

## **Schlussbericht**

### **Verbundvorhaben**

### **Smart FacE-Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung**

<b>Titel des Teilvorhaben:</b>	<b>Sensorik für Planungs- und Steuerungskonzepte für die schlanke Produktionsplanung (Sens Smart Face)</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	<b>SICK AG</b>
<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>01MA13007F</b>
<b>Autor/en:</b>	<b>M. Böhning, C. Hansen, Dr. C. Reinke</b>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	<b>01.11.2013 bis 31.12.2016</b>

**Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)**

## Inhalt

1.	Einleitung.....	3
1.1.	Gesamtziel des Vorhabens .....	3
1.2.	Ziele des Teilvorhabens ‚Sens SMART FACE‘ .....	4
1.3.	Einbettung in das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ .....	5
1.4.	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele .....	5
2.	Projektstruktur .....	6
2.1.	Konsortium .....	6
2.2.	Arbeitsteilung und Projektmanagement.....	7
2.3.	Meilensteinplanung.....	9
3.	Stand der Technik zu Projektbeginn.....	11
3.1.	CPS-basierte Sensor-/Aktornetzwerke .....	11
3.2.	Monitoring, Modellierung, Simulation .....	11
3.3.	Patentlage.....	11
3.3.1.	Patente im Bereich intelligente Sensorik und Sensornetzwerke .....	11
3.3.2.	Patente im Bereich Cyber-Physical Systems.....	12
4.	Eingehende Darstellung .....	13
4.1.	Technische Ergebnisse.....	13
4.1.1.	AP 1 – Identifikation und Anforderungsanalyse.....	13
4.1.2.	AP 6 – Monitoring und Assistenzsystem .....	13
4.1.3.	AP 8 – Kommunikation und Lokalisation.....	14
4.1.4.	AP 9 – Sensorik und Aktorik .....	16
4.1.5.	AP 11 – Demonstrator .....	19
4.1.6.	Zusammenfassung der wichtigsten technischen Ergebnisse .....	21
4.2.	Wissenschaftliche Ergebnisse.....	22
4.3.	Öffentlichkeitsarbeit.....	23
4.3.1.	Projekthomepage .....	24
4.3.2.	Konzeptposter und Konzeptvideo .....	24
4.3.3.	Veröffentlichungen.....	24
4.3.4.	Messe- und Konferenzauftitte .....	25
4.3.5.	Abschlusspräsentation und Abschlussvideo.....	26
5.	Nutzen und Verwertung.....	27
6.	Literatur .....	28

## 1. Einleitung

Die speziellen Anforderungen der Kleinserienfertigung bzgl. Betrieb, Skalierbarkeit, Robustheit und Wirtschaftlichkeit erfordern einen radikalen neuen Ansatz für die Fertigungsplanung und -steuerung. Hieraus resultiert die Notwendigkeit einer schlanken Produktionsplanung und wandlungsfähiger Fertigungsstrukturen [1]. Der im Projekt SMART FACE vertretene Ansatz favorisiert dezentrale, hochflexible Materialflusseinheiten, realisiert durch Cyber-Physical Systems (CPS) als Schlüssel zum Erfolg [2]. Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung wurde der Grad der notwendigen bzw. möglichen Dezentralisierung durch einen Vergleich mit aktuellen Fertigungskonzepten untersucht. Ziel des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes SMART FACE war es, die forschungsleitenden Fragen zu beantworten und die Machbarkeit der Konzepte an einem realitätsnahen Anwendungsszenario zu erproben.

Eine Produktion im Sinne der Industrie 4.0, in der sich CPS autonom mit ihrer Umwelt abstimmen und so ein Höchstmaß an Flexibilität generieren, in Kombination mit einer smarten Produktionsplanung, welche die Versorgungssicherheit der Produktion gewährleistet, ist die Vision des Forschungsprojektes SMART FACE. Bezogen auf das Anwendungsbeispiel Automotive wird in SMART FACE die Überführung der Taktung der Tagesplanung in ein selbstorganisierendes CPS angestrebt. Durch die Abbildung 1 wird diese Vision veranschaulicht.

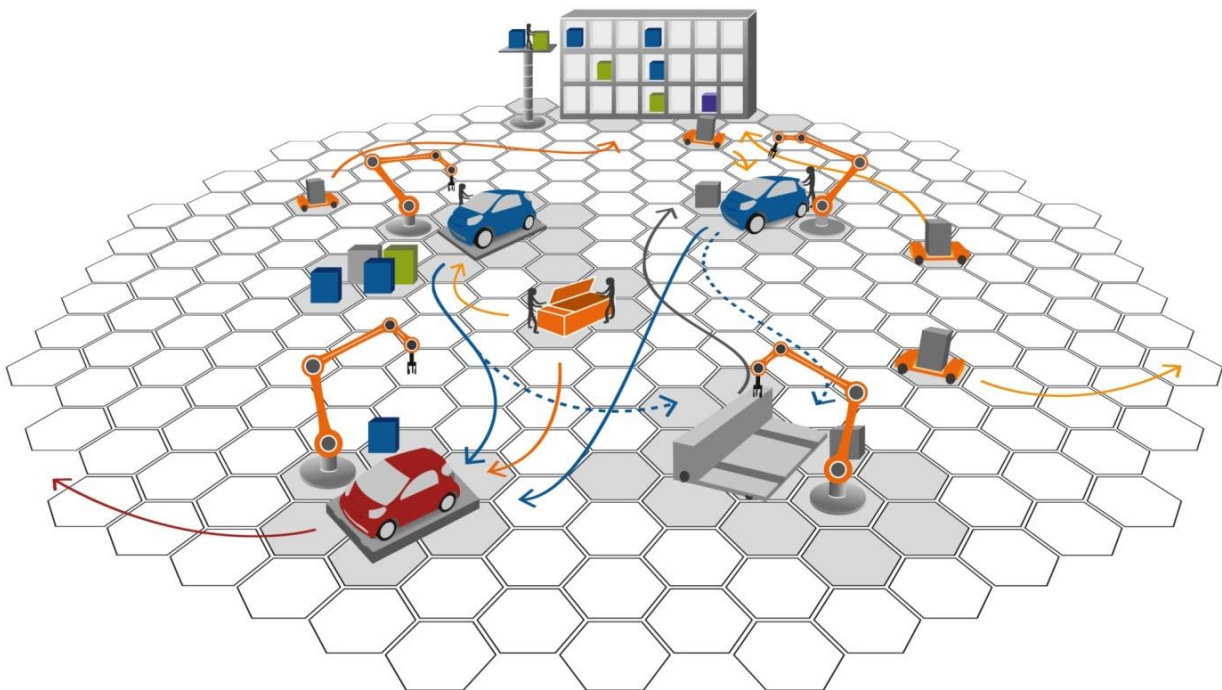


Abbildung 1: Vision des Projekts SMART FACE

### 1.1. Gesamtziel des Vorhabens

**Gegenstand und Ziel des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes** war die Entwicklung nachhaltiger Konzepte und Methoden, welche den speziellen Anforderungen der Kleinserienfertigung bzgl. Betrieb, Skalierbarkeit, Robustheit und Wirtschaftlichkeit erfüllen – dies erforderte einen radikal neuen Ansatz für die Fertigungsplanung und -steuerung. Hieraus resultierte das Ziel des Vorhabens hin zu einer schlanken Produktionsplanung und wandlungsfähigen Fertigungsstrukturen. Dabei sollten dezentrale, hochflexible Materialflusseinheiten, realisiert durch Cyber-Physical Systems (CPS) im Fokus des Vorhabens stehen [3].

Die **Notwendigkeit des Forschungsvorhabens** resultierte dabei aus der sich durchsetzenden Wende zu immer kürzeren Produktionszyklen, mehr Individualisierung und Produktionssteigerung – dies sind seit

Jahren beherrschende Themen der Produktion. Besonders in der deutschen Automobilindustrie gleicht bei einer Variantenanzahl von  $10^{25}$  kein Fahrzeug dem anderen, sodass in der Produktion das Thema „Losgröße 1“ schon lange vorherrscht. Hohe Effizienz bei gleichzeitiger Variantenvielfalt wird in der variantenreichen Serienfertigung bereits mit komplexen und trägen Planungssystemen und klassischer Fließfertigung in der PKW-Montage beherrscht. Jedoch gibt es gerade im Bereich der Kleinstserienfertigung, insbesondere der aufkommenden Produktion von Elektroautos, deutlich abweichende Anforderungen, die nicht von diesen klassischen Systemen erfüllt werden. Dabei ist die Individualität bei Weitem nicht auf die Automobilindustrie beschränkt. Gemäß der weiteren Vorhaben der Ausschreibung „Industrie 4.0“ trifft dies auch auf die Herstellung von Kaffeemaschinen oder Sportschuhe zu.

Der aktuelle **Stand der Technik** wird diesen Herausforderungen bisher nur eingeschränkt gerecht, da in der Praxis derzeit die klassische Fließfertigung primär auf maximale Produktivität ausgelegt ist. Die heutige Produktionsplanung bei einer bisher verfügbaren variantenreichen Fließfertigung besteht aus einer Kombination von hocheffizienten Montagelinien und einer umfassenden IT-Infrastruktur zur zentralen Planung – eine dezentrale Steuerung des Materialflusses fehlt. Hierdurch wird eine Ausrichtung im Hinblick auf die Verbesserung der Flexibilität bzw. Wandlungsfähigkeit und Effizienz bzgl. Ressourcen und Kontextadaptivität von kleinen und mittleren Serienfertigungen nachhaltig behindert. Die gleichzeitige oder gekoppelte Informationsverarbeitung heterogener Sensoren ist zwar ein Feld aktueller Forschung, es fehlen aber Mechanismen, um Sensorik, Information und Prozessmanagement integriert zu beachten.

Der **neuartige Ansatz des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes** besteht daher in einem dezentral gesteuerten Produktionssystem nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip, in dem Montage- und zu bearbeitende Teile ihren Weg eigenständig von Maschine zu Maschine finden. Redundant vorhandene Maschinen verteilen selbstorganisierend die Last und erreichen einen effizienteren Betrieb (lokale Optimierung) und eine höhere Auslastung – nach diesem Motto soll im Rahmen des Projektes ein neues, schlankes Programmplanungskonzept entwickelt und prototypisch umgesetzt werden. So soll eine durchgängige Methodik zur übergreifenden globalen Programmplanung (Wochenprogrammerstellung), die alle wesentlichen Restriktionen sowie Ziele berücksichtigt und auf die Anforderungen der Kleinstserienfertigung ausgelegt ist, entwickelt werden. Diese Methode definiert die Last für das dezentrale Produktionssystem, welches sich selbst lokal optimiert und somit ohne eine zentrale Reihenfolgeplanung auskommt. Die Vorteile liegen in der Flexibilität, der Adaptierung und der besseren Reaktion auf eintretende Risiken. Cyber-Physical Systems ermöglichen einen kontinuierlichen Datenaustausch, so dass eine enge, auch außerbetriebliche Kommunikation mit Lieferanten in der globalen Planung gewährleistet ist und strategische Zielvorgaben berücksichtigt werden können.

**SMART FACE** – „Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung“ – verknüpft erstmalig den Informationsfluss durch eingebettete Systeme mit dem realen Materialfluss, gestaltet einen einfach zu skalierenden Produktionsprozess und erlaubt zudem eine deutlich schlankere Planung.

## 1.2. Ziele des Teilvorhabens ‚Sens SMART FACE‘

Neben den allgemeinen Zielen des Forschungsvorhabens hat die SICK AG durch seine Beteiligung insbesondere zur Erreichung der folgenden Ziele beigetragen:

Ziel des **Arbeitspakets 6 ‚Monitoring und Assistenzsystem‘** war die Konzeptionierung und Umsetzung eines sensorbasierten Monitorings von zellularen Förderfahrzeugen in Zusammenarbeit mit ausgewählten Partnern.

Ziel des **Arbeitspakets 8 ‚Kommunikation und Lokalisation‘** war die Anbindung von intelligenter Sensorik in die Kommunikationsstruktur und Dienste sowie die Weiterentwicklung der Lokalisierung mittels optischer Sensorsysteme.

Ziel des **Arbeitspakets 9 ‚Sensorik und Aktorik‘** war die Erarbeitung der Anforderungen an zukünftige CPS-Sensorik in Zusammenarbeit mit ausgewählten Partnern sowie die Weiterentwicklung von ausgesuchten SICK-Sensoren gemäß den Anforderungen an (Retrofit)Cyber-Physical-Units.

Ziel des **Arbeitspakets 11 ‚Demonstrator‘** war die Integration der im Rahmen des Projektes weiterentwickelten intelligenten Sensoren in die Projektdemonstratoren.

Ziel des **Querschnittsarbeitspakets 1 ‚Intelligente Sensorik‘** war die Erarbeitung von projektübergreifenden Anforderungen an CPS-Sensorik sowie die Vorbereitung der Standardisierung von intelligenten Sensoren gemäß Industrie 4.0.

### 1.3. Einbettung in das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“

Nach den ersten drei industriellen Revolutionen in der Vergangenheit von der Mechanisierung der Produktionsanlagen bis hin zum Einsatz von Elektronik und IT zur weiteren Automatisierung der Produktion soll nun die deutsche Wirtschaft auf die vierte industrielle Revolution auf Basis von Cyber-Physischen Systemen – Industrie 4.0 – vorbereitet werden. Die Zukunftsinitiative der Bundesregierung Industrie 4.0 zielt darauf ab, die deutsche Industrie in die Lage zu versetzen, für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein.

