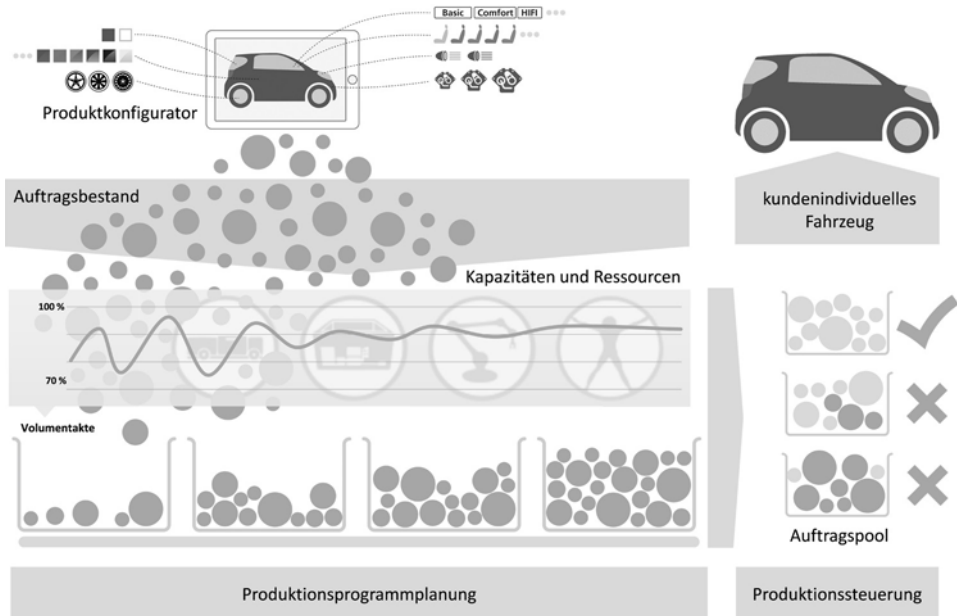


Abb. 5 Der Volumentakts als Ergebnis der Produktionsprogrammplanung und Input für die Produktionssteuerung (vgl. Bochmann et al. 2015, S. 273).

Ab diesem Zeitpunkt stehen die darin enthaltenen Kundenaufträge der Montage zur Verfügung und müssen im Rahmen der zeitlichen Vorgaben abgearbeitet werden. Wo ehemals Produktionsleitsysteme für die sequenzgerechte Einsteuerung von Fahrzeugen in das Produktionssystem verantwortlich waren (vgl. Kropik 2009, S. 75ff.), kann die Produktionssteuerung in der Smart Factory künftig die Reihenfolge von Produktionsaufträgen flexibler wählen. Je Produktionsauftrag erfolgt eine Übersetzung in Montageaufträge und Transportaufträge. Die Transportaufträge werden durch ein Transportauftragsmanagementsystem verwaltet, wobei die Materialversorgung der Montagestationen auf dem Shopfloor über verschiedene Transportsysteme sichergestellt wird (Fahrerlose Transportfahrzeuge, Stapler, Routenzüge etc.).

Die Materialversorgung ist dabei mit der Reihenfolge der Montageaufträge synchronisiert. Diese wird wiederum anhand des sog. Vorranggraphens situationsabhängig vom Produktionssteuerungssystem bestimmt. Der Vorranggraph gibt die Reihenfolge vor, in der die Montageaufträge abgearbeitet werden müssen, um den Produktionsauftrag zu erfüllen. In der Fließmontage ist der Vorranggraph ein linearer Graph, der keinerlei Flexibilisierungspotential aufweist. In einer Smart Factory können die Montageinseln jedoch theoretisch in beliebiger Reihenfolge angefahren werden. Der Vorranggraph beschränkt die Anzahl der theoretisch möglichen Reihenfolgen, sodass physische Restriktionen bei der Montage eingehalten werden, alternative Reihenfolgen der Tätigkeiten jedoch nutzbar sind. Die gewonnenen Freiheitsgrade können für die Montage genutzt werden und führen zu einer höheren Robustheit des gesamten Produktionssystems, da nun etwa Materialeng-