Der Begriff Industrie 4.0 impliziert den grundlegenden Paradigmenwechsel von einer zentralen zu einer dezentralen, erweiterten (augmentierten) Steuerung mit dem Ziel einer hochflexiblen Produktion individualisierter, digital veredelter Produkte und Dienste. Dabei verschwinden klassische Branchengrenzen und es entstehen neue, übergreifende Handlungsfelder und Kooperationsformen. Wertschöpfungsprozesse verändern sich und die Arbeitsteilung entlang der Supply Chain wird neu organisiert. Zunehmend intelligente Fähigkeiten ermöglichen es in der Wechselwirkung von so genannten Smart Objects, Smart Services und Smart Networks zukünftig komplexe Aufgaben eigenständig (autonom) zu bewältigen. Von herausragender Bedeutung wird dabei die Einbeziehung neuer Dimensionen in die virtuelle Welt des Internets sein. Intelligente, vernetzbare Sensoren und 3D-Technologien ermöglichen eine zuverlässige Erfassung der Umwelt und eine Kommunikation der Smarten Objekte untereinander.

Im Rahmen des ‚Autonomik für Industrie 4.0‘-Programms hat das Projekt SMART FACE entsprechend der einleitend genannten Ziele einen signifikanten Beitrag im Bereich der Kleinstserienfertigung geleistet, in dem eine innovative, schlanke Produktionsplanung die Betreiber von Fertigungs- und Montageanlagen befähigt dezentral gesteuerte Produktions- und Materialflusssysteme effizient einzusetzen. Basierend auf den Prinzipien „Internet der Dinge“, „Eingebettete Systeme“ und „Smarte Fabrik“ wurde eine autonome Steuerung der Fertigung realisiert.

### 1.4. Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Die Arbeiten der SICK AG lagen auf dem Fokus der intelligenten Sensoren. Zu den wichtigsten technischen Zielen zählte die konturbasierte, von künstlichen Landmarken und Odometrie-Informationen unabhängige Lokalisierung der Förderfahrzeuge auf Basis der weiterentwickelten intelligenten Sensorik. Daraus resultierend ergaben sich die technischen Ziele der dynamischen Kartenupdates sowie die Kommunikation der erfassten Umgebungsinformationen zwischen einzelnen Fahrzeugen.

Das übergreifende wissenschaftliche Ziel bildete die Erarbeitung der Anforderungen an zukünftige CPS-Sensorik. Diese Anforderungsanalyse war nicht nur Ziel von SMART FACE (Arbeitspaket 9), sondern auch Ziel des Querschnittsarbeitspakets ‚Intelligente Sensorik‘ (QAP 1).

## 2. Projektstruktur

### 2.1. Konsortium

Das Projektkonsortium war interdisziplinär zusammengesetzt und spiegelt die weitreichende wissenschaftliche und industrielle Expertise der Projektpartner in Produktions- und IT-Anwendungen wider, sodass die unterschiedlichen Ansprüche an das Projekt erfolgreich abgedeckt wurden. Neben SICK als Hersteller von vernetzter Sensorik bestand es aus innovativen Softwareunternehmen im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung (LinogistiX/Logata und F/L/S) sowie aus zwei hochkarätigen Anwendern aus der Automobilindustrie (Volkswagen und Continental). Wissenschaftliche Unterstützung erhielten die Industriepartner durch zwei Forschungseinrichtungen, die über umfangreiche Kompetenzen in Simulation, Optimierung und Validierung von komplexen Systemen (TU Dortmund) sowie der dezentral gesteuerten Logistik- und Materialflusstechnik (Fraunhofer IML) verfügen.

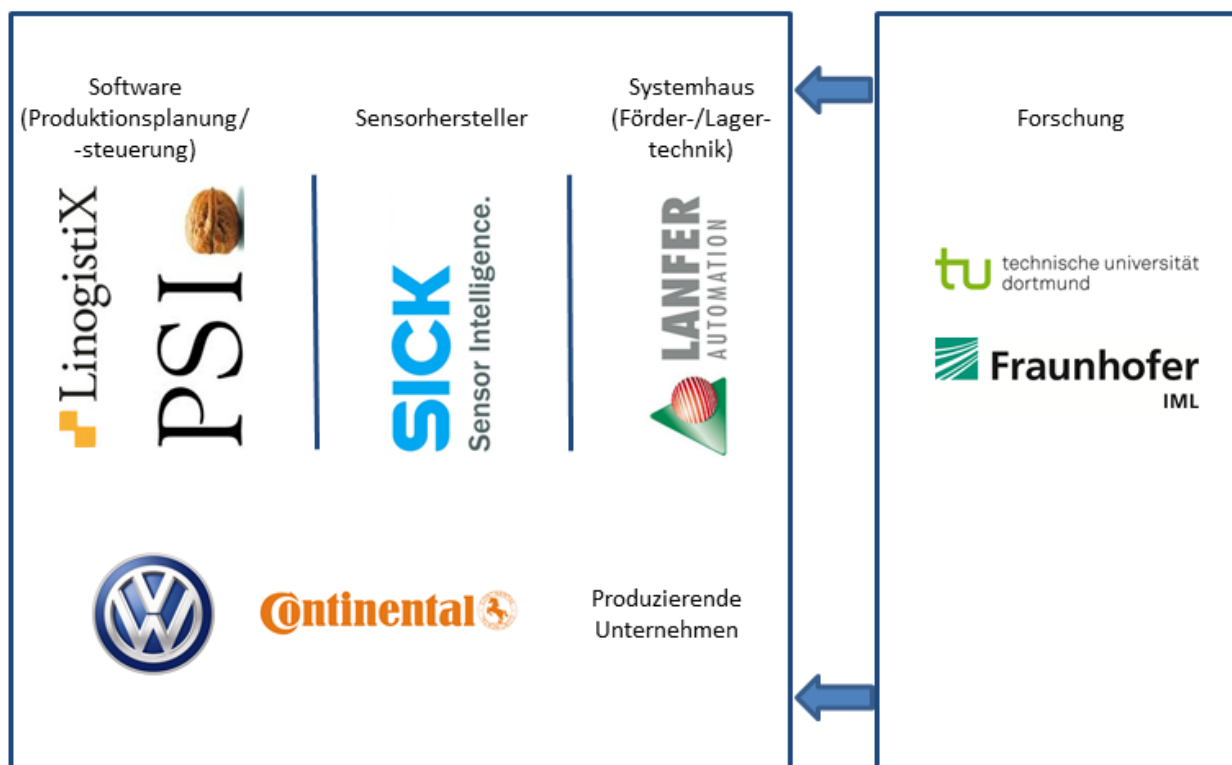


Abbildung 2: Wissenschaftliche und industrielle Expertise im Projektkonsortium

Die Anwendungspartner **Volkswagen AG** und **Continental** sind führende Unternehmen in der Automobilindustrie. Beide optimieren kontinuierlich ihr Supply Chain Management, um auch zukünftig den technologischen Vorsprung voranzutreiben. Sowohl Volkswagen als auch Continental verfügen über ein breit gefächertes Produktspektrum, das um Produkte der Elektromobilität sukzessive erweitert werden soll. Die Anwendungspartner brachten ihre hohe Branchenkompetenz sowie wirtschaftliche Kompetenz in das Projekt ein und unterstützten damit die Entwicklung praktikabler, branchenspezifischer Lösungen zur Planung und Steuerung einer Kleinserienfertigung. Ihre Arbeitsschwerpunkte im Projekt lagen damit auf der praxisnahen Entwicklung von Konzepten einer schlanken Produktionsplanung für die Automobil- bzw. Zulieferindustrie und der Überführung der Konzepte in die Demonstratoren.

Die Technologiepartner des Forschungsprojektes unterstützten das Forschungsvorhaben in den Bereichen der Software- und Hardwareentwicklung. Sie sind in ihren Bereichen innovative Ideengeber. Vor allem durch **SICK** wurden die erforderlichen hardwarenahen Kompetenzen abgedeckt. Als Technologie- und Marktführer bietet SICK mit seinen Sensoren und Applikationslösungen für industrielle Anwendungen die Basis für die Entwicklung und Anfertigung intelligenter Sensoriklösungen. Zugleich war SICK industrieller Treiber des Querschnittsthemas „Intelligente Sensorik“ im AUTONOMIK-Programm.

Auch bei der Entwicklung der benötigten Software mit ihren neuartigen dezentralen Ansätzen trugen die Technologiepartner mit ihrer Erfahrung aus vergangenen Projekten und Forschungsarbeiten bei. So unterstützte **LinogistiX/Logata** maßgeblich die Konzept- und Softwareentwicklung dezentraler Logistik- und Produktionssteuerungssysteme. Zudem agierte sie als Cloud-Lösungsanbieter für logistische Anwendungen im Rahmen des Querschnittsthemas ‚Cloud Technologien‘. **F/L/S**, ein Tochterunternehmen der PSI AG, stellte durch ihre umfassende Expertise im Bereich von Software- und Systemlösungen gerade auch in der Automobilindustrie die Entwicklung praktikabler und branchenspezifischer Lösungen sicher. Gerade durch die Erweiterung der hauseigenen Qualicision®-Lösung bietet F/L/S neue Lösungen für automatisierte Entscheidungen zur Optimierung der Verfahrensabläufe in Echtzeit für die Automobilindustrie und damit für SMART FACE an.

Die Forschungspartner unterstützten vordergründig die methodische Arbeit des Projekts. Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik in Dortmund, **Fraunhofer IML**, integrierte ihre Expertise als Vorreiter von dezentralen Materialflusststeuerungen, fahrerlosen Transportsystemen und des Entwurfs von Sensoreinheiten und CPS. Zudem brachte es ihre Kompetenz im Bereich von logistischen Assistenzsystemen zur Entscheidungsunterstützung, von Simulationstoolsuites für Supplynetwork-Fragestellungen sowie umfangreiches Know-how der Automobilindustrie in das Projekt ein. Die Technische Universität Dortmund wurde interdisziplinär durch die Lehrstühle Graphische Systeme und Eingebettete Systeme der Fakultät Informatik vertreten. Die **TU Dortmund** befasste sich mit der methodischen Grundlagenforschung des Visual Computing und adressierte somit die Problematik einer benutzergerechten Datenaufbereitung. Sie lieferte zudem Methoden und Werkzeuge für die Automatisierung bzw. die Entwicklung von Eingebetteten Systemen. Durch die TU Dortmund wurde sichergestellt, dass moderne wissenschaftliche Methoden und Algorithmen für eine schlanke Produktionsplanung in das Projekt eingebracht werden.

Die Kompetenzen des Konsortiums ermöglichten eine gezielte Bearbeitung der aufgezeigten Fragestellungen des Projekts und durch die interdisziplinäre Gemeinschaftsarbeit in Forschung und Entwicklung den Aufbau praxistauglicher Lösungen für die Planung und Steuerung innerhalb der Kleinserienfertigung.

## 2.2. Arbeitsteilung und Projektmanagement

Abbildung 3 veranschaulicht die Zusammenarbeit der Konsortialpartner in den einzelnen Arbeitspaketen. Die Größe des Kreises deutet grob den personellen Aufwand an, eine rote Füllung steht dabei für die Leitung des entsprechenden Arbeitspakets.

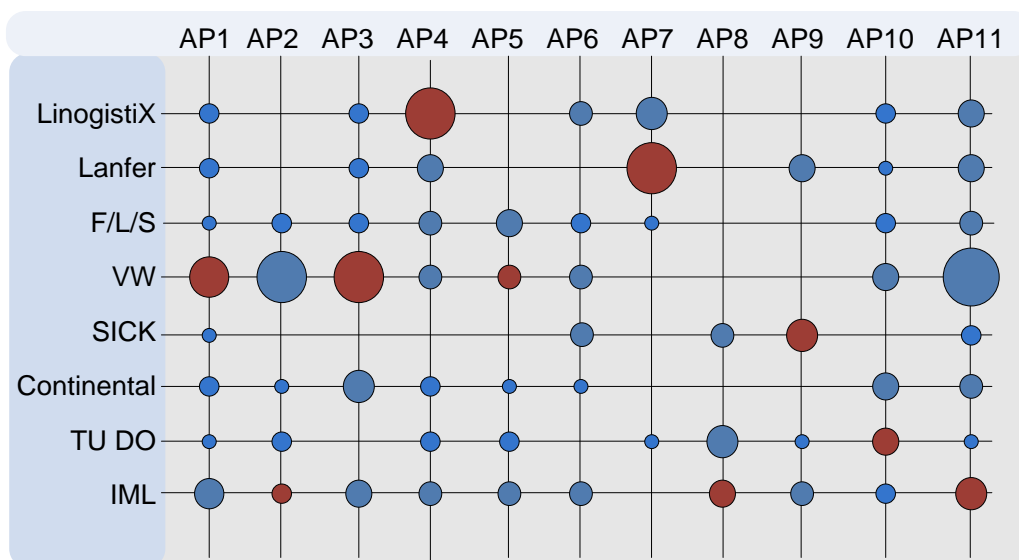


Abbildung 3: Zusammenarbeit in den Arbeitspaketen

Die SICK AG war an den Arbeitspaketen 1, 6, 8, 9 und 11 sowie am Querschnittsarbeitspaket (QAP) 1 beteiligt. Das Arbeitspaket 9 ‚Sensorik und Aktorik‘ und das QAP 1 ‚intelligente Sensorik‘ wurden zudem von der SICK AG geleitet.



Die in der Vorhabensbeschreibung spezifizierte Struktur der Arbeiten wurde umgesetzt und im Projektmanagement etabliert. Im Hauptprojekt SMART FACE sind daher vier **Arbeitsgruppen** entstanden:

- AG 1: Feedback Industrie – AP1, AP10, AP11
- AG 2: Konzepte – AP2, AP3, AP4
- AG 3: Cyber – AP5, AP6, AP7
- AG 4: Physical – AP8, AP9

Primärziel der AG 1 war es, die Anforderungen und Restriktionen aus der betrieblichen Praxis in den Projektarbeiten vollständig zu berücksichtigen und damit praxisnahe Ergebnisse zu gewinnen, die final in die Demonstratoren überführt wurden. Der konzeptionelle Kern des Projekts war in der AG 2 verankert. Durch die Arbeiten in dieser Arbeitsgruppe wurde sichergestellt, dass die in der Zielsetzung spezifizierten Anforderungen ganzheitlich in Konzepten für die Produktionsplanung, Produktionssteuerung und damit einhergehenden Betriebskonzepten umgesetzt werden. In der AG 3 erfolgte die Entwicklung ausgewählter Softwarekomponenten, die zur Realisierung der in der Konzeptphase entwickelten Lösungen notwendig waren. Durch die AG 4 wurden die physikalischen Voraussetzungen geschaffen, um die Virtualisierung der Materialströme zu ermöglichen. So wurde die Verfügbarkeit der notwendigen Informationen durch die Auswahl bzw. Entwicklung von „smarten“ Sensoren und Aktoren garantiert.