pässe durch die Wahl einer alternativen Verbaureihenfolge kompensierbar sind. Stehen beispielweise für den nächsten Montageschritt laut Vorranggraph zwei mögliche Wertschöpfungsschritte zur Auswahl, wird die Entscheidung, welcher Schritt ausgeführt wird, anhand verschiedener Kriterien getroffen. Dies kann zum einen die Materialverfügbarkeit sein. Besteht die Wahlfreiheit zwischen der Montage eines Lenkrades und der der Auspuffanlage, wobei der Bestand an Lenkrädern kritisch ist, da etwa eine Lieferung staubedingt verspätet ist, wird die Attraktivität zum Verbau von Auspuffanlagen erhöht, womit die Tendenz, diese zu verbauen, steigt. Zum anderen spielt aber auch die Entfernung zwischen zu montierendem Auftrag und den nächstmöglichen Arbeitsstationen sowie deren kapazitive Auslastung eine Rolle.

Die Ermittlung eines globalen Optimums wird nicht wie bisher durch zentrale Planungs- und Steuerungssysteme durchgeführt, sondern mittels eines MAS, welches sich aus Softwareagenten zusammensetzt, die auf den CPS des Shopfloors integriert sind (vgl. Gössinger 2000, S. 88-91 und Mönch 2006, S. 36-38). Sensoren an den CPS erheben verschiedene Messdaten, etwa Position, Geschwindigkeit und Montagefortschritt, und ermöglichen so die Kontextsensitivität der CPS. Da die CPS in einem Netzwerk miteinander interagieren, ergibt sich ein genaues Statusabbild des gesamten Produktionssystems. Auf einer solchen Informationsbasis ist es möglich, dass CPS autonom Materialabrufe bei Lieferanten für Teile mit kurzer Wiederbeschaffungszeit platzieren und so für eine zeitgerechte Bereitstellung der zu montierenden Teile sorgen. Eine Grundvoraussetzung für ein solches Szenario ist die nahtlose Integration aller in der Produktion involvierten IT-Systeme, sowohl auf Seiten der Planung, wie auch auf Seiten der Steuerung.

6 Ansätze für die praktische Umsetzung

Durch den vorliegenden Abschnitt werden die bereits entwickelten und im weiteren Verlauf des Projekts noch zu entwickelnden Demonstratorvarianten veranschaulicht. Die Demonstratoren dienen dazu, die praktische Umsetzbarkeit der erzielten Arbeitsergebnisse und damit auch der entstandenen und hier vorgestellten Konzepte zu bekräftigen. Die durch SMART FACE zu erschließenden Potentiale werden durch realitätsgetreue Anwendungsszenarien veranschaulicht und untermauert. Bereits zur Projekthälfte konnte ein miniaturisierter Demonstrator entwickelt und der Öffentlichkeit präsentiert werden („Minidemonstrator“). Die Entwicklung von Demonstratorvarianten in erweitertem Umfang und realitätstreuerem Maßstab („Maxidemonstratoren“) begründen noch zu leistende Projektaufgaben.

6.1 Minidemonstrator

Für die frühzeitige Demonstration und Validierung der konzeptionellen und technischen Projektarbeiten ist ein miniaturisierter Demonstrator entwickelt worden, welcher erstmals auf der Hannover Messe Industrie 2015 präsentiert wurde. Die auf dieser Messe präsentierte Version des Minidemonstrators ist der Abbildung 6 zu entnehmen.

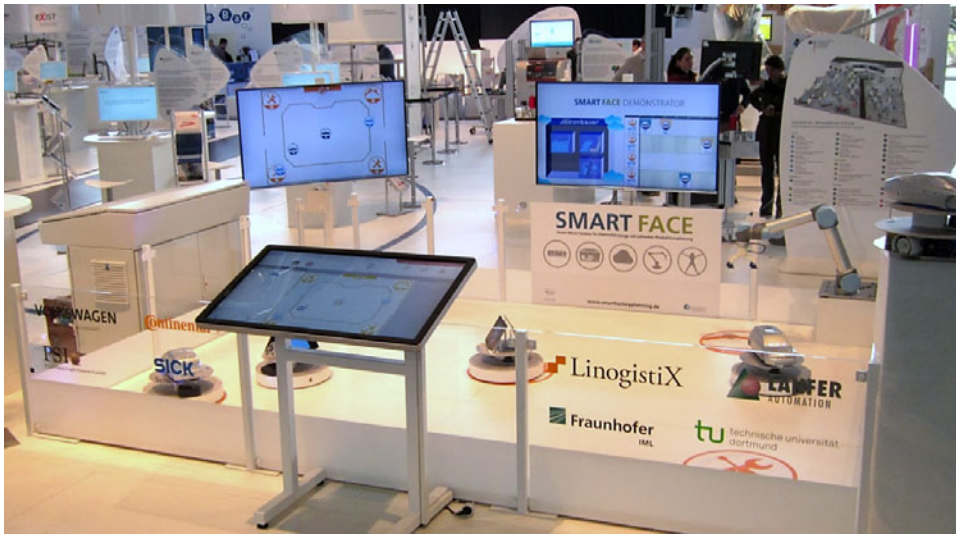


Abb. 6 Minidemonstrator auf der Hannover Messe Industrie 2015 – Fraunhofer IML
http://www.Impl.fraunhofer.de/de/presse_medien/pressemitteilungen/hannover-messe-smart-face.

Der auch in den Folgearbeiten weiterzuentwickelnde Minidemonstrator repräsentiert eine miniaturisierte, wandlungsfähige und selbststeuernde Fahrzeugmontage. Dazu sind exemplarische Teilprozesse der Montage im Demonstrator integriert, durch die eine weitgehende Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitungsreihenfolgen geboten werden. Autonome, interagierende und intelligente Sensorik und Aktorik tragen nach dem CPS-Prinzip dafür Sorge, dass Montageobjekte und Bauteile ihren Weg eigenständig von Montagestation zu Montagestation finden. Das System ist somit in der Lage, adaptiv auf veränderte Produktionsplanungen und Störeinflüsse zu reagieren. In diesem realitätskonformen Aufbau mit einer übergeordneten Kommunikation interagieren Fahrerlose Transportfahrzeuge, die jeweils eine (teilstufige) Karosse geladen haben, mit anzufahrenden Montagestationen sowie zusätzlichen Transportfahrzeugen, welche die Versorgung mit Teilen aus einem Lager (Supermarkt) sicherstellen. Beobachter des Demonstrators sollen in die Lage versetzt werden, die Produktion interaktiv über ein berührungssensitives Terminal durch das Einbringen von Störgrößen, etwa einem Stationsausfall, zu beeinflussen. Übergeordnetes Ziel ist die Demonstration der selbstständigen Anpassung des Montagesystems an die veränderten Anforderungen infolge der dynamischen Änderung von Montagereihenfolgen und Transportaufträgen. Über eine zusätzliche Visualisierung wird der komplette Kommunikationsprozess der interagierenden Fahrzeuge und Stationen nachvollziehbar gemacht. Es resultiert ein augmentiertes Monitoring der jeweils aktuellen Produktionsprogrammplanung, Montageprozesse und Transportaufträge.

Anhand dieses Demonstrators konnten bereits frühzeitig erste Ideen, Konzepte und Ergebnisse der dezentral gesteuerten Smart Factory validiert und weiterentwickelt werden. Diese Erkenntnisse bilden nicht nur ergänzenden Input für die konzeptionellen wie auch

technischen Arbeiten des Projekts, sondern zugleich liefern sie Input für die Konzeptionierung der erweiterten und maßstabstreueren Maxidemonstratoren.