Abbildung 4 veranschaulicht die im Projekt etablierte Struktur der Arbeiten. Das Organigramm berücksichtigt die vorangestellte Struktur der Arbeitsgruppen und die Arbeitspakete, die den Arbeitsgruppen zugeordnet waren. Auch die jeweilige Verantwortung für die Leitung der Arbeitsgruppen und Arbeitspakete ist dem Diagramm zu entnehmen. Die Projektkoordination oblag dem Konsortialführer Logata Digital Solutions. Sie wurde unterstützt durch die Forschungspartner TU Dortmund und Fraunhofer IML. Zusammen wurden alle mit dem Projektmanagement verbundenen Teilaufgaben, wie das Fortschrittscontrolling, ausgeübt. Die Positionen der jeweiligen AG-Koordinatoren und AP-Verantwortlichen wurden der fachlichen Ausrichtung der Arbeitsgruppen bzw. Arbeitspakete entsprechend besetzt. Für die Querschnittsfunktion „Öffentlichkeitsarbeit“ wurde ein separates Aufgabenfeld gebildet, das durch eine Mitarbeiterin des Konsortialführers hauptverantwortlich betreut wurde. In diesem Zusammenhang sei auf die Projekthomepage (<http://www.smartfactoryplanning.de>) verwiesen.

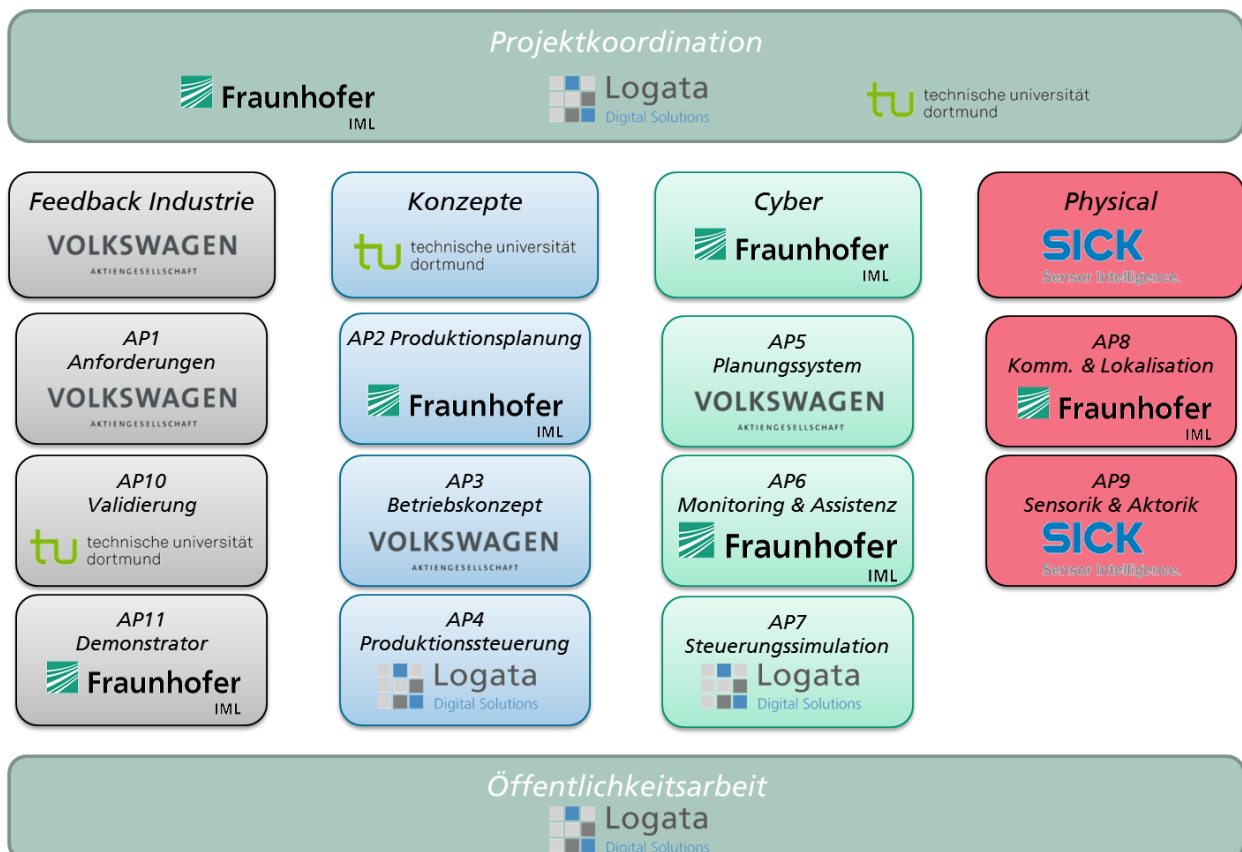


Abbildung 4: Organigramm zum Verbundprojekt SMART FACE

Die UAP-Leiter, AP-Leiter bzw. AG-Koordinatoren koordinierten partnerübergreifend die Arbeiten innerhalb ihrer Arbeitsfelder entsprechend zuvor erstellter Arbeitspläne und stellten die Einhaltung der mit den Teilaufgaben verbundenen Start- und Endtermine sicher. In den einzelnen Arbeitspaketen wurden die Fortschritte durch jeweils monatlich zu aktualisierende Statusberichte dokumentiert. Die AG-Koordinatoren steuerten und überwachten die Fortschritte in den Arbeitspaketen der Arbeitsgruppen und kommunizierten diese Fortschritte sowie Planänderungen gegenüber der Projektkoordination.

Durch die Projektkoordination wurde eine umfassende Strukturübersicht über alle AP und UAP erarbeitet. Durch die Verknüpfung mit den AP-/UAP-spezifischen Start- und Endterminen wurde ein umfassendes Gantt-Chart abgeleitet, das gerade auch die zeitlichen Abhängigkeiten der vielfältigen Arbeitseinheiten im Zusammenhang veranschaulicht. Zusätzlich wurde eine „Kooperationsmatrix“ erstellt, in der neben den zeitlichen Abhängigkeiten die inhaltlichen Abhängigkeiten zwischen den AP und UAP im Detail aufbereitet worden sind.

Neben den AP/UAP-bezogenen Arbeitstreffen wurden solche regelmäßige Treffen in SMART FACE verankert, an denen das gesamte Konsortium teilnimmt. Dabei handelte es sich entweder um Projekttreffen, in denen vordergründig im Dialog bzw. in Gestalt von Workshops Ergebnisse reflektiert und Folgearbeiten abgestimmt wurden oder um Konsortialtreffen, in denen primär Ergebnisse präsentiert wurden und der zeitliche Projektfortschritt gemessen an der Planung evaluiert wurde.

Für den kurzfristigeren Informationsaustausch und das permanente Update aus den einzelnen Arbeitsgruppen wurde eine regelmäßige, zweiwöchentliche Telefonkonferenz, ebenfalls von Projektbeginn an, eingeführt, an der alle Projektpartner teilnahmen.

### 2.3. Meilensteinplanung

#### M1 : Schlanke Produktionsplanung; Oktober 2014

Durch Erfüllung dieses ersten Meilensteines sind die konzeptionellen, planungsbasierten Grundlagen des schlanken Produktionssystems im Kern erarbeitet. Diese berücksichtigen die gegebenen und aus Anwendersicht auf zukünftige Szenarien skalierten Anforderungen und Restriktionen einer CPS-gestützten Produktion. Die Erkenntnisse werden in die Gestaltung eines Produktionsplanungssystems für die PKW-Kleinstserienfertigung überführt. Elementarer Bestandteil des Planungssystems sind die konzeptionierten Planungsalgorithmen für die Aufgabenfelder der Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung und auch Produktionsprozessplanung, die zum Meilenstein entsprechend konzeptioniert und validiert werden. Gewonnen wird eine umfassende, differenzierte Ausgangsbasis für die folgende Detailbetrachtung der steuerungs- bzw. technikfokussierten Projektarbeiten.

#### M2 : CPS-gestützte dezentrale Steuerung; Oktober 2015

Zentrales Ergebnis dieses zweiten Projektmeilensteines ist ein Steuerungskonzept für eine dezentral organisierte Produktion auf Basis eines Multi-Agentensystems. Die Steuerung folgt dem Internet-der-Dinge-Prinzip, das sich dadurch auszeichnet, dass die zu verarbeitenden bzw. verarbeiteten Komponenten autonom ihren Weg durch Fertigung und Montage finden. Es liegt eine Steuerungslösung vor, die die Informationen der verteilten, smarten Sensoren zu einem ganzheitlichen Informationsmodell verdichtet und global-optimale Handlungsoptionen ableitet. Dieser signifikante Projektfortschritt wird zeitgleich dadurch untermauert, dass ein CPS-gestütztes Betriebskonzept und ein Optimierungsverfahren zur optimalen Produktionsprozessplanung entwickelt und validiert wurden. Zu diesem Meilenstein liegt auf diese Weise ein ganzheitliches CPS-gestütztes Produktionssystem vor, das die Komponenten Planung und Steuerung detailliert integriert, die starre Abgrenzung zwischen diesen beiden Aufgabengebieten hingegen weitestgehend aufhebt.

Die SICK AG trug hier die Hauptverantwortung bezüglich der intelligenten Sensorik im Sinne der CPS-Definition.

#### M3 : Gesamtkonzept und Demonstrator; September 2016

Der finale Meilenstein entspricht dem Projektabschluss und damit der praktischen Validierung des entwickelten Produktionssystems in Form der Demonstratoren. Diese vereinen die Ergebnisse aller vorge-schalteten Arbeiten, indem sie das Zusammenspiel der entwickelten, formalen Konzepte, der software-technischen Teillösungen und der technischen Teilgewerke (Sensorik/Aktorik) final simulieren und auf

reale Anwendungsumgebungen projizieren. Die Grundlage für die Erstellung der Demonstratoren bilden sowohl die Anwendungsszenarien aus dem Automotive-Bereich als auch die am Fraunhofer IML existierenden Versuchsfelder. Zum finalen Projektergebnis, d.h. den validierten Teilergebnissen aller Arbeitspakete, zählt auch die unterstrichene Anwendungsportabilität der erzielten Lösung auf analoge, jedoch branchendivergente Herausforderungen (kundeninnovierte Produktion, non-automotive).

Die SICK AG trug hier die Hauptverantwortung bzgl. der Integration und Nutzbarmachung der Daten der intelligenten Sensorik.

### 3. Stand der Technik zu Projektbeginn

Im Folgenden werden der Stand der Wissenschaft und Technik sowie die Patentlage zu Projektbeginn bezüglich der von der SICK AG bearbeiteten Arbeitspakete dargestellt.

#### 3.1. CPS-basierte Sensor-/Aktornetzwerke

Die zunehmende Verbreitung von Cyber-Physical Systems in allen Bereichen der Industrie macht deren effiziente Vernetzung unabdingbar. Insbesondere die direkte Kommunikation zwischen Sensoren und Aktoren und die Notwendigkeit, auf diese aus Sicht der Produktion zugreifen zu können, sind interessant. Während ersteres im Rahmen von Sensor-/Aktornetzwerken möglich ist [4] [5], ist letzteres durch Service-orientierte Architekturen (SOA) umsetzbar. Einen aktuellen Überblick über „selbstorganisierende Sensor-Aktor-Netzwerke“ liefert das namensgleiche „DFGGraduiertenkolleg 1194“. Besonders gleichzeitige oder gekoppelte Informationsverarbeitung heterogener (intelligenter) Sensoren (Multi-Sensing und Sensorfusion) ist ein Feld aktueller Forschung [6], insbesondere unter Verwendung effizienter paralleler Verarbeitungseinheiten [7]. Einen Überblick über aktuelle Entwicklungen liefern die Journals „IEEE Sensor Journal“ und „ACM International Journal of Sensor Networks“. Die effiziente Kommunikation Cyber-Physischer Sensor-/Aktornetzwerke bildet eine der Schlüsselkomponenten für Dezentralisierung, durchgängiges Monitoring und Maschinendesign in SMART FACE.

#### 3.2. Monitoring, Modellierung, Simulation

Die Modellierung und Simulationen ingenieurwissenschaftlicher und logistischer Prozesse oder Systeme durch mathematische Modelle sind aktueller Gegenstand der Forschung [8] [9]. Für einen Überblick sei u.a. auf die Zeitschriften „Simulation Modelling Practice and Theory“ oder „Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering“ verwiesen. Basierend auf den Modellen erfolgen Simulationen unter Verwendung deduktiver Methoden, axiomatischer Algorithmen oder heuristischer Verfahren. Modellierung und Simulation erfolgen vielfach in Kombination mit Layoutplanungshilfen [10] unter Verwendung exakter oder heuristischer Verfahren. Bei der Optimierung der Modellierungs- und Simulationsparameter (Paretooptimierung) [11] stehen Methoden wie genetische/ evolutionäre Suchverfahren, Diskretisierung des Parameterraumes, mutationsbasierte Verfahren, Metamodellansätze, vollständige Suche (Gittersuche) und auch ableitungsfreie Suchverfahren zur Verfügung. Zum Monitoring entsprechender Simulationen kommen automatische Methoden und multimediale Assistenz- und Visualisierungssysteme zum Tragen [12]. Etablierte Bewertungskonzepte beruhen auf Absolutwert- und Trendkontrolle, Signalvorhersage, Abstandsklassifikation oder wissensbasierter Überwachung. Hybride Systeme verwenden sowohl regelbasierte Methoden als auch neuronale Netze/ selbstorganisierende Karten [13], vielfach unterstützt durch Datenvorselektion und Anwendung genetischer Algorithmen zur Selektion optimaler Eingabeparameter [14] zur Gewährleistung einer intuitiven Mensch-System-Kooperation. Im Rahmen des Vorhabens müssen Methoden für Monitoring, Modellierung und Simulation entwickelt bzw. ausgewählt sowie weiterentwickelt werden, um eine ganzheitliche Systemintegration in SMART FACE durchzuführen.

#### 3.3. Patentlage

Im Folgenden werden die relevanten Patente in Bezug auf intelligente Sensorik und Sensornetzwerke benannt.

Das automatische Erfassen, Sammeln und vereinheitlichte Weiterleiten von Daten erscheint wg. fehlender erfinderischer Höhe als nicht relevant für nähere Betrachtungen der Schutzrechtssituation.

##### 3.3.1. Patente im Bereich intelligente Sensorik und Sensornetzwerke

###### **EP1780516** - *Verfahren zum Aufbau eines Sensornetzwerkes*

Das Patent deckt ein zentral verwaltetes Sensornetzwerk und dessen ausfallsichere Konstruktion ab, bei dem mehrere Sensorknoten Daten an einen zentralen Rechner senden. The method involves connecting sensor nodes to one another to transmit sensor data to a central receiving node. Time information

is stored in each sensor node from other neighboring sensor nodes lying in the reception area of each sensor node, on the basis of which each sensor node connects to other sensor nodes. Initial information in a new sensor node is formed using sensor node operation initiating information from a mobile installation device, which is transmitted into the new sensor node during installation of the new node.

**KR20110009345A** - *Telecommunication and sensor data collection method for context-ware decision on smart sensor networks*

*Zusammenfassung:* An information gathering method for the situation recognition in a smart sensor network is provided to offer various situation recognition algorithms using various sensors. A sensor module collects sensor information. An information collection module processes the collected information through the sensor module and wired or wireless communication. An information processing module collects and decides an event. A gateway module transfers the processed information through an external network. An event processor processes urgent event information of a sleeve node. A polling manager processes the report information of the slab node which is not the urgent event information.

**US2010080175A** – *Web based smart sensor network tracking and monitoring system*

*Zusammenfassung:* A wireless sensor network including a plurality of Smart Sensors coupled to a wide area network such as the Internet via a Wireless Sensor Coordinator. Each wireless sensor network comprises a plurality of Smart Sensors, each operable to measure one or more physical quantities. Each wireless sensor communicates the measured data to a Wireless Sensor Coordinator which then stores the collected data in memory. The Wireless Sensor Coordinator further includes a web server operable to post a web site on a network that is accessible by a common web browser. Upon receiving a request for sensed data via the web site, the Wireless Sensor Coordinator retrieves the appropriate measured and stored data and converts it into HTML format pages which are then posted on the web site for review by the requestor.

### 3.3.2. Patente im Bereich Cyber-Physical Systems

**CN102104522A** - *Real-time communication optimizing method and equipment orienting to cyber-physical system*

*Zusammenfassung:* The invention relates to a real-time communication optimizing method and equipment orienting to a cyber-physical system. The method comprises the following steps of: reading a beacon frame and entering a CAP (Contention Access Period); judging whether the CAP of a superframe is finished or not; judging whether a node equipment cache region has data ready to transmit or not; setting frame priority; when no data needs to be transmitted in the cache region, turning to the idle mode; after the CAP is finished, entering a CFP (Contention Free Period) of the superframe; switching the node equipment into GTS (Guarantee Time Slot) allocation with collision avoidance; judging whether data transmission is successful or not; leading a node to enter a dormancy period and wait for the next superframe; and transmitting alarm information to a coordinator by the node and informing a message of transmission failure. The equipment comprises a frame priority setting module and a collision avoidance allocating module. The invention improves the expression performance of a GTS mechanism again by solving the problem of collision, finally improves the utilization ratio of GTS and meets the application with higher real-time requirement.

**KR20120067815A** - *Cyber sensor apparatus and method for a cyber-physical system capable of executing a sensing function by generating cyber sensing values regardless of the non-operational state of a part of physical sensors*

*Zusammenfassung:* Cyber sensor apparatus and method for a cyber-physical system are provided to execute an amending process by executing a sensing function based on the generation of cyber sensing values and verifying the accuracy of the cyber sensing values. CONSTITUTION: At least one data analyzing part(160) executes a filtering operation in order to improve the reliability of physical sensing data of at least one physical sensors(10, 20, 30). A state recognizing part(140) generates cyber sensing values based on the filtered physical sensing data. A recognition evaluating part(150) verifies the accuracy of the generated cyber sensing values.

## 4. Eingehende Darstellung

### 4.1. Technische Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte rekapitulieren die Problemstellung, die Lösungsansätze und die Ziele der Arbeitspakete mit SICK-Beteiligung und erläutern die geleisteten Arbeiten. Der letzte Abschnitt fasst die technischen Ergebnisse zusammen.

#### 4.1.1. AP 1 – Identifikation und Anforderungsanalyse

##### Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel gemäß Vorhabensbeschreibung

Die Arbeiten innerhalb dieses initialen Arbeitspaketes beeinflussen entscheidend den praxisorientierten Fokus und Verlauf des Projektes. Dazu werden die Betriebskonzepte, Strukturen und Rahmenbedingungen von repräsentativen Referenzsystemen der PKW-Kleinstserienfertigung analysiert und strukturiert. Die gewonnenen Ergebnisse dieser Ist-Analyse werden verdichtet, auf zukünftige operative Szenarien adaptiert und in ein skalierbares Prozessmodell überführt, das den formalen Rahmen für die zu entwickelnden Konzepte und Methoden bildet. Durch die direkte Kommunikation mit Produzenten und Dienstleistern wird gewährleistet, dass insbesondere auch die praktischen, künftigen Bedarfe und Anforderungen an die PPS berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden in ein differenziertes Anforderungsprofil an das zu entwickelnde Produktionssystem überführt.

##### Arbeiten

Innerhalb dieses Arbeitspakets wurden die grundlegenden Zielvorgaben für das Vorhaben durch das Konsortium erarbeitet und definiert. Hierbei konnte identifiziert werden, dass Montageprozesse ein großes Flexibilisierungspotenzial aufgrund geringer Automatisierungsgrade und uniformer Gestaltung der Montagestationen bieten. Resultierend wurden die Endmontage sowie einige Vormontagen der Automobilfertigung als geeigneten Use-Case spezifiziert. Über die Arbeiten konnte dabei erstmalig ein sogenannter Vorranggraph für die Montage abgeleitet werden, der eine Detektion von Flexibilisierungspotenzialen bezüglich der Reihenfolgen erlaubt.

Die SICK AG hat die Definition des Referenzprozesses und die Spezifikation des Use Cases aus sich eines Sensorherstellers unterstützt und begleitet. Der Einsatz von Sensorik wurde anhand des Referenzprozesses der PKW-Serienfertigung analysiert. Die durch Sensorik erfassten Messgrößen und deren Relevanz für den reibungslosen Ablauf des Prozesses wurden diskutiert und festgelegt.

#### 4.1.2. AP 6 – Monitoring und Assistenzsystem

##### Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel gemäß Vorhabensbeschreibung

In diesem AP wird ein Konzept zur Klassifizierung von kritischen Zuständen in Produktionsprozessen entwickelt. Darauf aufbauend werden funktionale Methoden zum Monitoring von sensorischen und aktuatorischen Zuständen erarbeitet. Abschließendes Ziel ist die Entwicklung eines Assistenzsystems, welches relevante Prozessinformationen verbindet und somit eine schlanke Produktionsprogrammplanung sowie ein intuitives Monitoring-Tool ermöglicht.

##### Arbeiten

Das AP 6 repräsentiert eine zentrale Schnittstelle zwischen den technischen und konzeptionellen Gewerken sowie dem Anwender. Daher wurden umfangreiche Assistenz- und Visualisierungssysteme erarbeitet, die zur direkten Nutzung vorgesehen sind, aber auch als Basis zur Evaluierung dienen. Auf der Ebene der Assistenz von Produktions- und Montagesystemen – diese wurden innerhalb des Projektes durch den Minidemonstrator und Maxidemonstrator als auch den Simulationsdemonstrator repräsentiert – war es das Bestreben, eine Augmentierung der Prozesse vorzunehmen.

Neben diesen direkten Daten waren Meta-Informationen, z.B. relevant für die autonome Handlungsfähigkeit der Fahrzeugagenten (bspw. Kollisionsboxen, Sensitivitätsbereiche), in die Betrachtungsebene zu integrieren. Erarbeitet wurden zwei- und dreidimensionale Visualisierungskonzepte mit unterschiedlichen Interaktionskonzepten.

Da Interaktionsschnittstellen auch (teilweise) einen direkten Einfluss auf aktorische Komponenten haben, war die Sicherung der Informationsgenauigkeit zu beachten. Diese wird durch die örtliche und zeitliche Diskretisierung bestimmt. Es zeigten sich dabei die erwarteten Abhängigkeiten von den Arbeitspaketen 8 „Kommunikation und Lokalisation“ und 9 „Sensorik und Aktorik“. Im Einklang mit den Arbeiten zum Arbeitspaket 9 „Sensorik und Aktorik“ wurde sowohl eine ROS-basierte Verteilung und Behandlung von Ereignissen nach dem Prinzip einer Service-orientierten Architektur (SOA) durchgeführt als auch die Visualisierungskonzepte innerhalb von ROS genutzt.

SICK hat hier die TU Dortmund bei der Visualisierung der Fahrzeugpositionen im Minidemonstrator unterstützt. Dafür wurde die durch konturbasierte Eigenlokalisierungslösung auf Basis der TIM5xx Laserscanner, die auf jedem Fahrzeug des Minidemonstrators montiert sind, in geeigneter Form zur Verfügung gestellt. Details dazu sind in den Abschnitten 0, 0 und 0 zu finden.

#### 4.1.3. AP 8 – Kommunikation und Lokalisation

##### Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel gemäß Vorhabensbeschreibung

Eine durchgängige Kommunikationsstruktur bildet die Grundlage zur Schaffung eines Cyber-physischen Systems, da nur so Informationen zwischen den einzelnen Teilnehmern des Systems ausgetauscht werden können. In diesem Arbeitspaket soll daher eine Kommunikations-Middleware über die verschiedenen Ebenen des Produktionssystems als Service-Orientierte Architektur konzipiert und umgesetzt werden. Die Produktionsanlagen stellen dabei Dienste zur Fertigung einer Vielzahl von Produkten bzw. eines variantenreichen Produktes der angebundene Produktionsplanung (AP2 und AP5) sowie der dezentralen Produktionssteuerung (AP4) zur Verfügung. Die Dienste beinhalten u.a. die Bereitstellung einer Selbstbeschreibung der Teilnehmer, die eine Selbstkonfiguration von Transporteinheiten und Produktionsanlagen und letztendlich eine Selbstorganisation des Cyber-Physischen Produktionssystems ermöglicht. Sie stellen Status- oder Lokalisierungsinformationen systemweit zur Verfügung, u.a. für das in AP6 umzusetzende Monitoring- und Assistenzsystem. Diese Kommunikationsstruktur soll mit den anderen Projektpartnern, insbesondere mit dem Fraunhofer IML und der TU Dortmund, entworfen und umgesetzt werden.

Innerhalb dieser *Cyber-Physical*-Produktionsumgebung müssen Betriebsmittel und Transportfahrzeuge lokalisiert werden, um eine zuverlässige und vorausschauende Produktionsplanung gewährleisten zu können. Weiterer Bestandteil dieses Arbeitspakets ist daher die Zusammenführung der verschiedenen Lokalisationstechnologien, wie z.B. RFID- und Funkortung, Fahrzeuglokalisierung über optische Sensoren und Inertialsensorik, um eine durchgehende Positionsbestimmung der einzelnen Teilnehmer innerhalb der Umgebung zu ermöglichen.

##### Arbeiten

Die Arbeiten zum Arbeitspaket 8 „Kommunikation und Lokalisation“ beinhalteten zum einen den Entwurf und die Realisierung einer echtzeitfähigen Kommunikationsinfrastruktur für die Fahrzeuge des Minidemonstrators unter Verwendung von ROS. SICK unterstützte hierbei das Fraunhofer IML insbesondere bei der Definition der Kommunikationsschnittstelle zur Sensorik.

Zum anderen umfasste es die Arbeiten zur sensorgestützten Lokalisierung der Fahrzeuge. Im Zusammenhang mit der Lokalisierung wurde auch ein reaktives Verhalten auf sich verändernde Umgebungssituation erarbeitet. Dies sollte zwischen statischen und dynamischen Hindernissen differenzieren, da es eine direkte Beeinflussung der Bewegungsplanung bedingt. Als Lösungskern wurde eine dezentrale Planung auf Basis eines Multi-Agenten-Systems erarbeitet. SICK implementierte hier die Algorithmik zur robusten sensorbasierten Fahrzeuglokalisierung auf Basis der (überwiegend) statischen Umgebungs-kontur. Diese Algorithmik wurde im Verlauf des Projekts einerseits auf einen SICK TIM5xx Laserscanner portiert und adaptiert, der im Minidemonstrator zum Einsatz kam, andererseits auf einen SICK S33 Sicherheitslaserscanner portiert und adaptiert, die zweifach auf den Förderfahrzeugen des Fraunhofer IML zu finden sind. Die implementierte Algorithmik basiert auf dem Verfahren der Monte-Carlo-Lokalisierung (MCL), dessen Funktionsweise im Folgenden genauer erläutert wird.

Die MCL ist ein in sehr vielen Anwendungen eingesetztes Verfahren zur lokalen Lokalisierung, die oft auch als Positionsverfolgung beschrieben wird. Als Grundlage wird eine zweidimensionale Karte der

Umgebung und eine initiale Fahrzeugpose, bestehend aus der kartesischen Position und der Orientierung des Fahrzeuges benötigt. Zum Erstellen der digitalen Karte der Umgebung wird ein SLAM-Algorithmus (*Simultaneous Localization and Mapping*) eingesetzt. Das SLAM-Verfahren erlaubt es ohne vorherige Kenntnis der Position oder der Umgebung beides zeitgleich zu bestimmen. Dabei wird die Startpose des Fahrzeuges als Kartenursprung gewählt. Mittels eines *Scan-Matching*-Verfahrens kann nun die Transformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen ermittelt werden und somit auf die Fahrzeugbewegung geschlossen werden.