6.2 Maxidemonstratoren

Der nächste Schritt auf dem Weg zum Umsetzungspiloten liegt in der Evaluation des vorgestellten Gesamtkonzepts durch eine praxistreue Simulation. Mittels Simulationssoftware soll das Systemverhalten einer durch das neuartige Konzept gesteuerten Fahrzeugendmontage analysiert und die durch SMART FACE erzielten Nutzenpotentiale quantifiziert werden. Anpassungsbedarfe der Regeln für die Auftragsabarbeitung in der Smart Factory werden identifiziert und für die Optimierung des Gesamtkonzepts genutzt.

Die Skalierung des Minidemonstrators auf eine funktional erweiterte, maßstabsgerechte und praxiskonformere Demonstratorvariante soll innerhalb des LivingLab Zellulare Transportsysteme am Fraunhofer IML in Dortmund erfolgen (vgl. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML 2015b). Innerhalb dieses Experimentierfeldes führen bereits heute über 50 intelligente, miteinander vernetzte Fahrerlose Transportfahrzeuge Transportaufträge zwischen Arbeitsstationen und einem Behälterlager aus. Diese Fahrzeuge koordinieren sich selbstständig ohne zentrale Steuerung. Ähnlich dem Minidemonstrator werden die einzelnen Teilnehmer des Produktions- und Logistiksystems in die dezentrale Produktionssteuerung eingebunden und mittels der schlanken Produktionsplanung beauftragt. Die gegebene Grundlage eignet sich ideal für die Implementierung und Erprobung der in SMART FACE erarbeiteten Konzepte. Insbesondere für die Demonstration und Evaluation der Produktionssteuerung und im Rahmen dieser primär für die Steuerung der fahrerlosen Transportfahrzeuge auf dem Shopfloor, bietet dieser geplante Demonstrator große Potentiale.

In finaler Instanz des Projekts sollen die erzielten Arbeitsergebnisse bereits während der Projektlaufzeit erstmalig in der betrieblichen Praxis Anwendung finden. Vorgesehen ist, das in SMART FACE entwickelte Gesamtkonzept innerhalb ausgewählter Teilprozesse der variantenreichen Kleinserienproduktion von Fahrzeugen exemplarisch zu integrieren.

7 Ausblick

Durch den vorliegenden Beitrag wurde der konzeptionelle Ansatz des Verbundprojekts SMART FACE veranschaulicht. Dieser berücksichtigt die Entwicklung von Teilkonzepten hinsichtlich der Kernaufgaben der Produktionsprogrammplanung, Produktionssteuerung und des Betriebs einer variantenreichen Fahrzeugproduktion von Kleinserien. Die wechselseitigen Abhängigkeiten der Kernaufgaben bedingen die ganzheitlich orientierte Gestaltung der Teilkonzepte und die Ableitung eines integrierten Gesamtkonzepts für die Smart Factory. Das dominierende Gestaltungskriterium ist die Flexibilität in ihren unterschiedlichen Dimensionen, insbesondere hinsichtlich Prozess, Leistung und Layout. Das Gesamtkonzept bereitet den Weg hin zu einer intelligenten, selbstorganisierenden Fahrzeugproduktion, die flexibel auf stark schwankende Systemlasten reagiert und zugleich einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleistet.

Im weiteren Verlauf des Projekts werden die hier entsprechend aggregiert dargestellten Teilkonzepte weiter spezifiziert und evaluiert. Sie bilden den Input für die bereits parallel angestoßenen, primär soft- und hardwareseitigen Projektarbeiten, welche dazu dienen, SMART FACE in die praktische Umsetzung zu überführen. Zu diesen Arbeiten zählen beispielhaft die Entwicklung einer Onlinesimulation der Materialflusstransporte nach dem Internet der Dinge-Prinzip, die Entwicklung eines Assistenzsystems für die schlanke Produktionsprogrammplanung sowie die Erarbeitung nachhaltiger technischer und methodischer Konzepte für intelligente Sensoren, die den CPS-Anforderungen in besonderer Form entsprechen. Wie durch den Abschnitt „Ansätze für die praktische Umsetzung“ bereits veranschaulicht, werden die zentralen Arbeitsergebnisse in Form der Demonstratoren kanalisiert, anhand derer die praktische Umsetzbarkeit von SMART FACE bekräftigt wird. Neben der Entwicklung der finalen Maxidemonstratoren wird auch der bereits erarbeitete und der Öffentlichkeit präsentierte Minidemonstrator weiterentwickelt und für eine vorgelagerte Demonstration bereits entwickelter Konzepte genutzt.

Damit aus SMART FACE nicht ausschließlich Erkenntnisse resultieren, die in der Automobilindustrie Anwendung finden können, wird der die Konzeptentwicklung stets begleitende Anspruch einer möglichst großen Anwendungsportabilität besonders beachtet. Nutzen und Aufwände für die Übertragung der Konzepte auf alternative Anwendungsszenarien werden bewertet, sodass eine noch weiterreichende Umsetzung von SMART FACE vorbereitet wird.

Weiterführende Informationen zum Projekt können der Projekthomepage unter der nachfolgenden Adresse entnommen werden: <http://www.smartfactoryplanning.de>.

8 Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden über das Technologieprogramm „AUTONOMIK für Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb des Forschungsprojektes „SMART FACE - Smart Micro Factory für Elektronikfahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung“ unterstützt (Förderkennzeichen 01MA13007).“

9 Literaturverzeichnis

- Asprion, B. (1997): Clusteranalyse zur Unterstützung der operativen Produktionsplanung bei Kleinserienproduktion. In: *Operations Research Proceedings*, S. 462-467.
- Bauernhansl, T. (2014): Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Springer Vieweg: Wiesbaden, S. 5-35. (ISBN: 978-3-658-04681-1)
- Bellmann, K., Himpel, F. und Böhm, A. (2010): Messung von Flexibilität in der Produktion. In: Jürgen S. und Andreas G. (Hrsg.): *Strategisches und operatives Produktionsmanagement*. Gabler Verlag: Wiesbaden, S. 221-240. (ISBN: 978-3834917669)
- Bochmann, L., Gehrke, L., Böckenkamp, A., Weichert, F., Albersmann, R., Prasse, C., Mertens, C., Motta, M. und Wegener, K. (2015): Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graph. URL: http://www.iwf.mavt.ethz.ch/ConfiguratorJM/publications/Towards_De_143046323876613/IJAT_2015.pdf

- Bullinger, H.-J. (2007): Unterwegs im Internet der Dinge (Vorwort). In: Bullinger, H.-J. und ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge. Springer: Berlin, Heidelberg, S. XXIV-XXV. (ISBN: 978-3-540-36729-1)
- Copaciu, Felicia V. (2013): Analyse der Wirkungszusammenhänge der Perlenkettenmethode in der Automobilindustrie. Verlag Praxiswissen: Dortmund.
- Dijk, M., Orsato, Renato J. und Kemp, R. (2013): The emergence of an electric mobility trajectory. In: Energy Policy (Vol. 52 2013), S. 135-145.
- Dörmer, J. (2013): Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion - Untersuchung am Beispiel der Automobilendmontage. Springer Fachmedien: Wiesbaden. (ISBN: 978-3658020910)
- ElMaraghy, Hoda A. (2006): Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems (17), S. 261-276.
- Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML (2015a): SmartFace. http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/informationslogistik_und_assistenzsysteme/forschung/SmartFace.html (16.07.2015).
- Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML (2015b): LivingLab Zellulare Transportsysteme: <http://www.iml.fraunhofer.de/de/forschungshallenlabore/zft-halle.html> (16.07.2015).
- Gössinger, R. (2000): Opportunistische Koordinierung bei Werkstattfertigung (Information – Organisation – Produktion). Deutscher Universitäts-Verlag: Wiesbaden. (ISBN: 978-3824472949)
- Götz, A. (2007): Zukunftsstandort Deutschland? In: Automobil-Produktion (Ausgabe 02/2007), S.16-19.
- Greschke, P., Schönemann, M., Thiede, S. und Herrmann, C. (2014): Matrix structures for high volume and flexibility in production systems. In: Procedia CIRP 17, S. 160-165.
- Günthner, W., Klenk, E. und Tenerowicz-Wirth, P. (2014): Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg: Wiesbaden, S. 296-323. (ISBN: 978-3-658-04681-1)
- Kagermann, H. (2013): Zukunftsbild Industrie 4.0 - Impuls zur Transfer-Konferenz AUTONOMIK des BMWi 2013, Berlin. URL: http://www.autonomik.de/documents/Kagermann_Zukunftsbild_Industrie_40.pdf
- Kagermann, H., Wahlster, W. und Helbig, J. (2013): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunfts-projekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. URL: http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf
- Klug, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Springer: Berlin, Heidelberg. (ISBN: 978-3642052927)
- Koren, Y. (1999): Reconfigurable Manufacturing Systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology (48), S. 527-540.
- Kropik, M. (2009): Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Springer: Berlin Heidelberg. (ISBN: 978-3540889908)
- Mehrabi, Max G., Ulsoy, Axel G. und Koren, Y. (2000): Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. In: Journal of Intelligent Manufacturing (11), S. 403-419.
- Meyer, M., Walber, B. und Schmidt, C. (2006): Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in temporären Produktionsnetzwerken des Maschinen- und Anlagenbaus. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer: Berlin, Heidelberg, S. 511-541. (ISBN–13 978-3-540-40306-7)
- Mönch, L. (2006): Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme (German Edition). Deutscher Universitäts-Verlag: Wiesbaden. (ISBN: 978-3835002494)