Der sich akkumulierende Fehler der einzelnen Bewegungsschätzungen des Fahrzeuges kann durch sogenannte *Loop Closures* korrigiert werden. Dafür kehrt man beim Aufzeichnen der Messdaten zu vormals besuchten Positionen zurück, um mittels der Transformation zwischen diesen beiden Messwerten den aufsummierten Drift zu korrigieren. Die für die MCL benötigte a priori Fahrzeugpose wird zu Beginn als initiale Pose festgelegt und kann in den folgenden Lokalisierungsschritten aus dem jeweils letzten Lokalisierungsergebnis übernommen werden und als Ausgangswert für den Algorithmus verwendet werden.

Gegenüber anderen Methoden zeichnet sich die MCL insbesondere durch einen geringeren Rechenzeit- und Speicherbedarf, die grundsätzliche Möglichkeit einer globalen Lokalisierung und die Fähigkeit, eine falsch ermittelte Position selbstständig zu korrigieren, aus. Der Ansatz der MCL basiert auf dem Partikelfilter-Algorithmus, dessen Grundidee die Beschreibung einer Wahrscheinlichkeitsdichte für die Fahrzeugpose mittels eines Satzes von Partikeln ist. Jedes Partikel repräsentiert dabei eine mögliche Pose des Fahrzeuges in seiner Umgebung. Zusätzlich wird für jedes Partikel eine Gewichtung mitgeführt, welches eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Pose widerspiegelt. Die sich aus den Posen und den zugehörigen Gewichten aller Partikel ergebende Verteilung stellt die Wahrscheinlichkeitsdichte für die Fahrzeugpose dar.

Die implementierte MCL Algorithmik lässt sich in eine Initialisierung, gefolgt von drei sich wiederholende Phasen (Update, Resampling und Prediction) unterteilen, wie in der folgenden Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Phasen der MCL-Lokalisierung

In der **Initialisierungsphase** wird eine festgelegte Anzahl an Partikeln in der Umgebungskarte verteilt. Im Falle einer globalen Lokalisierung, bei der die initiale Pose des Fahrzeuges nicht bekannt ist, werden die Partikel gleichmäßig in den freien Bereichen der Karte verteilt. Sofern eine initiale Schätzung der Fahrzeugpose vorgegeben ist, werden die Partikel gemäß einer Wahrscheinlichkeitsdichte um diese Pose herum verteilt.

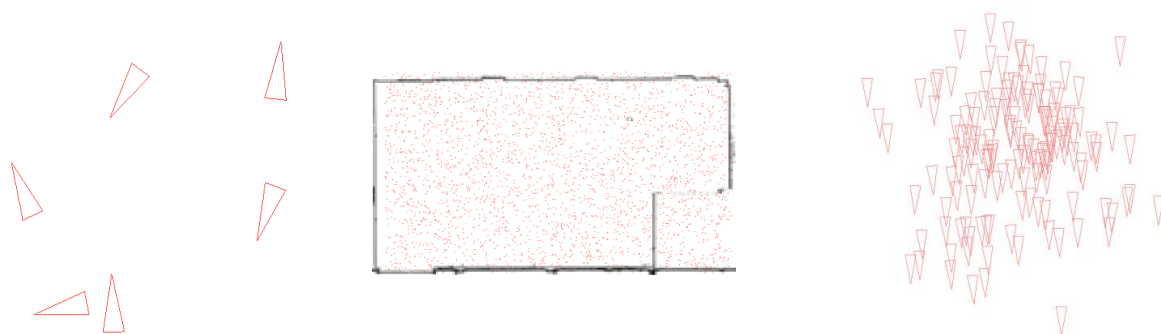


Abbildung 6: gerichtete Partikel (links), Partikelverteilung für eine globale Lokalisierung (Mitte), Partikelverteilung bei vorgegebener Fahrzeugpose (rechts)



In der **Updatephase** werden nun die Gewichtungen der Partikel aktualisiert. Unter Verwendung des Likelihood-Field-Modells werden die Korrelationen der Messdaten des verwendeten Sensors, ausgehend von jeder der verteilten Partikelposen, zu der Umgebungskarte bestimmt. Die so ermittelten Korrelationen werden anschließend normiert und als Gewicht des jeweiligen Partikels gespeichert. Durch das Normieren wird sichergestellt, dass die Summe aller Partikelgewichte kontinuierlich eins ergibt.

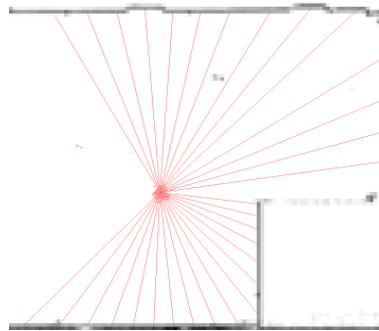


Abbildung 7: Updatephase der MCL-Lokalisierung - Abgleich von Messdaten zu Umgebungskarte

In der anschließenden **Resamplingphase** wird eine festgelegte Anzahl an Partikeln in einem Zufallsprinzip aussortiert und durch neu gewählte ersetzt. Dabei werden Partikel mit einem geringeren Gewicht mit einer höheren Wahrscheinlichkeit verworfen als Partikel mit höheren Gewichten. Analog werden die Posen neu aufgenommener Partikel in der Nähe von Partikeln mit hohem Gewicht, aber auch auf Basis eines Zufallsprinzips, gewählt.

In der abschließenden **Predictionphase** werden die Posen aller Partikel entsprechend einer fehlerbehafteten Messung oder auch Abschätzung der Fahrzeugbewegung, beispielsweise durch einen Scan Matcher, der die Bewegung zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden Scans schätzt, fortgeschrieben.

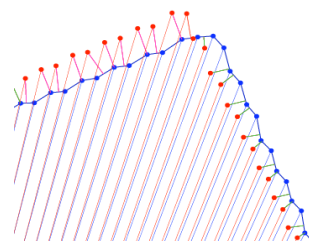


Abbildung 8: Scan Matcher als Abschätzung der Fahrzeugbewegung

Experimentell wurde auch der Austausch von Informationen über die (lokale) Umgebungskarte zwischen den Fahrzeugen studiert. Dieser Austausch ermöglicht eine problemlose und präzise Lokalisierung auch in Bereichen, die vorher nur von anderen Fahrzeugen durchfahren wurden.

#### 4.1.4. AP 9 – Sensorik und Aktorik

##### Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel gemäß Vorhabensbeschreibung

In diesem Arbeitspaket sollen zunächst in enger Zusammenarbeit mit den AP4 und AP8 eine Anforderungsanalyse für Sensoren und Aktoren in *Cyber-Physical-Produktionsumgebungen* erstellt und ein entsprechendes Designkonzept entwickelt werden. Diese neu zu entwickelnde *Cyber-Physical-Unit* soll einerseits einfach in bestehende Produktionsstrukturen integrierbar sein (*Retrofit-Lösung*), andererseits in neuen, nach dem CPS-Paradigma geplante Umgebungen, einsetzbar sein. Die Unit erlaubt die global verteilte Echtzeitsteuerung und -regelung der Produktion (umgesetzt in AP4) durch die parallele Erfassung und Verarbeitung der physikalischen Daten der Umgebung (*Physical Awareness*) auf globaler Ebene, nach einer Lageinterpretation auf der Cyber-Ebene ermöglicht sie den Produktionsanlagen und Materialflusssystemen Entscheidungen zu treffen, um auf Änderungen in Arbeits- oder Logistikprozessen durch entsprechende lokale Verhaltensänderungen (z. B. Wechsel des Greifersystems, Austausch des Lastaufnahmemittels) zu reagieren oder sich durch Interpretation des globalen Informationsmodells auf unvorhergesehene Ereignisse (z.B. Ausfall eines Montagesystems, Lieferengpass bei Bauteilen) reagieren zu können.

## Arbeiten

Der im QAP1 ‚Intelligente Sensorik‘ konzipierten Fragebogen zur Anforderungsanalyse hinsichtlich der im Projekt erforderlichen Sensorik (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde auch für die Anforderungsanalyse im Projekt SMART FACE genutzt. Die identifizierten allgemeinen Anforderungen an CPS-Sensorik wurden für SMART FACE konkretisiert und bei der Weiterentwicklung von intelligenter Sensorik berücksichtigt. Insbesondere die Multifunktionalität der On-board-Sensorik hinsichtlich allgemeiner Umgebungserfassung, Person- und Kollisionsschutz sowie die Eigenlokalisierung ist bei SMART FACE von großer Bedeutung.

### Weiterentwicklung des SICK TiM5xx Laserscanners

Der von SICK im AP 8 entwickelte Ansatz zur konturbasierten Lokalisierung (siehe 0) wurde für den SICK TiM5xx Laserscanner (siehe Abbildung 9) adaptiert, da dieser aufgrund seiner Performance bei gleichzeitig geringen Abmessungen auf den Fahrzeugen des Minidemonstrators (siehe 0) zum Einsatz kam.



Abbildung 9: SICK TiM5xx Laserscanner

Um die Berechnung der Lokalisierungslösung nach erfolgreichen Tests mit externer Recheneinheit im Sensor selbst und ohne eine solche externe Recheneinheit durchführen zu können, wurde die Algorithmik aus dem SICK Forschungsframework in das SICK Produktframework portiert und die Parameter der Lokalisierungslösung wurden an die begrenzte Rechenleistung des Sensors angepasst. Zur Verifikation des einwandfreien Betriebs wurde eine JavaScript-basierte grafische Nutzerschnittstelle (graphical user interface, GUI) implementiert, um die Ergebnisse der Lokalisierung der Fahrzeuge browserbasiert zu visualisieren.

### Weiterentwicklung des SICK S300 Sicherheitslaserscanners

Generell kommen zum Personenschutz auf Cyber-Physical Units Sicherheitslaserscanner wie bspw. der SICK S300 oder S3000 (siehe Abbildung 10) zum Einsatz, die das Umfeld überwachen und bei Verletzung von definierten Schutzfeldern das Fahrzeug abbremsen oder ganz zum Stillstand bringen, um Unfälle zu verhindern.



Abbildung 10: SICK S300 und S3000 Sicherheitslaserscanner

So besitzen auch die am Fraunhofer IML eingesetzten fahrerlosen Transportfahrzeuge zwei SICK Sicherheitslaserscanner (SICK S300), je einen an der Front und am Heck des Fahrzeugs. Damit wird eine nahezu vollständige Rundumsicht um das Fahrzeug auf Fahrzeugebene erreicht. Ziel in SMART FACE war es, diese vorhandene Sensorik so weiterzuentwickeln, dass sie nicht nur weiterhin die Sicherheitsfunktion erfüllen, sondern die Scandaten auch für die entwickelte konturbasierte Lokalisierung zu nutzen.

Da die sensorinterne Rechenleistung nur bedingt geeignet war für den relativen hohen Rechenaufwand der konturbasierten Lokalisierung musste hier auf eine externe Recheneinheit zurückgegriffen werden. Hierfür eignete sich aufgrund der geringen Abmessungen eine DFI EC700-BT (siehe Abbildung 11). Die in AP 8 implementierte Lokalisierungsalgorithmik wurde auf diese Hardwarekombination aus Sicherheitslaserscanner und externer Recheneinheit portiert und getestet.



Abbildung 11: DFI EC700-BT als Recheneinheit für die konturbasierte Lokalisierung mit den Messdaten von SICK Sicherheitslaserscannern

Aus der niedrigen Anbauhöhe der Sicherheitssensoren ergibt sich für die konturbasierte Lokalisierung die Herausforderung einer veränderlichen Umgebung. Abhängig von der Einsatzumgebung sind viele Objekte, die von den Sicherheitssensoren erkannt werden, nicht ortsfest, sondern bewegen sich während des Betriebs der CPUs. Dadurch werden die in der Umgebungskarte bekannten Strukturen, teilweise für große Winkelbereiche, in den Messwerten verdeckt. Für den von SICK in AP 8 entwickelten Ansatz zur konturbasierten Lokalisierung führen diese Verdeckungen zu einer erhöhten Unsicherheit der ausgegebenen Fahrzeugpose, da die tatsächlichen Messwerte der Sicherheitssensoren nicht mehr in einem ausreichenden Maße zur initial erstellten Umgebungskarte passen. In hochdynamischen Situationen kommt es zu einer Divergenz zwischen dem Lokalisierungsergebnis und der tatsächlichen Position der CPU, wie in folgender Abbildung 12 veranschaulicht.

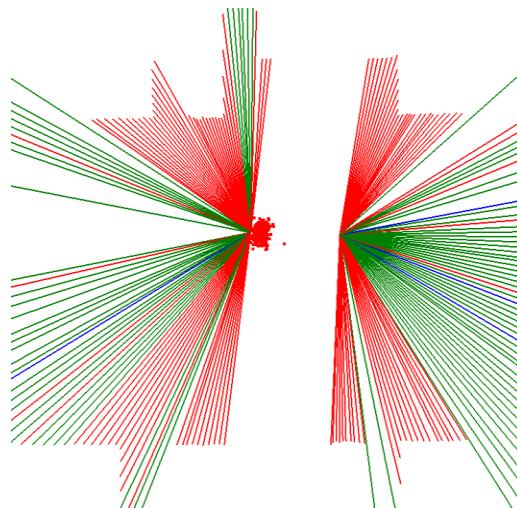


Abbildung 12: Lokalisierung in veränderlicher Umgebung – Messdaten passend zur Karte (grün), Messdaten näher als laut Umgebungskarte erwartet (grün) und weiter entfernt als laut Umgebungskarte erwartet (blau)

Zur Lösung dieser Herausforderung hat SICK einen Ansatz konzipiert und implementiert, der die Lokalisierungskarte der veränderten Umgebung anpasst:

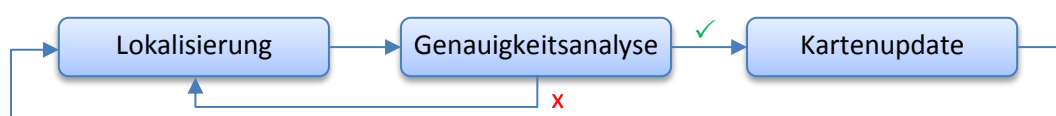


Abbildung 13: Lokalisierung mit bedingtem Kartenupdate

Der Aktualisierungsansatz wurde so angelegt, dass eine hohe Zuverlässigkeit der vorgenommenen Veränderungen in der Karte während des laufenden Betriebs gewährleistet werden kann. Dabei werden Objekte nach einer parametrierbaren Verweildauer an einer Position in die Karte aufgenommen. Zum einen wird dadurch sichergestellt, dass Messungenauigkeiten nicht zu ungewünschten Veränderungen führen. Zum anderen werden sich in Bewegung befindende Objekte von der Aktualisierung ausgeschlossen, die sich nach der Aufnahme in die Karte bereits weiter bewegt haben und somit keinen Nutzen für die Lokalisierung darstellen. Objekte, die ihre in der Karte vermerkte Position verlassen haben, werden analog aus dieser wieder entfernt und die entsprechenden Bereiche somit frei gegeben. Zusätzlich werden unveränderlich Elemente in der Umgebung als statische Objekte definiert und damit von der Aktualisierung ausgenommen. Somit wird eine dauerhaft robuste Lokalisierung, auch in der sich verändernden Umgebung auf der Anbauebene der Sicherheitssensoren erreicht.

Dieses Konzept der dynamischen Kartenupdates wurde in den Shopfloordemonstrator (siehe 0) integriert und mittels eines zusätzlichen SICK NAV350 Navigationslaserscanners hinsichtlich Positions- und Winkelgenauigkeit evaluiert. Exemplarisch zeigt Abbildung 14 die Auswertung einer etwa 33-minütigen Fahrt in der Versuchshalle, bei der das Fahrzeug einen vorgegebenen Parcours wiederholt durchfährt und die Umgebung sukzessiv durch Aufstellen von Kisten immer stärker verändert wurde.

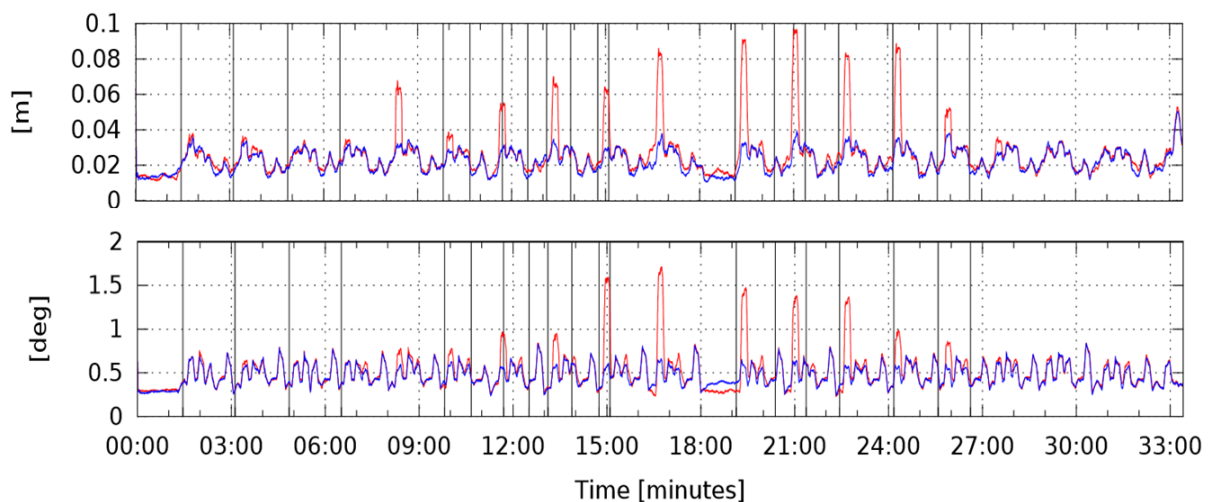


Abbildung 14: Evaluierung des Positionsfehlers (oben) und des Winkelfehlers (unten) der MC-Lokalisierung mit dynamischem Kartenupdate (blau) und ohne dynamischem Kartenupdate (rot) im Vergleich zur hochpräzisen, reflektorbasierten Referenzlokalisierungslösung mittels eines SICK NAV350 Navigationslaserscanners

Deutlich zu erkennen ist der Vorteil der dynamischen Kartenupdates hinsichtlich der Lokalisierungsgenauigkeit, sowohl in der Position als auch im Winkel.

#### 4.1.5. AP 11 – Demonstrator

##### Problemstellung, Lösungsansatz und Ziel gemäß Vorhabensbeschreibung

Um die Praxisrelevanz und -tauglichkeit der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse darzustellen und einem breiten Publikum zu demonstrieren, müssen die Ergebnisse geeignet aufbereitet werden. Dieses AP widmet sich dieser Aufgaben und setzt sich zum Ziel, die innovativen Ergebnisse demonstrierbar und „erlebbar“ zu machen.

Aufbauend auf den evaluierten Teilergebnissen (sowohl Planungsmethoden als auch physischen Komponenten) aus den einzelnen Arbeitspaketen werden ausgewählte Anwendungsszenarien in insgesamt drei Demonstratoren umgesetzt. Grundlage für die Erstellung der Demonstratoren bilden sowohl die Anwendungsszenarien aus dem Automotive-Bereich als auch die am Fraunhofer IML existierenden Versuchsfelder (LivingLab „Zellulare Transportsysteme“ mit 50 Fahrerlosen Transportsystemen, Arbeitsstationen, Regallager und Industrieroboter). Neben der Demonstration der Hardware-Systeme (Physical) anhand von zwei Demonstratoren am Fraunhofer IML und bei VW soll auch die Interaktion mit den Planungs-, Monitoring- und Steuerungssystemen (Cyber) geeignet dargestellt werden. Hierzu eignet sich im Besonderen das zu entwickelnde Monitoring Assistenzsystem, welches Planungs- und Steuerungsmethoden verbindet und visualisiert.

## Arbeiten

### Minidemonstrator

Im Verlauf des Projekts ergab sich die Möglichkeit, die Konzepte des SMART FACE Projekts auf der Hannover Messe 2015 zu demonstrieren. Für diesen Anlass wurde ein sogenannter „Minidemonstrator“ konzipiert und umgesetzt, der nach der Messe vielfach auch für Folgepräsentationen des Projekts genutzt wurde. SICK hat in diesem Zuge die Aufgabe der Lokalisierung der Kleinstfahrzeuge im Messestand übernommen.

Dazu wurde ein entsprechend um die Konturlokalisierung erweiterter SICK TiM5xx mechanisch, elektrisch und elektronisch in jedes Fahrzeug des Minidemonstrators integriert und die Lokalisierungsdaten der Steuereinheit des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt.



Abbildung 15: Ein SICK TiM5xx, erweitert um die konturbasierte MC-Lokalisierung (rechts), integriert in einem Fahrzeug des Minidemonstrators (links)

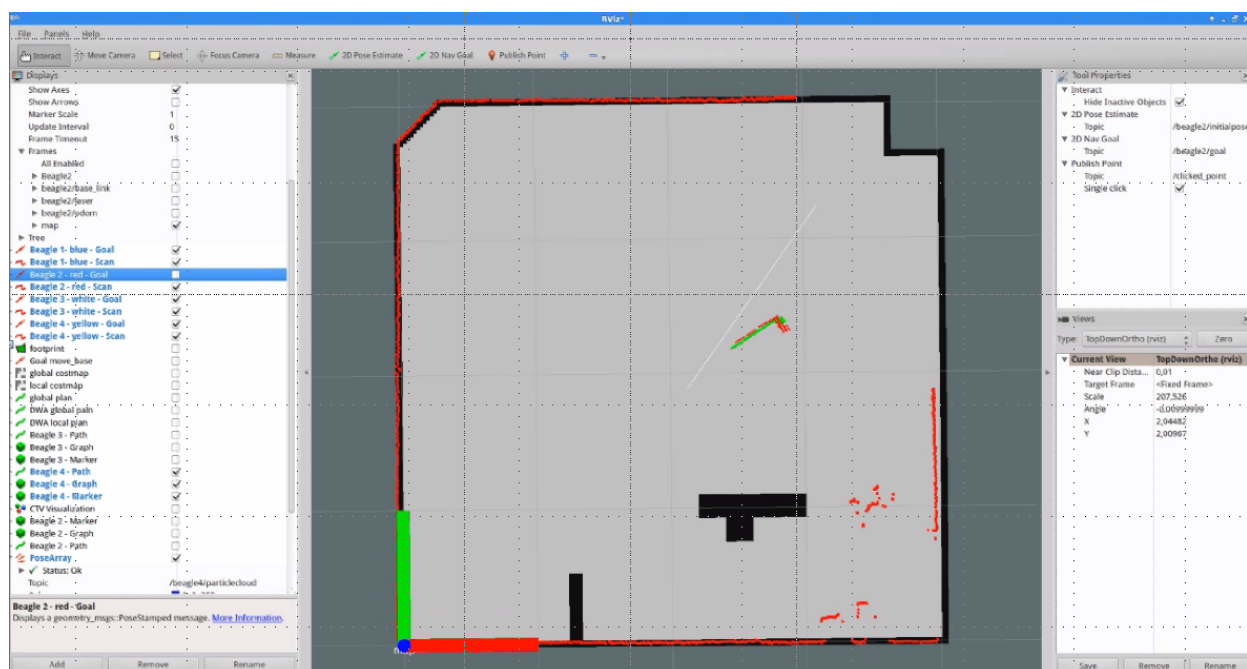


Abbildung 16: Lokalisierung eines Fahrzeugs mittels Umgebungskarte (schwarz) und SICK TiM5xx Sensordaten (rot)

### Shopfloor-Demonstrator

Gemeinsam mit dem Fraunhofer IML hat SICK ein Konzept zur Integration der Konturlokalisierung auf Basis der vorhandenen Sicherheitslaserscanner erstellt und die Schnittstellen sowie die Datenkommunikation spezifiziert. Abbildung 17 zeigt den vorhandenen SICK S300 Sicherheitslaserscanner (kopfüber, mehrheitlich versteckt hinter der Abdeckung) und die zusätzlich montierte externe Recheneinheit. Für Dokumentationszwecke wurde ebenfalls eine GoPro 4 Videokamera angebracht, um für Messdatenauswertungen eine visuelle Referenz zu haben.



Abbildung 17: Transportfahrzeug mit Konturnavigation auf Basis der vorhandenen Sicherheitssensorik (SICK S300) sowie einer externen Recheneinheit (DFI EC700-BT)

Zur Evaluierung und Validierung der konturbasierten Lokalisierung wurde ein SICK NAV350 Navigationslaserscanner auf eines der Fahrzeuge integriert und entsprechende Reflektorlandmarken in der IML Testhalle installiert. Diese hochgenaue Lokalisierungslösung diente dann als Ground Truth bei der Evaluierung der Genauigkeit der Konturlokalisierungslösung in Position und Winkel für statische und dynamische Umgebungen (siehe 0).



Abbildung 18: SICK NAV350 Navigationslaserscanner als hochgenaue Referenzlokalisierung mittels künstlicher Reflektoren

#### 4.1.6. Zusammenfassung der wichtigsten technischen Ergebnisse

Die für SICK relevanten technischen Ergebnisse umfassen die folgenden Punkte.

##### Konturbasierte Monte-Carlo-Lokalisierung im SICK TiM5xx Laserscanner

Für den SMART FACE Minidemonstrator wurde die konturbasierte Lokalisierung auf den SICK TiM5xx Laserscanner adaptiert und direkt im Sensor ohne externe Recheneinheit lauffähig gemacht. Diese Weiterentwicklung der Sensorfunktionalität stellt aus Kundensicht einen direkten, intelligenten Mehrwert der Sensorik dar. Eine ausreichende Genauigkeit und Robustheit wurde durch den vielfachen Einsatz im Minidemonstrator empirisch verifiziert.

### Konturbasierte Monte-Carlo-Lokalisierung mit SICK Sicherheitslaserscannern

Für den SMART FACE Shopfloor-Demonstrator wurde die konturbasierte Lokalisierung auf den SICK S300 Sicherheitslaserscanner adaptiert und aufgrund begrenzter Rechenkapazität im Sensor mithilfe einer externen Recheneinheit realisiert. Die Genauigkeit und Robustheit wurde durch einen Vergleich mit einer hochgenauen Navigationslaserscannerlösung auf Basis von künstlichen Landmarken im Shopfloor-Demonstrator detailliert evaluiert und validiert.

### Dynamische Kartenupdates zur Lokalisierung in veränderlichen Umgebungen

Es wurde ein robustes Verfahren zur Lokalisierung in veränderlichen Umgebungen mittels dynamischen Kartenupdates entwickelt und unter erweiterten Laborbedingungen (SICK Versuchshalle) mit AMCL als Referenzverfahren für unterschiedliche Grade an Umgebungsdynamiken getestet und evaluiert.

Es konnte gezeigt werden, dass der neu implementierte Ansatz mit dynamischer Karte nicht divergiert während die Genauigkeit mit AMCL gleichauf liegt (für die Fälle, in denen AMCL konvergiert: 10 cm bei  $3\sigma$ ), wie folgende Abbildung 1 exemplarisch zeigt:

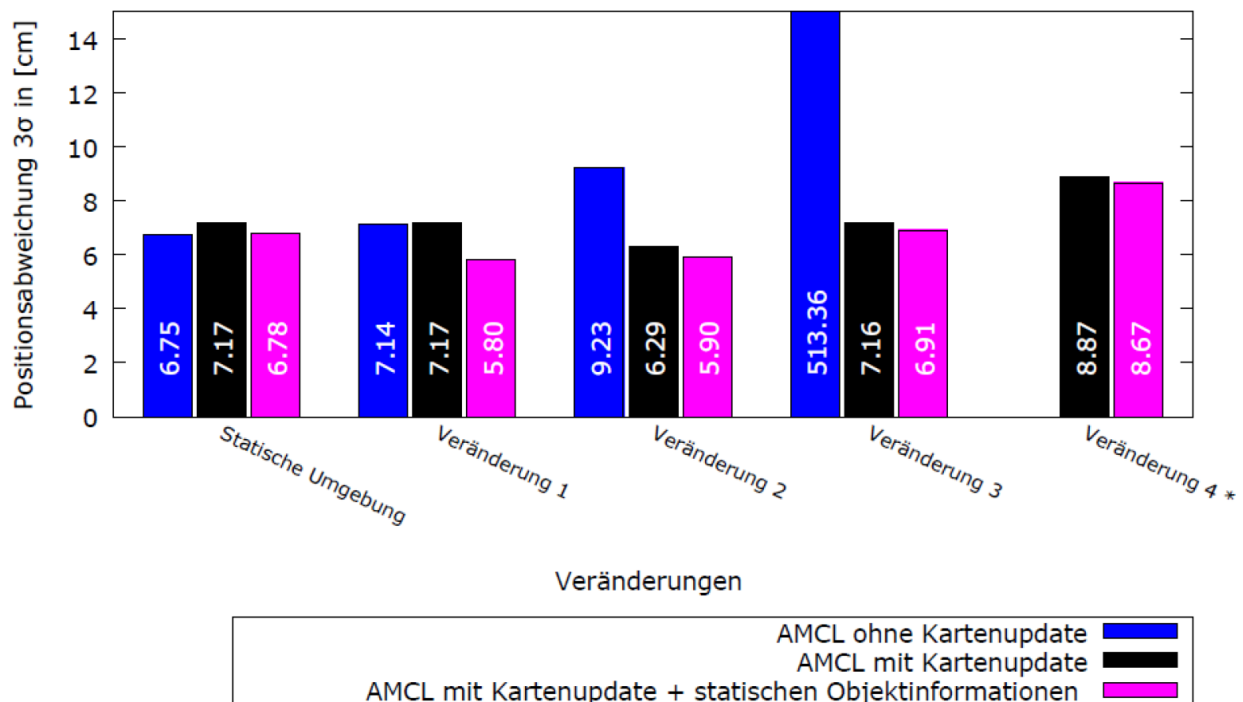


Abbildung 19: Vergleich der Positionsabweichungen verschiedener Lokalisierungsverfahren bei steigender Umgebungsveränderung

Das Verfahren wurde zusätzlich erfolgreich in realen Industrieumgebungen evaluiert und validiert (Coca-Cola Madrid/Bilbao, Spanien).

### Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen

Experimentell wurde der Austausch von Informationen über die lokale Umgebung zwischen Fahrzeugen zum Aufbau einer globalen Karte implementiert und getestet. Dies erlaubt den Fahrzeugen eine robuste Eigenlokalisierung in Bereichen, die bisher nur von anderen Fahrzeugen durchfahren wurden und ermöglicht ferner eine dynamische, vorausschauende Bahnplanung.

## 4.2. Wissenschaftliche Ergebnisse

Die für SICK relevanten wissenschaftlichen Ergebnisse umfassen die folgenden Punkte.

### Weiterentwicklung bestehender wissenschaftlicher Ansätze zum Map-Update

Bestehende wissenschaftliche Ansätze zum Map-Update wurden dahingehend weiterentwickelt, dass sie auf Industrieumgebungen hinsichtlich Rechenzeit, Robustheit und Echtzeitanforderungen adaptiert wurden.

Folgende Veröffentlichungen wurde für das International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA 2017) angenommen:

- Christoph Hansen, Kay Fürstenberg: Enabling robust localization for automated guided carts in dynamic environments.

*Zusammenfassung:* In vielen Anwendungen fahrerloser Transportfahrzeuge ist eine hohe Flexibilität, neben dem sicheren und robusten Betrieb, eine an Bedeutung zunehmende Anforderung. Dabei sollen sich die Fahrzeuge frei in dynamischen Umgebungen bewegen können. In solchen Umgebungen ändert sich die von der Fahrzeugsensorik erfassten Umgebungskontur ständig und macht eine Eigenlokalisierung in einer gegebenen Karte schwer bis unmöglich. Durch eine robuste Aktualisierung der Karte in Echtzeit wird eine zuverlässige Lokalisierung auch in veränderlichen Umgebungen ermöglicht.

#### Wissenschaftlicher Ansatz zur Genauigkeitsevaluierung der konturbasierten Lokalisierung

Die Robustheit und Genauigkeit der implementierten konturbasierten Lokalisierung wurde durch einen Vergleich mit einem hochgenauen Navigationslaserscanner auf Basis von künstlichen Reflektorlandmarken validiert. Diese Validierung ist für die Überführung und Integration der Algorithmik in zukünftige Sensorentwicklungen im Hause SICK essenziell.

#### Ergebnisse zur Anforderungsanalyse und Design von intelligenter Sensorik

Die Ergebnisse des Querschnittsarbeitspaket ‚Intelligente Sensorik‘, insbesondere hinsichtlich der Anforderungen und des Designs von intelligenten Sensoren. Diese wurden in den folgenden Publikationen bereits veröffentlicht:

- Kay Fürstenberg, Christopher Kirsch: Intelligente Sensorik als Grundbaustein für Cyber-physische Systeme in der Logistik, In: Vogel-Heuser B, Bauernhansl T, ten Hompel M (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0, 1. Auflage. Springer, Berlin, 2015.

*Zusammenfassung:* Wenn bereits die Sensorik durch komplexe Datenverarbeitung und detailliertes Applikationswissen im Sensor zahlreiche Funktionen zur Lösung der Kundenanforderungen bereitstellt sowie weitere integrierte Funktionen eine automatische Adaption und Optimierung der Funktion ermöglichen, spricht man von Intelligenter Sensorik. Intelligente Sensorik ist notwendig, um die erforderliche Autonomie von Maschinen und Anlagen im Wandel zu cyber-physischen Systemen (CPS) im Kontext von Industrie 4.0 zu erreichen und gleichzeitig das Engineering von CPS zu vereinfachen. Im Fokus dieses Beitrags ist die Diskussion über die Eigenschaften eines Intelligenten Sensors und dessen Nutzung in exemplarischen logistischen Anwendungen, die durch den Wandel hin zu CPS profitieren können. Intelligente Sensorik lässt Zukunftsszenarien wie die Smart Factory erst realisierbar erscheinen.

- Robert Bauer, Kay Fürstenberg, Christopher Kirsch: Intelligente Sensorik: Die Basis für Autonomie in der Industrie 4.0, Vortrag auf der VDI-Tagung Industrie 4.0, 2016.

*Zusammenfassung:* Intelligente Sensorik wird in Zukunft die erforderliche Autonomie für eine wandelbare Logistik und Produktion bereitstellen und CPS zur Autonomie befähigen. Intelligente Sensorik hat bereits heute die Rolle der Enabler-Technologie für die Industrie 4.0 inne und wird dies in Zukunft noch weiter untermauern.

### 4.3. Öffentlichkeitsarbeit

Für die Querschnittsfunktion „Öffentlichkeitsarbeit“ wurde ein separates Aufgabenfeld gebildet, das durch eine Mitarbeiterin des Konsortialführers hauptverantwortlich betreut wurde.



### 4.3.1. Projekthomepage

Neueste Entwicklungen im Projekt wie Messeauftritte, Konsortial- und Projekttreffen oder Medienberichte wurden über die Projekthomepage [www.smartfactoryplanning.de](http://www.smartfactoryplanning.de) veröffentlicht. Für Details sei auf diese Website verwiesen.

### 4.3.2. Konzeptposter und Konzeptvideo

Zur Erläuterung der Ausgangslage, der Motivation und der Ziele des Projekts wurde durch das Fraunhofer IML ein Konzeptposter<sup>1</sup> in deutscher und englischer Sprache erstellt, das unter anderem auch bei den Messeauftritten an Interessierte verteilt wurde. Aufgrund des positiven Anklangs wurden die Inhalte in einem Konzeptvideo umgesetzt, das ebenfalls über die Projektseite verfügbar ist.

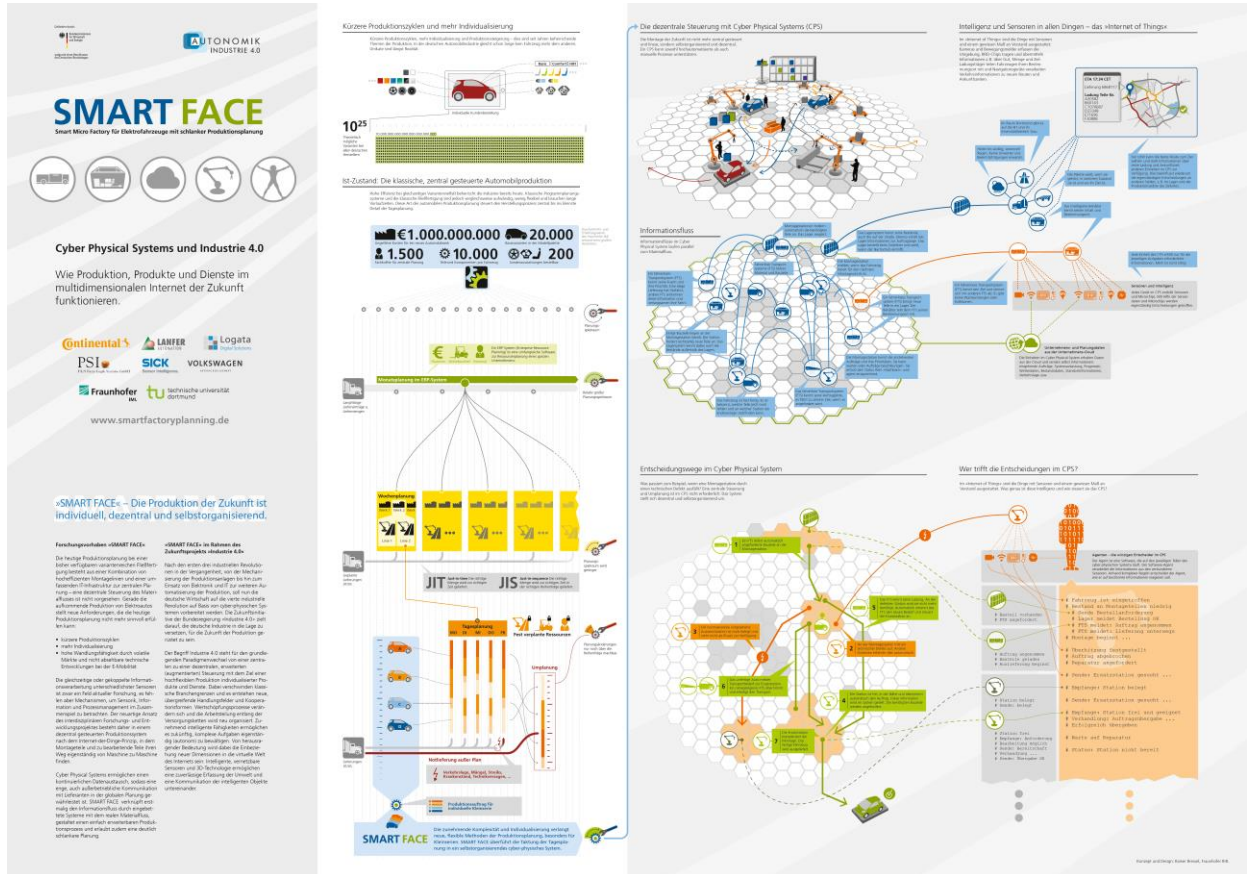


Abbildung 20: Konzeptposter

### 4.3.3. Veröffentlichungen

Das Projekt SMART FACE hat viele wissenschaftliche Veröffentlichungen zu den einzelnen Themenschwerpunkten des Projekts hervorgebracht. SICK hat folgende Veröffentlichungen zu den Themen Lokalisierung und Intelligente Sensorik gemacht:

1. Kay Fürstenberg, Christopher Kirsch: Intelligente Sensorik als Grundbaustein für Cyber-physische Systeme in der Logistik, In: Vogel-Heuser B, Bauernhansl T, ten Hompel M (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0, 1. Auflage. Springer, Berlin, 2015.
2. Robert Bauer, Kay Fürstenberg, Christopher Kirsch: Intelligente Sensorik : Die Basis für Autonomie in der Industrie 4.0, VDI-Tagung Industrie 4.0, 2016.
3. Christoph Hansen, Kay Fürstenberg: Enabling robust localization for automated guided carts in dynamic environments, International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA), 2017 (angenommen zur Veröffentlichung).

<sup>1</sup> <http://www.smartfactoryplanning.de/veroeffentlichungen.html>

#### 4.3.4. Messe- und Konferenzauftritte

SMART FACE war auf den großen Fachmessen **Hannover Messe** (April 2015) sowie auf der **Automatica München** (Juni 2016) sowie auf der Autonomik-Abschlusskonferenz **Digitale Innovationen für die Industrie Berlin** (Oktober 2016) mit dem im Projekt entwickelten Minidemonstrator vertreten. Der Minidemonstrator diente dort, aber auch auf diversen internen Events der Projektpartner, als Anschauungsobjekt für die im Projekt entwickelten Konzepte.



Abbildung 21: SMART FACE Minidemonstrator auf der Hannover Messe 2015

Seitens SICK konnte schon im Minidemonstrator der Ansatz zur konturbasierten Lokalisierung der Fahrzeuge mithilfe eines SICK TiM-Laserscanners umgesetzt und erfolgreich demonstriert werden.



Abbildung 22: Konturbasierte Lokalisierung der Träger- und Versorgungsfahrzeuge im SMART FACE Minidemonstrator

Über den Auftritt auf der Hannover Messe und insbesondere über den SMART FACE Minidemonstrator wurde am zweiten Messetag sehr positiv bei **Heise Online**<sup>2</sup> berichtet.

#### 4.3.5. Abschlusspräsentation und Abschlussvideo

Zum Ende des Projekts wurden die erreichten Ergebnisse aller Projektpartner bei einer öffentlichen Abschlussdemonstration am Fraunhofer IML in Form von Präsentationen und Live-Vorfürungen der beiden Demonstratoren vorgestellt.

Im Rahmen dieser Abschlusspräsentation entstand auch ein professionelles Projektvideo<sup>3</sup> zu den Inhalten und Ergebnissen des Projekts.

---

<sup>2</sup> <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Industrie-4-0-Ein-langer-Weg-in-die-Fabrik-der-Zukunft-2607406.html>

<sup>3</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=3jf1hEUSi68>

## 5. Nutzen und Verwertung

Das im Projekt erarbeitete Konzept erfüllt in hohem Maße die Kriterien eines Alleinstellungsmerkmals, da weder adäquate freie noch kommerzielle (Konkurrenz-) Produkte mit gleicher Funktionalität derzeit (auf dem Markt) verfügbar sind. Das Verfahren konkurriert ausschließlich mit wenig innovativen und in Anbetracht der Komplexität nur sehr eingeschränkt tragfähigen Planungssystemen. Ausgehend davon thematisieren die folgenden Abschnitte die Erfolgsaussichten und Anschlussfähigen sowie die damit assoziierten Maßnahmen.

Durch das Vorhaben wurde eine nachhaltige Technologie- und Paradigmenalternative in der Systematik von Planungs- und Steuerungssystemen für wandlungsfähige und skalierbare Produktionssysteme im Kontext der Kleinstserienfertigung geschaffen, da erstmalig ein zelluläres Materialfluss- und Warenbereitstellungskonzept mit autonomer, interagierender, intelligenter Sensorik kombiniert wurde. Die damit assoziierte Unterstützung der Planungsaufgaben durch eine systematische Softwareplattform erlaubt eine neue Stufe in der Herangehensweise der Planung zu erreichen, da diese in der Vergangenheit primär durch manuelle, zeitaufwendige und insbesondere nicht individualisierbare Mechanismen geprägt war.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens heben die vorherrschenden Prinzipien der Produktionsplanung auf und bieten Unternehmen so völlig neue Methoden und Möglichkeiten, schnell und flexibel auf Veränderungen zu reagieren. Insbesondere am Hochlohnstandort Deutschland können wirtschaftliche Potentiale freigesetzt werden, welche u.a. die automobiler Produktion für die Anforderungen der Zukunft (u. a. Wandlungsfähigkeit) wappnen. Durch die Teilnahme zahlreicher Industriepartner und eines Automobilherstellers wurde die wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse sichergestellt.

Da der Ansatz sowohl unabhängig von dem jeweiligen Anwendungsszenarium ist und auch zukünftige Entwicklungen integrieren kann, ist von einer hohen Nachhaltigkeit und einer potenziell hohen Anzahl von Interessenten heute und in Zukunft auszugehen. Die Produktion von Kleinstserien einerseits im Bereich der Elektromobilität und andererseits bei Markterschließungen ist, trotz der zunehmend hohen Bedeutung, ein u.a. innerhalb der deutschen Automobilindustrie unzureichend gelöstes Problem. Die Möglichkeit eines ganzheitlichen Produktionsansatzes zur Planung, zum Betrieb und zum Steuern würde somit auf ein breites Interesse in dieser Industrie stoßen.

Über die weltweite Leuchtturmposition Deutschlands in diesem Bereich sind langfristige positive Effekte für deutsche Anbieter von Produktionsplanungssystemen bzgl. der internationalen Wettbewerbsfähigkeit zu erwarten. Das Innovations-Potential der geplanten Lösung wird daher als sehr hoch eingestuft. Aufgrund dieses hohen Innovations- und Marktpotenzials können die Ergebnisse aus SMART FACE einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, den Standort Deutschland durch weltmarktfähige Produkte zu stärken und deutsche Unternehmen bei ihren nationalen und internationalen Innovationsbestrebungen effektiv zu unterstützen. Das Gesamtsystem wird sowohl zur Anwendung im Rahmen von bestehenden Systemen kommen, aber auch leitend bei der Entwicklung neuer Produktionsanlagen sein.

Die Entwicklungen seitens SICK in SMART FACE können bestehende Produkte bedeutend verbessern und zukunftsfähig erhalten. Außerdem können aus den gemeinsam mit den Partnern erstellten Anforderungen und den Beispielapplikationen neue innovative Produkte werden, die SICKs Stellung in der Fabrik- und Logistikautomation weiter ausbauen können. Die Aktivitäten in SMART FACE haben erhebliche Relevanz, da für die SICK AG die Marktchancen für SICK-Sensoren in der Fabrik- und Logistikautomation verbessert werden.

Die SICK AG plant auf Basis des in SMART FACE generierten Know-hows intelligenten Sensoren gemäß den Industrie-4.0-Anforderungen für die Fabrik- und Logistikautomation zu entwickeln.

## 6. Literatur

- [1] H. Wiendahl, J. Reichardt und P. Nyhuis, *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, Hanser, 2009.
- [2] E. A. Lee, „Cyber Physical Systems: Design Challenges,“ in *International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008.
- [3] M. Broy, *Cyber-Physical Systems*, Springer, 2010.
- [4] R. Brooks und S. S. Iyengar, *Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software*, Prentice-Hall, Inc., 1998.
- [5] T. C. Henderson, M. Dekhil, R. Kessler und M. Griss, „Sensor fusion,“ *Control Problems in Robotics and Automation*, pp. 193-208, 1998.
- [6] T. W. T. O. Y. U. N. M. K. & O. H. Hori, „A Multi-Sensing-Range Method for Position Estimation of Passive RFID Tags,“ *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*, pp. 208-213, 2008.
- [7] J. Shalf, K. Asanovic, D. Patterson, K. Keutzer, T. Mattson und K. Yelick, „The Manycore Revolution: Will the HPC Community Lead or Follow?,“ *SciDAC Review*, 2009.
- [8] J. Hines, T. Malone, P. Gonzalves, G. Herman, J. Quimby, M. Murphy-Hoye, J. Rice, J. Patten und H. Ishii, „Construction by replacement: a new approach to simulation modeling,“ *System Dynamics Review*, Bd. 27, pp. 64-90, 2011.
- [9] C. Franco, F. Angelo und N. Libero, „Modelling and simulation of complex manufacturing systems using statechart-based actors,“ *Simulation Modelling Practice and Theory*, Bd. 19, Nr. 2, pp. 685-703, 2011.
- [10] F. Allgayer, *Computerunterstützte Planung von Materialflußsystemen auf Basis statischer Materialflüsse*, Utze-Verlag, 1999.
- [11] C. A. C. Coello, G. B. Lamont und D. A. van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd Edition, Boston: Springer Science+Business Media LLC, 2007.
- [12] T. Kirste und H. Schumann, „Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing,“ *Computers and Graphics*, Bd. 25, Nr. 4, pp. 551-553, 2001.
- [13] J. Penman und C. Yin, „Feasibility of using unsupervised learning, artificial neural networks for the condition monitoring of electrical machines,“ *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, Bd. 141, Nr. 6, pp. 317-322, 1994.
- [14] A. Saxena und A. Saad, „Evolving an Artificial Neural Network Classifier for Condition Monitoring of Rotating Mechanical Systems,“ *International Journal of Applied Soft Computing*, Bd. 7, Nr. 1, pp. 441-454, 2007.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN nicht geplant	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Sensorik für Planungs- und Steuerungskonzepte für die schlanke Produktionsplanung (Sens Smart FacE)	
3b. Titel der Publikation Sensorik für Planungs- und Steuerungskonzepte für die schlanke Produktionsplanung (Sens Smart FacE)	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Böhning, Markus Hansen, Christoph Reinke, Christoph, Schubert, Lars	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) Böhning, Markus Hansen, Christoph Reinke, Christoph, Schubert, Lars	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2017
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) SICK AG CU Research Merkurring 41  22143 Hamburg	7. Form der Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)  53107 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MA13007F
	11a. Seitenzahl Bericht 29
	11b. Seitenzahl Publikation 29
	12. Literaturangaben 14
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 22
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Gegenstand und Ziel des interdisziplinären Forschungsprojekts war die Entwicklung nachhaltiger Konzepte und Methoden, welche den speziellen Anforderungen der Kleinstserienfertigung bzgl. Betrieb, Skalierbarkeit, Robustheit und Wirtschaftlichkeit erfüllen – dies erforderte einen radikal neuen Ansatz für die Fertigungsplanung und –steuerung mit dem Ziel einer schlanken Produktionsplanung und wandlungsfähigen Fertigungsstrukturen. Dabei standen dezentrale, hochflexible Materialflusseinheiten (Cyber-Physical Systems, CPS) im Fokus des Vorhabens. Immer kürzeren Produktionszyklen, mehr Individualisierung und Produktionssteigerung – dies sind seit Jahren beherrschende Themen der Produktion. Hohe Effizienz bei gleichzeitiger Variantenvielfalt wird in der Serienfertigung bereits mit komplexen Planungssystemen und klassischer Fließfertigung beherrscht. Jedoch gibt es gerade im Bereich der Kleinstserienfertigung deutlich abweichende Anforderungen, die nicht von diesen klassischen Systemen erfüllt werden. Der Stand der Technik wird diesen Herausforderungen nur bedingt gerecht, da die klassische Fließfertigung derzeit primär auf maximale Produktivität ausgelegt ist. Die heutige Produktionsplanung einer variantenreichen Fließfertigung besteht aus hocheffizienten Montagelinien und einer umfassenden IT-Infrastruktur zur zentralen Planung – eine dezentrale Steuerung des Materialflusses fehlt. Die gekoppelte Informationsverarbeitung heterogener Sensoren ist zwar ein Feld aktueller Forschung, es fehlen aber Mechanismen, um Sensorik, Information und Prozessmanagement integriert zu beachten. Der neuartige Ansatz des Projekts bestand daher in einem dezentral gesteuerten Produktionssystem, in dem Montageteile und zu bearbeitende Teile ihren Weg eigenständig von Maschine zu Maschine finden. Redundant vorhandene Maschinen verteilen selbstorganisierend die Last und erreichen einen effizienteren Betrieb und eine höhere Auslastung – nach diesem Motto wurde ein schlankes Programmplanungskonzept entwickelt und prototypisch umgesetzt. So wurde eine Methodik zur übergreifenden globalen Programmplanung, die alle wesentlichen Restriktionen sowie Ziele berücksichtigt, entwickelt. Diese Methode definiert die Last für das dezentrale Produktionssystem, das sich selbst lokal optimiert und somit ohne eine zentrale Reihenfolgeplanung auskommt. Die Vorteile liegen in der Flexibilität, der Adaptierung und der besseren Reaktion auf eintretende Risiken. Cyber-Physical Systems ermöglichen einen kontinuierlichen Datenaustausch, so dass eine enge Kommunikation mit Lieferanten in der globalen Planung gewährleistet ist und strategische Zielvorgaben berücksichtigt werden können.	
19. Schlagwörter Produktionsplanung, Cyber-physical systems, Kleinstserienfertigung, Internet der Dinge, selbstorganisierend, intelligente Sensorik, Industrie 4.0	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN not planned	2. Type of Report Final report
3a. Report Title Sensorik für Planungs- und Steuerungskonzepte für die schlanke Produktionsplanung (Sens Smart FacE)	
3b. Title of Publication Sensorik für Planungs- und Steuerungskonzepte für die schlanke Produktionsplanung (Sens Smart FacE)	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Böhning, Markus Hansen, Christoph Reinke, Christoph, Schubert, Lars	5. End of Project 31.12.2016
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Böhning, Markus Hansen, Christoph Reinke, Christoph, Schubert, Lars	6. Publication Date 30.06.2017
8. Performing Organization(s) (Name, Address) SICK AG CU Research Merkurring 41  22143 Hamburg	7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  53107 Bonn	9. Originator's Report No.
	10. Reference No. 01MA13007F
	11a. No. of Pages Report 29
	11b. No. of Pages Publication 29
	12. No. of References 14
	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 22
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract The object and goal of the interdisciplinary research project was the development of sustainable concepts and methods which meet the special requirements of small-series production in terms of operation, scalability, robustness and cost-effectiveness. This required a radically new approach for production planning and control with the goal of lean production planning and control and versatile manufacturing structures. The project focused on decentralized, highly flexible material flow units (Cyber-Physical Systems, CPS). Ever shorter production cycles, more individualization and increased production - these have been the dominant production topics for years. High efficiency combined with a plurality of variants is already mastered with complex planning systems and classic flow production. However, especially in the field of small series production, there are clearly different requirements which are not fulfilled by these classic systems. The state of the art meets these challenges only to a limited extent, since classical assembly line production is currently primarily designed for maximum productivity. Today's production planning for a high-flow assembly line with a plurality of variants consists of highly efficient assembly lines and a comprehensive IT infrastructure for central planning – a decentralized control of the material flow is missing. Although the coupled information processing of heterogeneous sensors is a field of current research, there is a lack of mechanisms for integrating sensor technology, information and process management. The innovative approach of the project therefore consisted of a decentralized production system, in which assembly parts and parts to be machined find their own way from machine to machine. Redundant machines distribute the load in a self-organized way and achieve a more efficient operation and a higher utilization – according to this paradigm, a slim program planning concept was developed and implemented prototypically. A methodology has been developed for comprehensive global programming, which takes into account all essential restrictions and objectives. This method defines the load for the distributed production system, which optimizes itself locally and thus operates without a central order planning. The advantages are flexibility, adaptation and better response to emerging risks. Cyber-Physical Systems enable continuous data exchange so that close communication with suppliers is ensured in the global planning and strategic targets can be taken into account.	
19. Keywords Production planning, cyber physical systems, small series production, internet of things, self-organizing, intelligent sensors, industry 4.0	
20. Publisher	21. Price