- Schneider, C., Bunse, K. und Schönsleben, P. (2010): Bewertungskriterien für die Modularisierung in der Automobilproduktion. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO-Verlag: Berlin, S. 121-135. (ISBN: 978-3-940083-15-4)
- Schuh, G. und Schmidt, C. (2006): Prozesse. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer: Berlin, Heidelberg, S. 108-194. (ISBN-13 978-3-540-40306-7)
- Schwede, C. (2015): Integration von Auftragsreihenfolge- und Distributionstransportplanung in der Automobilindustrie. Verlag Praxiswissen: Dortmund. (ISBN: 978-3-86975-099-6)
- Spath, D., Ganschar, O., Gerlach S., Hämmerle, M., Krause, T. und Schlund, S. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Fraunhofer Verlag. URL: http://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft-Industrie_4_0.pdf
- Stegmüller, D. und Zürn, M. (2014): Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg: Wiesbaden, S. 103-119. (ISBN: 978-3-658-04681-1)
- Wegener, D. (2014): Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg: Wiesbaden, S. 342-358. (ISBN: 978-3-658-04681-1)
- Weidemann, U., Schneider, H., Müller, R., Speicher, C. und Kappel, H. (2015): Montagecluster in der Fahrzeugendmontage. Clusterung von Montageumfängen zur Strukturierung der Fahrzeugendmontage. In: wt Werkstatttechnik online 105 (4), S. 225-230.
- Westkämper, E. (2013): Digitale Produktion. Springer: Berlin. (ISBN: 978-3642202582)

Die Autoren

Lennart Sören Bochmann studierte Maschineningenieurwissenschaften an der ETH Zürich und ist heute Doktorand bei der Volkswagen AG in Kooperation mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF) der ETH Zürich.

Lars Gehrke studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Braunschweig, der University of Waterloo (Kanada) und der Tongji University (China). Er ist Doktorand auf dem Gebiet „Management der Industrie 4.0“ in Kooperation mit dem Smart:Production:Lab und dem Lehrstuhl für Unternehmenslogistik der Technischen Universität Dortmund. Im Smart:Production:Lab leitet und bearbeitet er verschiedene Projekte im Bereich Industrie 4.0.

Nils Gehrke studiert Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Maschinenbau an der TU Braunschweig und ist Werksstudent bei der Volkswagen AG.

Christoph Mertens studierte Kerninformatik an der TU Dortmund und ist heute wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML).

Oliver Seiss studierte Logistik an der TU Dortmund und ist heute wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML).