

Schlussbericht

Verbundvorhaben

Smart FacE-Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung

Titel des Teilvorhabens: Daten- und Prozessanalyse, -visualisierung, -optimierung sowie -kommunikation innerhalb CPS-gestützter Produktionssysteme (KomAVisO)

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dortmund

Förderkennzeichen: 01MA13007E

Autor/en: Dr. Frank Weichert

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2013 bis 31.12.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Projektstruktur	4
3	Stand der Technik zu Projektbeginn	5
3.1	Cyber-Physical Systems, Kommunikation, Multiagentensysteme	5
3.2	Sensornetzwerke, Datenverarbeitung und -analyse	6
3.3	Optimierung	7
3.4	Monitoring und Assistenzsysteme	7
4	Eingehende Darstellung	8
4.1	Technische Ergebnisse	8
4.2	Wissenschaftliche Ergebnisse	24
4.3	Öffentlichkeitsarbeit	25
5	Nutzen und Verwertung	27
6	Literatur	27

1 Einleitung

Gegenstand und Ziel des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes 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. Hieraus resultierte das Ziel des Vorhabens hin zu einer schlanken Produktionsplanung und wandlungsfähigen Fertigungsstrukturen. Dabei standen dezentrale, hochflexible Materialflusseinheiten, realisiert durch Cyber-Physical Systems (CPS) im Fokus des Vorhabens. Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung musste der Grad der notwendigen bzw. möglichen Dezentralisierung durch einen Vergleich mit aktuellen Fertigungskonzepten untersucht werden. Die TU Dortmund hat sich dabei durch eine Bearbeitung der hoch relevanten Teilaspekte intelligente Sensornetzwerke, Datenverarbeitung und -analyse, (multikriterielle) Optimierung unter Beachtung multipler Ressourcen, CPS-konforme Systeme, Kommunikation/Lokalisation und verteiltes Monitoring nachhaltig in das Vorhaben eingebracht, um die forschungsleitenden Fragen des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes SMART FACE zu beantworten und die Machbarkeit der Konzepte an realitätsnahen und gleichzeitig generischen Anwendungsszenarien zu erproben. 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 den Sektor der Automobilindustrie beschränkt. Gemäß der weiteren Vorhaben der Ausschreibung „Industrie 4.0“ trifft dies auch auf die Herstellung von Kaffeemaschinen oder Sportschuhe zu.

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die erarbeiteten Ergebnisse des Teilprojektes „Daten- und Prozessanalyse, -visualisierung, -optimierung sowie -kommunikation innerhalb CPS-gestützter Produktions-

systeme (KomAVisO)“ der Technischen Universität Dortmund, welche in assoziierter Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgte, gemäß der Struktur der Arbeitspakete zusammen. Die Zielsetzungen lassen sich durch die nachfolgenden Herausforderungen charakterisieren:

- Entwicklung intelligenter parametrisierbarer ressourceneffizienter Sensoreinheiten,
- Erarbeitung von Methoden zur verteilten Signal- und Datenanalyse,
- Entwicklung CPS-konformer Sensor-/ Aktornetzwerke,
- Erarbeitung eines effizienten gesamtheitlichen Kommunikations-/Lokalisationsmodells für Sensor-/Aktor-Netzwerke,
- Modellierung (multikriterieller) Zielfunktionen für Steuerungssimulationen und Planungssystem,
- Konzipierung von Methoden zum dezentralen Monitoring und
- Bereitstellung adaptiver Benutzungsschnittstellen und Assistenzsysteme.

Der aktuelle Stand der Technik wurde diesen Herausforderungen bisher nur eingeschränkt gerecht, da in der Praxis 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. Bezogen auf die Teilaspekte der TU Dortmund bedeutet dieses, dass intelligente Sensoren, deren Optimierung und Vernetzung zu adaptiven Netzwerken bei gleichzeitiger Beachtung multipler Anforderungen und entsprechende Assistenzsysteme bisher nicht den Anforderungen zum Einsatz innerhalb adaptiver und skalierbarer Produktionssysteme entsprechen. Der neuartige Ansatz des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes „SMART FACE“ bestand in der Entwicklung von Methoden und Konzepten für eine schlanke Produktionsplanung und einen einfach skalierbaren Produktionsprozess. Die TU Dortmund konnte u. a. dazu beitragen, dass der Informationsfluss durch Mechanismen eingebetteter Systeme mit dem realen Materialfluss gekoppelt werden konnte. Hierzu wurden dezentrale cyber-physikalische Systeme und effiziente Kommunikations- und Lokalisationsmechanismen erarbeitet. Auf einer weiteren Ebene bestand der neuartige Ansatz in der Entwicklung intelligenter Sensorik respektive in der effizienten Verarbeitung und Analyse der (Sensor-)Daten. Hierbei wurde eine zwei- und dreidimensionale Erfassung, Weiterverarbeitung und Beachtung der kompletten zu analysierenden Umgebung erarbeitet, dies ging mit einer signifikanten Erhöhung des erfassbaren Informationsumfangs einher, welches bisherige Ansätze nicht bereitstellen konnten. Zudem erfolgte die Einbettung der Sensoreinheiten in intelligente Sensor-/Aktornetzwerke.

In Anbetracht der Komplexität der Fragestellung wurden neben der realen Instanziierung (Demonstratoren) auch Konzepte zur Simulation entwickelt. Innerhalb dieser ist es möglich, Produktionsprozesse unter zeitlich und örtlich variierenden Bedingungen zu simulieren. Es können entsprechende Topologien von Sensor-/ Aktornetzwerken bewertet und optimiert werden. Zum Monitoring entsprechender Simulationen wurden automatische Methoden und multimediale Assistenz- und Visualisierungssysteme prototypisch entwickelt, welche auch in Form von Abschlussarbeiten in die Lehre getragen werden konnten. Es wurden Methoden entwickelt, welche Simulationen von bestehenden und zukünftigen Produktionsaufbauten sowie entsprechende Varianten erlauben. Dabei kann der Fokus gezielt auf die Adaption bestehender Produktionstopologien von Sensoren, Aktoren, bzw. Produktionstopologien im Allgemeinen an veränderte Rahmenbedingungen (Ressourcen) gelegt werden. Ideologisch folgt dies dem Leitgedanken „Evolution statt Revolution“, um effizient und zugleich kostengünstig bestehende Strukturen in die vierte industrielle Revolution zu überführen [Böc+17].

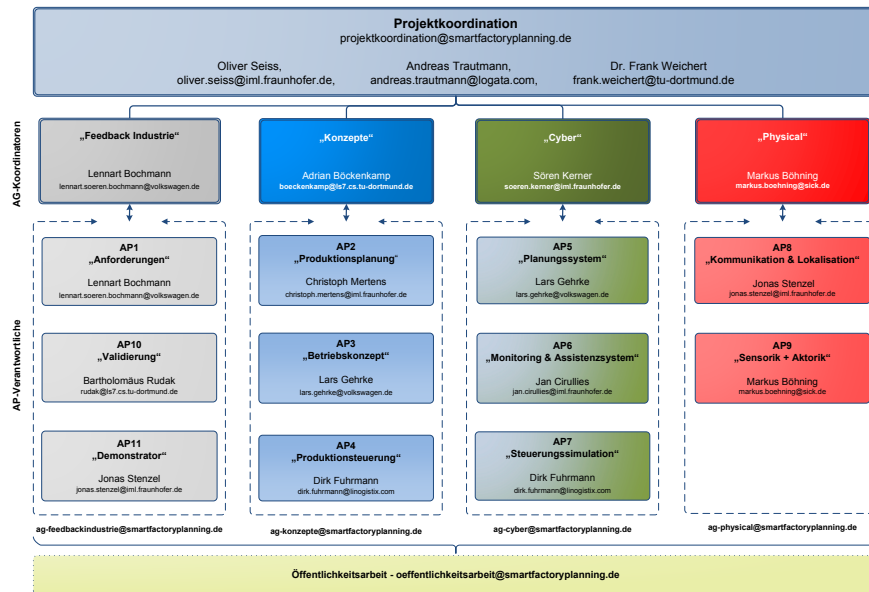


Abbildung 1: Organigramm zum Verbundprojekt SMART FACE

2 Projektstruktur

Die in der Vorhabensbeschreibung spezifizierte Struktur der Arbeiten wurde umgesetzt und im Projektmanagement etabliert. Resultierend ergab sich das in der Abbildung 1 dargestellte Organigramm zum Verbundprojekt SMART FACE, welches die vier Arbeitsgruppen manifestiert:

- AG 1: Feedback Industrie
- AG 2: Konzepte
- AG 3: Cyber
- AG 4: Physical

Primärziel der AG 1 ist 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 werden. Der konzeptionelle Kern des Projekts ist in der AG 2 verankert. Durch die Arbeiten in dieser Arbeitsgruppe wird 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 erfolgt die Entwicklung ausgewählter Softwarekomponenten, die zur Realisierung der in der Konzeptphase entwickelten Lösungen notwendig sind. Durch die AG 4, „Physical“, werden die physikalischen Voraussetzungen geschaffen, um die Virtualisierung der Materialströme zu ermöglichen. So wird die Verfügbarkeit der notwendigen Informationen durch die Auswahl bzw. Entwicklung von „smarten“ Sensoren und Aktoren garantiert.

Zur Bearbeitung der zentralen Zielsetzungen des Vorhabens waren die Beteiligten der TU Dortmund aufgrund ihres zur Verfügung stehenden Methodenspektrums mit Ausnahme des AP3 an allen Arbeitspaketen kontinuierlich beteiligt – hierzu sei auch auf die Abbildung 2 zur Kooperation der Arbeiten verwiesen. Die methodische und konzeptionelle Anforderungsanalyse (AP 1) bildete zusammen mit der Identifikation geeigneter Algorithmenklassen und einer formalen Spezifikation der Produktionsplanung (AP 2) die Basis zur Konzeptentwicklung der Produktionsplanung (AP 4) und zur Modellierung des Planungssystems über Methoden multikriterieller Optimierung (AP 5). Der damit erreichte Stand leitete über zur Entwicklung und Optimierung einer Steuerungssimulation (AP 7). Ein Forschungsschwerpunkt seitens der TU Dortmund lag in der Entwicklung und Realisierung von Konzepten, Methoden und Algorithmen zur Kommunikation und Lokalisation (AP 8) sowie zu intelligenter CPS-konformer Sensorik

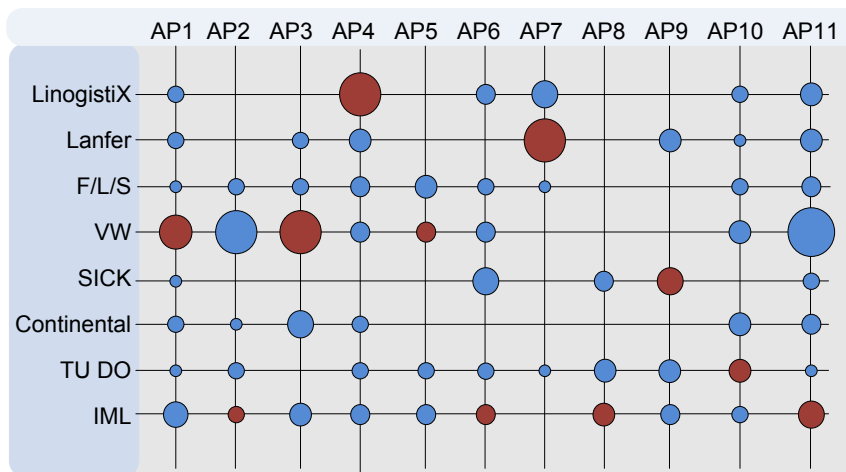


Abbildung 2: Kooperationsmatrix, rot: AP-Leitung, blau: AP-Mitarbeit, Größe: PM-Anteil

und Aktorik (AP 9). Die Validierung des Gesamtsystems (AP 10) wurde von der TU Dortmund koordiniert - wesentlich war hierfür auch die Beteiligung am Aufbau, der Entwicklung und der Betreuung der Demonstratoren (AP 11). Projektübergreifend war die TU Dortmund zudem außerplanmäßig mit der Projektkoordination bzw. dem Projektmanagement beschäftigt, siehe auch Abschnitt 4.

Die TU Dortmund hat zudem zusammen mit der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. und dem Konsortialführer (Logata Digital Solutions GmbH) die Projektkoordination übernommen. Diese, in Anbetracht des Projektes, umfangreiche Arbeitstätigkeit wurde durch den Projektleiter selber übernommen und hatte keine Auswirkungen auf die eingebrachten Umfänge innerhalb der Arbeitspakete - diese wurden durch die Projektmitarbeiter übernommen.

3 Stand der Technik zu Projektbeginn

Bei dem im folgenden Abschnitt aufgezeigten vorhabensbezogenen Stand von Wissenschaft und Technik wird sowohl auf den methodischen als auch technischen Entwicklungsstand Bezug genommen. Dabei fokussiert sich die Darstellung auf Themengebiete „Cyber-Physical Systems“, „Multiagentensysteme“, „Sensorik“, „Kommunikation und Lokalisation“, „Monitoring und Assistenzsysteme“ und „Optimierung“, welche auch primär von der TU Dortmund, vertreten durch den Lehrstuhl für Graphische Systeme (Informatik 7) bearbeitet wurden.

3.1 Cyber-Physical Systems, Kommunikation, Multiagentensysteme

Vor dem Hintergrund schlanker und wandelbarer Produktionssysteme repräsentieren Cyber-Physical Systems (CPS) einen Kernaspekt in dem beantragten Forschungsprojekt. Die Aktualität zeigt sich auch darin, dass diese Gegenstand aktueller Forschung sind. Einen Überblick zu CPS liefern [BCG12; Bro10; Lee08; Shi+11]. Eine Herausforderung stellt die Validierung von Cyber-Physical Systemen dar. Wan et al. [Wan+11] präsentieren beispielsweise eine allgemeine Testplattform zur Verifikation eines entwickelten CPS-Systems bestehend aus unbemannten intelligenten Fahrzeugen unter Verwendung einer Kommunikation mittels Wireless Sensor Networks (WSN). Die allgemeine Basistechnologie für die Konzeptionierung einer effizienten Kommunikationsstruktur bilden die „Service-Orientierten Architekturen“ (SOA) [Tim12; ABI09; HGR07; De +08; VRV05]. SOA ermöglichen einen hohen Abstraktionsgrad und vereinfachen die Entwicklung verteilter Anwendungen. Die Anwendung von SOA erfordert die Definition einer einheitlicher Schnittstellen zwischen heterogenen Geräten und Protokollen. Web Services stellen eine Beispielhafte Anwendung von SOA. Die Portierung von Web Services in Eingebettete und Cyber-Physical Systeme stellt aufgrund der Recourceneinschränkungen eine Herausforderung dar. Die SOCRADES Architektur [De +08] fokussiert die industriellen Automatisierungssysteme basierend auf

netzwerkbasierenden Systemen zusammengesetzt aus intelligenten eingebetteten Einheiten. Effizientes Ressourcenmanagement in Middleware Umgebungen ist zentraler Bestandteil der ARTIST [BS05] Architektur, die eine Verwaltung des Energieverbrauchs auf der Middleware-Schicht als vorteilhaft bezüglich des Energieverbrauchs ansieht. Zur Validierung der Stabilität des Gesamtsystems müssen die entwickelten SOA getestet werden, eine Überblick zu existierenden Testmethoden liefert [CP09]. Für Eingebettete und Cyber-Physical Systeme existieren zahlreiche auf SOA basierende Middleware Architekturen, wie z.B. das Projekt PLASTIC [ABI09]. Dieses zielt auf eine effiziente Middleware-basierte Kommunikation für Beyond3G Netze und basiert auf einem zweischichtigen Ansatz. Auf der unteren Schicht wird die Kommunikations-Middleware bereitgestellt unter Verwendung von Web Service und P2P Routing Mechanismen. Auf der oberen Schicht sind generische Dienste angesiedelt, wie z.B. der Sicherheitsdienst. Die effiziente Kommunikation Cyber-Physischer Sensor-/Aktornetzwerke bildet eine der Schlüsselkomponenten für Dezentralisierung, durchgängiges Monitoring und Maschinendesign in SMART FACE. Entsprechend effiziente Kommunikationsstrukturen repräsentieren damit die Basis, dass zentrale Kontrollstrukturen durch autonome, lokale Einheiten (Agenten) ersetzt werden können, die der angestrebten dezentralen Produktionsplanung und -steuerung entsprechen. Entsprechende Multi-Agenten-Systeme (MAS) [HW08] stellen seit geraumer Zeit ein aktives Forschungsfeld dar. Das Konzept der MAS basiert auf der Beschreibung des Verhaltens von spezialisierten, autonomen Einheiten (Agenten) zur kollektiven Lösung eines Gesamtproblems. Dabei ist die Referenzarchitektur intelligenter Agenten [Loc+06] an die Problem Instanz anzupassen – ein Beispiel für eine Referenzarchitektur ist u.a. ABSRM (Agent-Based System Reference Model), [Mod+06]. Stone [SV00] und [PL05] liefern einen Überblick zu MAS aus der Perspektive des maschinellen Lernens. Anwendungen von MAS sind in diversen Bereichen zu finden. Einen Überblick zur Anwendung von Multi-Agentensystemen in der Produktion liefert [MVK06]. Pipatanasomporn et al. [PFR09] verwenden MAS zur Modellierung eines verteilten intelligenten Stromnetzes. Chen et al. [CCP09] verfolgen den Ansatz von mobilen Agenten in einem MAS zur Maximierung der Flexibilität bei der dynamischen Verwaltung in komplexen Systemen am Beispiel der Verkehrsvorhersage. Nach [RN03] ist ein Agent unter anderem dadurch definiert, dass dieser autonom seine Umwelt über Sensoren wahrnimmt und in dieser Umwelt mittels Aktuatoren agiert. Insbesondere (optische) Sensoren und die Verarbeitung von Sensordaten bilden ein seit langem aktives Forschungsfeld.

3.2 Sensornetzwerke, Datenverarbeitung und -analyse

Aufgrund der methodischen Breite der zugrundeliegenden Methoden und Konzepte beschränkt sich die nachfolgende Darstellung auf punktuelle Ausführungen, die sich eng an Kernaspekten des Forschungsvorhabens orientieren. Zu nennen ist z.B. die Entwicklung ressourceneffizienter smarterer Sensoren und Aktoren, eventuell in einem Sensor-/Aktornetzwerk [BI98; Hen+98]. Einen aktuellen Überblick über „Selbstorganisierende Sensor-Aktor-Netzwerke“ liefert das namensgleiche „*DFG-Graduiertenkolleg 1194*“. Insbesondere gleichzeitige oder gekoppelte Informationsverarbeitung mehrerer (auch unterschiedlicher) Sensoren (Multi-Sensing) ist ein Feld aktueller Forschung [Tos+08] – dieses teilweise gekoppelt mit Optimierungs- und Adaptierungsmethoden zur Prozesszeit (Adaptive Sensing) [HR07; AA04; RW05]. Einen Überblick über aktuelle Anwendungen und Entwicklungen liefert auch die Zeitschrift „Sensors“ (MDPI Publishing) mit dem Sonderband „Adaptive Sensing“.

Insbesondere die Entwicklung ressourceneffizienter smarterer optischer Sensoren zur echtzeitkonformen Detektion und die Bereitstellung abgeleiteter Informationen stehen im Fokus aktueller Entwicklungen. Arbeiten zur echtzeitkonformen (Marker-)Detektion [OHH04; SSL07; LYL08] betrachten diese Aufgabe bisher nicht vereinheitlicht und im Trade-off von logistischen Randbedingungen (z.B. multipler Störungen) und Ressourcenbeschränkungen (insbesondere der Energie). Für Details sei auch auf die Veröffentlichungen des Fachverbands für Sensorik verwiesen [AMA10]. Neben klassischen CCD-Kameras treten aktuell verstärkt Time-Of-Flight (TOF)-Sensoren (PMD- oder Strukturiertes-Licht-Technologie) in den Vordergrund der Forschung. Neben zweidimensionalen Bildinformationen erlauben sie eine direkte Bereitstellung von Tiefeninformationen. Diese bereits zur Klassifizierung und Detektion von Objekten eingesetzte Technik [Gho+06] muss jedoch auf logistische Anwendungen adaptiert und teilweise erweitert werden, um die gewünschten Verbesserungen gegenüber herkömmlicher Technik zu erreichen (s.

Übersichtsbericht von Kolb et. al. [Kol+09]). Die Entscheidung, welche Plattform (beispielsweise Grafikkarten für nicht-grafische Berechnungen (GPGPU)) für Bildverarbeitungs- und Bildanalyse-Algorithmen – unabhängig vom Typ des optischen Sensors – am geeignetsten ist, wurde in verschiedenen Veröffentlichungen betrachtet [Cop+05; Mic06]. Die Nutzung solcher Systeme für zahlreiche Bildverarbeitungs-algorithmen wurde gezeigt [FM08; Owe+07], wie z.B. für Pattern-Matching [AK08], allerdings nicht unter den Ressourcenbeschränkungen dieses Vorhabens. Für einen Überblick sei auch auf die Standardwerke z.B. [GW01] und entsprechende Zeitschriften, etwa dem „Journal of Pattern Recognition“, „IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence“, „IEEE Transactions on Image Processing“ verwiesen. Besonders die gleichzeitige oder gekoppelte Informationsverarbeitung heterogener (intelligenter) Sensoren (Multi-Sensing und Sensorfusion) ist ein Feld aktueller Forschung [Tos+08], insbesondere unter Verwendung effizienter paralleler Verarbeitungseinheiten [Sha+09]. Einen Überblick über aktuelle Entwicklungen liefern die Journals „IEEE Sensor Journal“ und „ACM International Journal of Sensor Networks“. Die übergreifenden Querschnittsthemen des Vorhabens, Energieeffizienz und Energiemodelle in Sensornetzwerken, sind Gegenstand zahlreicher Publikationen [Gao+05; WX06] – einen Überblick liefern die Journals „IEEE Sensor Journal“ und „ACM International Journal of Sensor Networks“.

3.3 Optimierung

Neben den direkten CPS-assoziierten Konzepten liegt ein weiterer Schwerpunkt in der Optimierung der Vorgänge unter gleichzeitiger Beachtung verschiedener Nebenbedingungen und der damit verbundenen Notwendigkeit „Kompromisse“ zu identifizieren. Die damit verbundenen Optimierungsprobleme sind alle dem Bereich der diskreten Optimierung zuzuordnen. Das Ziel besteht darin, aus einer kombinatorisch definierten Menge zulässiger Lösungen eine bestmögliche (oder zumindest möglichst gute) Lösung zu bestimmen. Methodisch unterscheidet sich die diskrete Optimierung grundsätzlich von der kontinuierlichen Optimierung, wie sie etwa im Scientific Computing oder in der optimalen Steuerung üblich ist. In Anbetracht der Problemstellung des Vorhabens, welche sich mit einer Untersuchung/Bearbeitung von Netzen abstrahieren lässt, welche die einzelnen Agenten oder Aktoren/Sensoren repräsentieren, sind entsprechende Optimierungsprobleme mit Konzepten von Netzen oder allgemein Graphen (welche aus Knoten und Kanten bestehen) zu assoziieren. In dem beantragten Vorhaben gibt es mehrere, voneinander unabhängige Bewertungsfunktionen, wie z.B. die Länge, die Sicherheit, die Kosten und die Zeit eines (Verarbeitungs-)Weges, sodass ein multikriterielles Problem vorliegt. Da im Normalfall keine Lösung existiert, die all diese Kriterien gleichzeitig optimiert, wird die Menge aller pareto-optimalen Lösungen gesucht. Das sind diejenigen, die von keiner anderen Lösung dominiert werden. Im Gegensatz zum (1-kriteriellen) Problem, das in polynomieller Zeit relativ einfach gelöst werden kann, ist das multikriterielle Problem NP-schwierig, da die Anzahl der pareto-optimalen Lösungen theoretisch exponentiell sein kann. Allerdings hat sich gezeigt, dass praktische Instanzen oft nur polynomiell viele pareto-optimale Lösungen besitzen, die oft effizient berechnet werden können [MW01]. Innerhalb des Forschungsprojekts wird der Schwerpunkt auf Dijkstra-basierte Ansätze zur Berechnung pareto-optimaler kürzester (Verarbeitungs-)Wege gelegt, wie z. B. in Martins [Mar84] beschrieben. Methoden, wie z. B. in Delling und Wagner [DW09], führten bereits zu einer deutlichen Beschleunigung der Berechnungen. Liegen Unsicherheiten in den Daten vor, dann sind stochastische sowie robuste Lösungsverfahren relevant, welche die Unsicherheiten während der Optimierung berücksichtigen - unterschieden werden in der Literatur szenarienbasierte und intervallbasierte Unsicherheiten. Modelle zur Berücksichtigung von Unsicherheit in den Problemdaten werden u.a. in der robusten Optimierung betrachtet, s. z. B. [BEN09; BS03; KY97].

3.4 Monitoring und Assistenzsysteme

Insbesondere die Querschnittsthemen und die optimierten Prozesse aber auch die in CPS-konformen Produktionssystemen notwendige automatische und manuelle Kontrollen der Sensoren, Aktionen und Prozesse bedarf speziell geeigneter Mechanismen – der Stand der Technik zeigt hierzu erste Ansätze, die im Hinblick auf die Charakteristik „Wandelbarkeit“ innerhalb von Produktionssystemen angepasst werden

müssen. Beispielsweise präsentieren Massie et al. [MCC04] ein verteiltes Monitoring-System unter Einsatz einer hierarchischen Anordnung von Clustern basierend auf einem Multicast-Protokoll zur Zustandsüberwachung innerhalb der Cluster und Punkt-zu-Punkt Verbindungen zur Modellierung der Beziehungen zwischen den Clustern. In [VD10] wird ein automatisches Monitoring-System zur Überwachung des Energieverbrauchs maschineller Werkzeuge in Produktionssystemen, basierend auf Event Stream Processing (ESP) Technologien, vorgestellt. Dies mit dem Ziel der Minimierung des Energieverbrauchs. In [KPM10] finden Wireless Sensor Networks (WSN) in einem verteilten System zur Überwachung der Luftverschmutzung Anwendung. Neuronale Netzwerke werden in [MSA12] zur Vorhersage von durch Erdbeben verursachten Gebäudeschäden verwendet. In der Automobilindustrie ist die Entwicklung intelligenter und robuster Fahrerassistenzsysteme, z.B. zur automatischen Fußgänger Erkennung [Ger+10], stets ein Kernaspekt aktueller Forschung. Dies erfordert oft die Fusion multipler Sensordaten [Sal+13].

4 Eingehende Darstellung

Orientierend an der Struktur der Arbeitspakete (APs) respektive Unterarbeitspakete (UAPs) werden in diesem Abschnitt die technischen und wissenschaftliche Ergebnisse aufgeführt.

4.1 Technische Ergebnisse

Die nachfolgende Darstellung thematisiert ausgehend von der Struktur der Arbeitspakete, die im Projekt erzielten Ergebnisse in zusammenfassender Form. Für eine differenziertere Ausführung sei auf die im Projekt erarbeiteten Publikationen und Präsentationen verwiesen, welche im Abschnitt 4.2 angeführt werden.

AP1: Identifikations- und Anforderungsanalyse

UAP 1.1: Ist-Prozessdefinition (Referenzprozess)

Ausgehend von der Zielsetzung zur Bereitstellung einer methodischen Basis wurde der Stand der Technik identifiziert. Die Fokussierung lag dabei auf Verfahren und Hardwarekomponenten, die eine hohe Wandelbarkeit und Generalisierung ermöglichen. Grundlage der Arbeiten vonseiten der Technischen Universität Dortmund waren die umfangreichen Bestandsanalysen der industriellen Partner, insbesondere von VW und Continental. Zu untersuchende Fragen waren dabei, in welcher Form sich die bisherige Produktion in der Linie „aufbrechen“ lässt. Assoziierte Fragen waren außerdem, ob dies global oder nur in spezifischen Produktionsclustern möglich ist sowie, mit welchen Algorithmen eine entsprechende Identifikation erfolgt. Da entsprechende Produktionskonzepte bisher bereits in einem Vorranggraphen dargestellt werden, wurde als Verfahrensbasis ebenfalls Konzepte aus dem Bereich der Graph-/Flussalgorithmen genutzt. In entsprechenden Knoten-/Kanten-Darstellungen repräsentieren die Knoten singulare Produktionseinheiten. Der Ablauf der Produktion wird über die Konnektivität des Graphen modelliert. Zudem liegt ein gewichteter Graph vor. Dies bedeutet, dass Knoten und Kanten über Merkmalsvektoren nicht homogen gestaltet sind. Typische Beispiele für Kosten sind die Verarbeitungsdauer an einer Montagestation oder der Grad der Mehrfachnutzung von Montagestationen. Da diese Repräsentationsform einen Neuheitswert darstellt, wurde der Graph mit dem Begriff „Flexibility Graph“ versehen. Eine weitere neue Begrifflichkeit liegt mit dem sogenannten „Volumentakt“ vor. Über diese Einbettung können effiziente Algorithmen, beispielsweise zur (multikriteriellen) Flussoptimierung, zur Identifikation planerer Strukturen oder DAGs, aber insbesondere auch im Hinblick auf verschiedene Centrality Indizes genutzt werden. Eine detailliertere Darstellung der Konzepte ist der Publikation „Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs“ zu entnehmen, welche im International Journal of Automation Technology (IJAT) publiziert wurde.

UAP 1.3: Ableitung der Anforderungen

Innerhalb des vorliegenden UAPs erarbeiteten die Projektpartner verschiedene konzeptionelle Anforderungsprofile, um den SOLL-Zustand und IST-Zustand zu beschreiben, die Lücke und den Übergang zwischen diesen zu definieren sowie insbesondere den Trade- Off zu ermitteln. Aktuell liegt ein Schwerpunkt vonseiten der Technische Universität Dortmund in der Modellierung eines Optimierungsproblems, zusammen mit denen an AP 5 beteiligten Partner. Die Herausforderungen drücken sich durch die Heterogenität der Zielkriterien aus. Es treten sowohl nominale, ordinale, quantitative Werte auf. Diese gilt es in einen Merkmalsraum zu projizieren und sie zur Vermeidung von numerischen Instabilitäten zu normieren. In Anbetracht der Einbettung in die graphische Repräsentationsform (s. UAP 1.1) waren fortlaufende (z.B. Montage eines Objektes) und hierarchische (z.B. Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Objekten) Daten bei der Topologie zu berücksichtigen. Auf einer zweiten Ebene wurden Untersuchungen durchgeführt, ob bestehende Sensoren und Aktoren in der Lage sind, den gewünschten Grad an Flexibilität zu ermöglichen. Konkret bedeutet dies beispielsweise, dass für verschiedene Sensoren untersucht wurde, ob sie verschiedene Aufgaben übernehmen können. Diese beeinflussen dann die Gewichte im „Flexibility Graph“ über abweichende Grade der Mehrfachnutzung. Erste Auswertungen zeigen, dass dies teilweise zu deutlichen Abweichungen bei Anzahl und Größe von flexiblen Einheiten führt. Weitergehende Erkenntnisse flossen auch über die Bearbeitung von UAP 10.1 ein.

Die TU Dortmund hat als Forschungspartner mit hoher industrieller Affinität insbesondere Arbeiten in der Schnittstelle zwischen den Domänen Forschung und industrielle Nutzbarkeit geleistet. Es wurden u. a. umfangreiche Recherchen zu Normen durchgeführt, welche bei einer späteren Überführung in den industriellen Alltag zu beachten war. Foki lagen dabei auf den Sachverhalten Ressourceneffizienz und der Position des Menschen im Verbund. Damit assoziierte Teilaspekte sind die Energieeffizienz, insbesondere im Trade-off mit der Leistung, aber auch zukünftig zu beachtende ELSI-Konformität. Gerade der Mensch als omnipotente Komponente trägt zur Sicherstellung der Variabilität und Flexibilität im Produktionskontext bei. Es bedarf aber auch einer differenzierten Betrachtung zur Gewährung der Sicherheit und einer Erfahrungs- und Alters-unabhängigen Integration. Die erarbeiteten Konzepte wurden im UAP 10.2 „Regelvalidierung“ untersucht und im Rahmen einer Publikation zur Verfügung gestellt. Neben der konzeptionellen Betrachtung stand übergeordnet auch die Wirtschaftlichkeit im Fokus der Untersuchungen.

UAP 1.4 Projektmanagement

Die TU Dortmund hat zudem zusammen mit der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. und dem Konsortialführer (Logadata Digital Solutions) die Projektkoordination übernommen. Diese, in Anbetracht des Projektes, umfangreichen Arbeitstätigkeiten beinhalten die Sicherstellung des Arbeitsplanes, die Organisation der zweiwöchigen Telefonkonferenzen, die Organisation der Projekttreffen, Koordination von Publikationen und Berichten sowie die Öffentlichkeitsarbeit.

AP2: Produktionsplanung

UAP 2.3: Konzeption der Planungsalgorithmen

Die bereits in den Zwischenberichten adressierten Algorithmenklassen (z. B. evolutionäre Algorithmen, metaheuristische Suchverfahren, Simplex-Algorithmen, ILP-Modellierung, Rucksackproblem-Formulierungen) und deren Parametrisierung wurden softwaretechnisch geprüft und differenzierter an die Problemstellung angepasst. Eine wesentliche Erkenntnis war, dass eine Graph-basierte Einbettung im Sinne der Nachhaltigkeit die höchsten Erfolgsaussichten hat. Die resultierende Knoten-Kanten-Struktur, bei dem die Knoten mögliche Stationen (zur Produktion, Montage) beschreiben und die Kanten erlaubte Wege, ist von hoher Komplexität (s. [Boc+15]). Eine Herausforderung war, dass klassische Graphalgorithmen eine Topologiekonformität voraussetzen, welche im allgemeinen Fall nicht zu gewähren ist. Zudem liegt keine statische Instanziierung vor, welche umfangreiche Update-Mechanismen erfordert.

Eine ergänzende Herausforderung liegt in Knoten- und Kanten-assozierten Gewichten, welche dabei zudem durch hochdimensionale Merkmalsvektoren beschrieben werden.

Im Rahmen der Modellierung mittels Integer-Linear-Programming (ILP) wurde die Füllung des Volumentaktes unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien wie Liefertreue, Kosteneffizienz, Energieeffizienz, etc. oder (gewichtete) Kombinationen daraus abgebildet. Dabei stellte sich heraus, dass das dahinterstehende Problem NP-vollständig ist, da ganzzahlige Ergebnisse bzw. Einschränkungen (d. h. Zuordnungen von Kundenaufträgen zu Volumentakten) unabdingbar sind. Eine ILP-Relaxierung wurde hinsichtlich der Tragfähigkeit untersucht. Unter einem stark eingeschränkten Szenario konnte dies als nutzbar evaluiert werden. In praktischen Situationen ist die Dimensionalität des Parameterraums jedoch so hoch, dass etwaige LP-Solver zu lange rechnen würden (NP-Vollständigkeit).

In Bezug auf die Modellierung der Produktionsabhängigkeiten konnten gerichtete, azyklische Graphen also tragfähig identifiziert werden. Darin definieren die Knoten Prozessschritte im Produktionsprozess. Die Kanten legen fest, welche Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten bestehen. Überdies legen weitere Annotationen pro Knoten fest, welche Fähigkeiten für die Durchführung der assoziierten Prozesse benötigt werden und welche Materialien bzw. Bauteile verfügbar sein müssen. In Abhängigkeit der Detail-Modellierung kann etwa der längste Weg im Graphen [Boc+15] den kritischen Produktionspfad identifizieren. Treten auf diesem Verzögerungen auf, so ist eine Verzögerung der Produktion als sicher anzusehen, wenn dieser nicht außerplanmäßig in anderen Schritten eingespart werden kann.

AP4: Produktionssteuerung

UAP 4.1: Entwicklung eines Konzeptes zur dezentralen Produktionssteuerung auf Basis eines MAS

Zur flexiblen Integration von Störgrößen und zur Evaluierung von Konzepten für den Maxi-Demonstrator (siehe UAP 11.2) wurde durch die TU Dortmund ein überarbeitetes MAS für den Mini-Demonstrator implementiert. Im Zuge dessen wurden die zentralen Komponenten des MAS sowohl im Bezug auf die eingesetzten Software-Frameworks und Kommunikationsschnittstellen harmonisiert, als auch Maßnahmen zur Härtung gegen extern bedingte Störeinflüsse der Kommunikation integriert (siehe auch UAP 4.3). Diese Änderungen resultierten in der Entwicklung des Mini-Demonstrator MAS 4.0, welches auf mehreren Veranstaltungen (Automatica 2016, Abschlusspräsentation) sowie bei der Durchführung von Abschlussarbeiten erfolgreich eingesetzt werden konnte.

Der Beitrag der TU Dortmund lag u.a. in der Einbringung von Konzepten zum Offloading, da dies im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Sensordaten (AP 9) und der Verfügbarkeit von zugehöriger Kommunikationsmiddleware (AP 8) bedeutsam ist. Es wurden hierzu Algorithmen entwickelt, die eine Auslagerung von Berechnungsschritten ermöglichen. Dabei wurden verschiedene Zielvorgaben untersucht und als Optionen zur Verfügung gestellt. Neben der Sicherstellung von harten und/oder weichen Zeitschranken wurde auch die Ressource Energie betrachtet, da speziell Akku-betriebene Fahrzeuge unterstützt werden müssen. Neben diesen Hardware-assozierten Zielvorgaben wurden auch Mechanismen aus Sicht der Bildverarbeitung genutzt. Diese lagen in der adaptiven Bestimmung einer ROI oder im zielgerichteten Mapping von Algorithmen. Da es sich dabei teilweise um selbstadaptive, lernende Ansätze handelt, wurden die Ergebnisse dieser Untersuchung als Beitrag auf der „First Conference on Machine Learning for Cyber Physical Systems and Industry 4.0 (ML4CPS)“ präsentiert.

Zusätzlich wurde im Rahmen der flexiblen Integration von Störgrößen in die Testplattform des Mini-Demonstrators die MAS-Architektur im realen Testbetrieb eingehend analysiert und strukturelle Defizite bezüglich der Portierung der Konzepte auf den Maxi-Demonstrator identifiziert. Daraufhin wurde ein erweitertes Konzept für wesentliche Teile der MAS-Architektur entworfen und umgesetzt (siehe Abschnitt 4.1), um mehrere Varianten von Störgrößen sowie Ansätze zu deren dynamischer Behandlung vor der Portierung auf den Maxi-Demonstrator evaluieren zu können.

UAP 4.3: Definition bzw. Spezifikation der konzeptionellen Vernetzung der Fertigungsmaschinen sowie der ver- und entsorgenden Materialflusseinheiten

Zur Beurteilung der grundsätzlichen Eignung verschiedener Kommunikationskonzepte und existierende Kommunikationsprotokolle wurden durch die TU Dortmund in Kooperation mit den Projektpartnern IML, Lanfer und Logata multiple Kommunikationsprotokolle wie AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), Webservices, MQTT (Message Queue Telemetry Transport) und KUKA RSI (Remote Sensor Interface) evaluiert. Dazu wurden prototypische Schnittstellen zu den im Mini- und Maxi-Demonstrator geplanten Gewerken implementiert und die Interoperabilität sowie die anwendungsbezogene Eignung existierender Bibliotheken untersucht. Dabei konnte die AMQP-Bibliothek RabbitMQ als geeigneter Kandidat für die Gewerk-übergreifende Kommunikation im Maxi-Demonstrator identifiziert werden. Für die Implementierung der Webservices zur Anbindung der Lagersysteme durch den Projektpartner Logata erwies sich ein REST (Representational State Transfer)-basierter Ansatz als tragfähig. Einen Schwerpunkt dieser Untersuchungen bildete die Evaluierung des Einsatzes von preisgünstigen Komponenten aus dem Bereich der Konsumer-Elektronik. Diese wurden vor allem im Kontext des Mini-Demonstrators eingesetzt. Hier zeigte sich, dass insbesondere Geräte zur Drahtloskommunikation mangels nicht dem Einsatzzweck entsprechend dimensionierter Filter der zugehörigen Netzteile anfällig für durch große Industriemaschinen erzeugte Störsignale sein können. Diesem Problem wurde durch Simulation multipler Störfaktoren und die Integration von Konzepten zur dezentralen Erkennung von Kommunikationsstörungen begegnet.

Innerhalb der Arbeiten zum UAP wurden zudem Untersuchungen zur Modellierung adaptiver dynamischer Netzwerke durchgeführt. Da einer Detaillierung der Transportauftragsschnittstelle in gleichem Maße eine Zunahme von Informationen bedeutet, stellt die Härtung der Kommunikationskomponenten auch eine Voraussetzung dar. Teilaspekte zur Spezifikation waren Simulationen von drahtgebundenen oder drahtlosen Netzwerken als mögliche Limitierung durch eingeschränkte Funkverbindungen. Speziell im Zusammenhang des Mini-Demonstrators konnten hinsichtlich der Vernetzung von Agenten Erkenntnisse bzgl. stabiler und robuster Kommunikationspfade über Drahtlosnetzwerke gewonnen und weiterentwickelt werden. Neben den Kerndaten war auch eine Integration von Metadaten zu beachten. Diese dienen u. a. der Projektion von Mensch/Maschine-Interaktionskomponenten auf die reale Benutzungsschnittstelle. Auch wurden Arbeiten zur Modellierung eines Umweltmodells durchgeführt, welche im Zusammenhang mit dem AP 6 „Monitoring“ von Bedeutung ist. Zur Vorbereitung der Aufgaben zur Auftrags- und Ressourcenüberwachung im Rahmen des Monitorings wurden sowohl für die Systeme des Mini- als auch des Maxi-Demonstrators multiple Schnittstellen zum Austausch entsprechender Daten spezifiziert und realisiert.

UAP 4.4: Entwicklung eines übergreifenden Informationsmodells zur idealen Informationsversorgung der smarten Einheiten

Innerhalb dieses Arbeitspakets war die TU Dortmund zusammen mit dem Kooperationspartner IML maßgeblich an der Umsetzung der entwickelten Konzepte zum Informationsmanagement im Mini-Demonstrator beteiligt. Hierbei wurden Aspekte der Parametrisierung/Konfiguration des Fehlermanagements zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und zur Fehlerdetektion/-kompensation sowie Mechanismen zur Leistungs- und Qualitätsüberwachung berücksichtigt. Zusätzlich wurden Experimentierumgebungen zur praxisnahen Verifikation und zur Optimierung der entwickelten Konzepte realisiert (siehe wissenschaftliche Ergebnisse). Im fortgeschrittenen Projektstadium umfassten die Arbeiten außerdem die Portierung von Teilaspekten des Informationsmodells auf den Maxi-Demonstrator. Überdies werden Mechanismen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und zur Fehlerdetektion/-kompensation eingesetzt. Konkret werden Nachrichten mit MD5-Summen versehen.

Die Entwicklung eines übergreifenden Informationsmodells aufseiten der TU Dortmund erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Arbeiten zu den APs 8 „Kommunikation und Lokalisation“ und 9 „Sensorik und Aktorik“, da gerade die Ressourcen Verarbeitungszeit und Energie hierbei besonders zum Tragen kommen. Exemplarisch sei das Kommunikationsmodell im Zusammenhang mit der Lokalisation bei

der Erweiterung des Mini-Demonstrators genannt. Neben örtlich lokalen Ausfällen stellen dynamische Restriktionen (bewegliche Hindernisse) eine große Herausforderung dar. Das Informationsmodell muss hierzu den Sicherheitsbereich des zu lokalisierenden Fahrzeugs im Bezug zur Genauigkeit der Sensor-gestützten Lokalisation, einer beschränkten Energiebereitstellung durch den Akku und möglichen Latenzen im Kommunikationsnetz berücksichtigen.

Das im Mini-Demonstrator verwendete Informationsmodell für die mobilen Agenten wurde in enger Kooperation mit dem Projektpartner IML an die erweiterten Bedürfnisse des Maxi-Demonstrators adaptiert und erweitert. Dabei wurde für alle beteiligten Agenten der FTS und Gewerke eingehend analysiert, welche Menge an Informationen diese bereitstellen können, welche dieser Informationen für andere Agenten relevant sind und in welcher Frequenz eine Bereitstellung dieser Informationen erfolgen muss. Zur Gewährleistung eines effizienten Informationsaustauschs wurde bei der Entwicklung des Informationsmodells eine Minimierung des Volumens des Datenverkehrs angestrebt. Dabei zeigte sich, dass eine hohe Änderungsrate einer Information nicht automatisch eine hochfrequente Kommunikation derselben implizieren muss. Zusätzlich ist die Einführung von Meta-Informationen, wie beispielsweise aus Rohdaten abgeleiteten Statusinformationen geeignet, um die notwendige Nutzlast hochfrequent benötigter Nachrichten signifikant zu senken. Dabei wurden entsprechend der Anforderungen sowohl Publish/Subscribe als auch Service-basierte Abfragemechanismen eingesetzt. Die bei der Realisierung des Mini-Demonstrators gewonnenen Erkenntnisse über die eingesetzten Informationsmodelle für die Kommunikation über ROS, RabbitMQ und Webservices konnten in verschiedenen Bereichen des Maxi-Demonstrators erfolgreich wiederverwendet werden.

AP5: Planungssystem

UAP 5.1: Modellierung einer multikriteriellen Zielfunktion zur Bewertung von verteilten Prozessen

Zur Verifikation der von den Projektpartnern erarbeiteten Bewertungskonzepte wurde der Mini-Demonstrator durch die TU Dortmund um Schnittstellen zur Miteinbeziehung multikriterieller Entscheidungs-module erweitert. Aufgrund der aus Platzgründen geringen Komplexität des Mini-Demonstrators konnte eine realistische Integration dieser aber erst nach Portierung auf den Maxi-Demonstrator durch den Kooperationspartner IML erzielt werden.

Initial wurde der Stand der Technik im Hinblick auf vorhandene Optimierungsverfahren und bestehende (Software-)Lösungen untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt der Arbeiten der TU Dortmund auf der methodischen Seite. Die Partner, insbesondere F/L/S und das Fraunhofer IML konzentrierten sich auf bestehende Lösungen. Dabei wurden auch explizit die bestehenden eigenen Lösungen Qualicision sowie OTD-Net bzw. OTD-Inside berücksichtigt, da sie bereits erfolgreich in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Vonseiten der TU Dortmund wurden ausgehend von dem algorithmischen Kenntnisstand und dem durch die Projektpartner erarbeiteten, zu berücksichtigenden Zielkriterien analysiert, ob die bestehenden Verfahren den Anforderungen genügen. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die bestehenden Ansätze in unterschiedlicher Ausprägung aus heutiger Sicht zum Einsatz kommen können, im Hinblick auf die Anforderungen aber noch Anpassungen/Erweiterungen notwendig sind. Insbesondere die Modellierung des Optimierungsproblems stellt ein Problem dar.

UAP 5.2: Entwicklung von Optimierungsverfahren zur optimalen Produktionsprozessplanung

Im Kern der Arbeiten aufseiten der TU Dortmund stand die Portierung der im Vorfeld identifizierten und theoretisch modellierten Szenarien auf eine reale Anwendung. Da entsprechende Umsetzungen entweder synthetische oder realkonforme Daten verlangen, stand mit dem Mini-Demonstrator eine ideale Plattform zur Verfügung. Im Hinblick auf die Skalierung der Ansätze wurden die Freiheitsgrade im Mini-Demonstrator erhöht - dies durch eine Vergrößerung der Bewegungsfläche und durch eine höhere erlaubte Variantenvielfalt eines ausgezeichneten intelligenten Fahrzeugs. Es zeigte sich, dass klassische Kürzeste-Wege-Algorithmen in ihrer Grundversion nicht den Anforderungen entsprechen. Dabei waren

die Unsicherheit der Mess- und Bewegungsdaten und das inhärente multikriterielle Problem, Limitierungen, die erst durch Erweiterungen und Neuentwicklungen kompensiert werden konnten. Damit sich Agenten dezentral ohne a priori Wissen erkennen können, wurde ein Konzept zur Agenten-Identifikation entwickelt, welches auf dem gegenseitigen Austausch von Heartbeat-Nachrichten basiert. Dieses ermöglicht das dynamische Hinzufügen und Entfernen von Agenten zur Laufzeit. Überdies wird damit eine Online-Optimierung (etwa im Sinne der Auftragszuteilung) erst ermöglicht. Zur Planung optimaler (d.h. kürzester) Pfade wurde ein in eine beschränkte Delauney-Triangulierung eingebetteter A*-Algorithmus eingesetzt. Bei der Wegfindung können zudem Deadlocks auftreten, welche durch Tests auf Kreisfreiheit im Ressource-Allokationsgraphen detektiert werden können.

Unter Beachtung der in UAP 5.1 ausgeführten Sachverhalte lag ein weiterer Bearbeitungsschwerpunkt der TU Dortmund in der Integration von modernen Verfahren gemäß dem Stand der Technik und in der Identifikation und Bereitstellung von annotierten Testdaten zur Validierung der entwickelten Verfahren. Auf dieser Ebene erfolgte ein Abgleich mit AP 10. Methodisch folgte die TU Dortmund weiterhin der im Antrag vorgestellten Zielsetzung im Hinblick auf pareto-optimale Dijkstra-Verfahren. Der Vorteil dieser graphbasierten Verfahren lag in der mehrfachen Verwendung auf allen Planungsebenen. In diesem Zusammenhang sei auf die Graph-Einbettung innerhalb von AP 1 hingewiesen. Auch wurden weiterhin Untersuchungen durchgeführt, die veränderte Knotenpositionen als auch eine veränderte Anzahl von Knoten berücksichtigten. Durch topologische Veränderungen konnten Überschneidungen im Graph resultieren, die auf praktischer Seite zu Kollisionen im Produktionsprozess führen konnten und durch Methoden der Kollisionserkennung/-vermeidung kompensiert werden mussten. Deadlocks, so zeigten die Betrachtungen, können heutzutage in der Linienfertigung durch ein unwirtschaftliches Warten vermieden werden. Methodisch anspruchsvoller ist eine veränderte Knotenanzahl. Ein entsprechendes Konzept zum dynamischen Hinzufügen und Wegnehmen von Produktionsinseln wurde an die Konzepte des Mini-Demonstrator adaptiert und im Hinblick auf Erweiterungsfähigkeit im Maxi-Demonstrator optimiert.

AP6: Monitoring und Assistenzsysteme

UAP 6.1: Erarbeitung von Konzepten zum dezentralen Monitoring und zur Prädiktion sowie Klassifikation von (kritischen) Zuständen

Konzeptionell wurden zwei Herangehensweisen bearbeitet. Eine Zielrichtung ist die Entwicklung einer mobilen Lösung in Form einer App. Die Entwicklung erfolgt unter der aktuellen Android-Version, um eine ausgeprägtere Mensch-Maschine-Interaktion zu ermöglichen. Die Benutzungsschnittstelle zeigt die „Produktionshalle“ in einer schematischen Darstellung inklusive aller „Akteure“. Akteure sind alle Objekte, zu denen spezifische Informationen zur Verfügung stehen. Dies können Aktoren aber auch das Lager oder Tore sein. Diese Informationen können interaktiv abgefragt werden. Hierzu wurde auch ein Mechanismus zur variablen Skalierung („Zoomen“) realisiert. Akteure unterscheiden sich zudem in ortständige (z.B. das Lager) und nicht ortständige (z.B. Fahrerlose Transportsysteme) Ausprägungen. Bei den nicht ortständigen Akteuren wird die Position kontinuierlich angepasst. Diese, über verschiedene Web-Services realisierten Aktualisierungen, erfolgen auch für die ortständigen Akteure, sodass eine durchgängig aktuelle Ansicht und Statuswiedergabe gegeben ist. Neben der eigentlichen softwaretechnischen Konzeptionierung mussten auch Dienste für die realen Akteure zur Datenübermittlung erarbeitet werden. Die zweite Ebene der Software beinhaltet die Eingabe und Manipulation von Störgrößen. Es ist dabei die Idee, die Auswirkungen von Störgrößen (z.B. Ausfall einer Produktionsinsel) im Vergleich zwischen der bisherigen unflexiblen Serienfertigung und dem innerhalb des Projektes entwickelten neuen, adaptiven Ansatz zu untersuchen und zu visualisieren. Neben der mobilen Variante befindet sich noch eine zweite Version als Desktop-Lösung in der Umsetzung. Diese konzeptionell vergleichbare Version bietet umfangreichere Visualisierungs- und Interaktionsmöglichkeiten. Beide Versionen nutzen die Web-basierten Dienste zur Aktualisierung ihrer Daten. Für beide Arbeiten war es möglich, jeweils einen Studierenden zu gewinnen, der Teilaspekte innerhalb seiner Abschlussarbeit respektive seines Praktikums gewinnt. Der Mehrwert ist, dass Studierenden frühzeitig die Möglichkeit gegeben wird, ihre theoretischen Konzepte auf aktuellen Forschungsfragen anzuwenden [Pin15; Söz15].

Die diesem UAP zugeordneten Arbeiten repräsentieren damit vom Prinzip eine Veredlung des Assistenz- und Visualisierungssystems, welches in den nachfolgenden Ausführungen zu den UAPs 6.2 und 6.3 thematisiert wird. In Anbetracht der Komplexität der Fragestellung zeigten die ersten Zwischenergebnisse, dass eine integrierte Umsetzung höchst wahrscheinlich nicht erfolgreich ist. Daher wurden die Teilaspekte Prädiktion und Klassifikation separat gelöst und erst nachfolgend fusioniert. Für den ersten Teilaspekt der Prädiktion erwiesen sich Zeitreihen-assoziierte Verfahren und Verwendung von Multiskalenfeatures als geeignet. Die Zuweisung einer Semantik zu bestehenden Inhomogenitäten (somit einer Klassifikation) konnte über etabliertes Lernverfahren in erster Konsequenz nicht zufriedenstellend gelöst werden. Erfolgreich waren Ansätze im Zusammenhang mit Random Forest und Deep Learning. Teilaspekte waren auch die Operationalisierung dieser Verfahren im Hinblick auf verschiedene Zielplattformen (variable Ressourcen) und eine geeignete Benutzungsschnittstelle (s. UAPs 6.2 und 6.3).

UAP 6.2: Überwachung und Visualisierung von sensorischen und aktuatorischen Zuständen mittels adaptiver (mobiler) Benutzungsschnittstellen

Die Ergebnisse dieses UAPs wird nachfolgend integriert mit UAP 6.3 beschrieben.

UAP 6.3: Entwicklung multimedialer Assistenzsysteme zur Produktionsprogrammplanung

Die nachfolgende Darstellung fasst die Ergebnisse der UAPs 6.2 und 6.3 innerhalb einer Beschreibung zusammen, da die Erarbeitung eines multimedialen Assistenzsystems die Realisierung einer geeigneten grafischen Interaktions- und Visualisierungsschnittstelle voraussetzt. Entwickelt wurde eine Plattform-unabhängige Schnittstelle in Form einer App. Untersucht wurden dabei die Realisierung als Qt-Anwendung als auch unter Verwendung der Programmierungsressourcen von Android. Als Modi wurden sowohl die klassische 2D-Ansicht („Vogelperspektive“) und die immersivere 3D-Darstellung umgesetzt. Im Rahmen der Durchführung multipler Probandenstudien wurde die generelle Bedienbarkeit sowohl der 2D- als auch der 3D-Lösung durchweg sehr positiv bewertet. Als Nachteil gegenüber der 3D-Darstellung wurde bei der 2D-Ansicht die aufgrund der notwendigen Abstraktion geringere initiale Intuitivität der Repräsentationen der dargestellten Objekte identifiziert. Bei der detailreicheren 3D-Darstellung wurde von den Probanden dagegen vorrangig der signifikant höhere Konstruktionsaufwand bei der Integration neuer Objekte, respektive der Anpassung an neue Umgebungen als problematisch wahrgenommen. Die Beurteilung der praktischen Güte der beiden Konzepte hängt daher stark vom Anwendungsfall ab, wobei die 2D-Darstellung ihre Vorteile besonders in dynamisch veränderlichen Szenarien ausspielen kann, während die 3D-Darstellung Vorteile bei statischen aber bezüglich der enthaltenen Objekte komplexen Szenarien bietet. Zur transzendenten Verwendung der Assistenzsysteme wurden wesentliche Aspekte der datentechnischen Anbindung und Steuerung über ROS realisiert, da sich das Betriebssystem im Mini-Demonstrator als stabil und nachhaltig erwiesen hat. Es wurde daher untersucht ob und mit welchen Anwendungen vorliegende Lösungen direkt in den Maxi-Demonstrator transferierbar waren, um den Vorteil zu nutzen, bereits erarbeitete Konzepte zur Zustandsüberwachung (Normal- und Fehlerfall) mittels ROS auf verschiedene Aktoren überführen zu können. Dies wurde für die FTS und dem vorhandenen Roboter in der ZFT-Halle exemplarisch durch Integration einer ROS-basierten, vernetzten Hardwarekomponente zur Steuerung umgesetzt. Dabei konnten bei der Verwendung von ROS signifikante Vorteile bezüglich der Flexibilität der Kommunikationsstrukturen festgestellt werden, während die nicht ROS-basierte Variante Vorteile bezüglich der Echtzeitfähigkeit aufwies. Durch das angeführte generische Softwarekonzept ist eine Nutzung sowohl auf Desktop und mobilen Geräten möglich. Im Zusammenhang mit Ortungsdiensten steht ein Mechanismus zur flexiblen Visualisierung zur Verfügung. In gleicher Form erlaubt die MMI-Schnittstelle umfangreiche Assistenz- und Manipulationsfunktionen. Dabei wurden durchgehend Konzepte der adaptiven ROI und geeigneten Information-Hiding an die Fragestellung angepasst, um eine Überforderung des Menschen zu verhindern.

Begleitend zur Entwicklung des Mini-Demonstrators wurde die ROS-basierte Systemumgebung stetig um visuelle und protokollarische Methoden zur Analyse Systemzustands erweitert. Hierbei wurde insbesondere das ROS-basierte Visualisierungstool RViz um multiple Aspekte zur Überwachung der Agen-

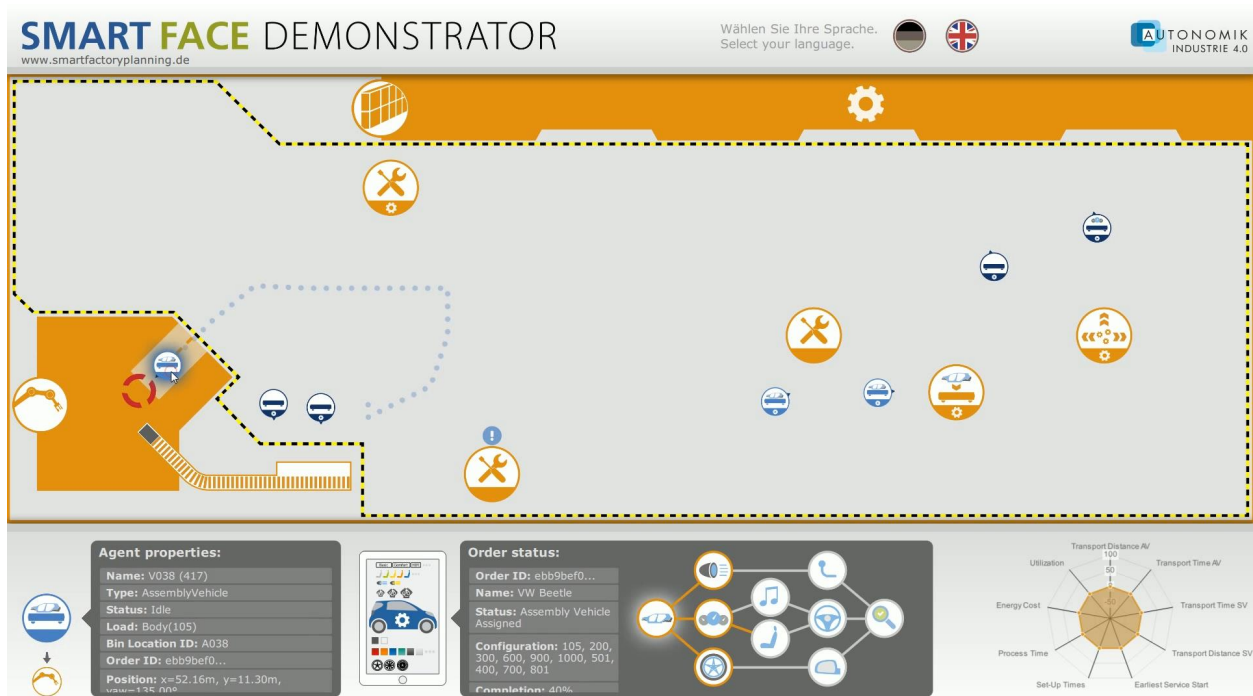


Abbildung 3: Screenshot der Maxi-Demonstrator-Visualisierung

tenfunktionalität wie eine Fahrweganzeige, Visualisierung von Sensorwerten und die Visualisierung von Metainformationen basierend auf dem aktuellen MAS-/Planungs-/Kommunikationszustand erweitert. Die Darstellung von Meta-Informationen, war besonders für die betriebssimultane Überwachung der autonom getroffenen Handlungsentscheidungen der Fahrzeugagenten von Bedeutung. Exemplarisch sei hier die Darstellung von Kollisionsboxen, Sensitivitätsbereichen, geplanten Fahrwegen und Belegungszuständen von Arbeitsstationen genannt. Die Visualisierungen wurden dabei nicht nur ortsgebunden an einem zentralen Überwachungssystem verfügbar gemacht, sondern simultan auf mobilen Einheiten, was sich insbesondere bei der wesentlich größeren Fahrfläche des Maxi-Demonstrators als Vorteil erwies. Einige der Zustandsinformationen (z.B. eine aktive Kollisionserkennung), wurden zusätzlich mittels spezieller, direkt an den Agenten angebrachter Hardware wie LEDs visualisiert, um eine an die jeweiligen Agenten ortsgebundene Verfügbarkeit zu garantieren.

Für den Maxi-Demonstrator wurden durch die TU Dortmund umfangreiche Arbeiten zur Bereitstellung umfassender Monitoring-Methoden durchgeführt. Basierend auf einer initialen Analyse der geplanten Gewerke und einer anschließenden Datenaufbereitung (siehe UAP 8.3) wurde ein Konzept für ein Endbenutzer-taugliches Monitoring-System entworfen. Dies beinhaltete die Zusammenführung von Daten aller beteiligten Gewerke sowie eine direkte Anbindung an diese und an das zentrale durch den Kooperationspartner IML entwickelte MAS. Um die im Systemkonzept vorgesehene Bedienung über sowohl ein zentrales großformatiges Touch-Display, als auch auf mobilen Tablet-ähnlichen Geräten sicherzustellen, wurde das System auf der Basis der Bibliotheken Qt und QML (Qt Meta-object Language) entwickelt. Das Erscheinungsbild der Oberfläche wurde dabei unter Beachtung der zuvor für das Projekt entwickelten Farb- und Formensprache entworfen, um eine intuitive Verständlichkeit bei öffentlichen Präsentationen zu gewährleisten. Die Hauptkomponente der Visualisierung stellt dabei eine maßstabsgetreue Ansicht der Fahrfläche des Maxi-Demonstrators dar, auf der in Echtzeit Repräsentationen für FTS (Führerlose Transport-Systeme), ein Hochregallager, eine Roboterzelle mit angebundener Stetigförderertechnik sowie Arbeitsstationen visualisiert werden (siehe Abbildung 3). Die Akquise dieser Informationen (siehe UAP 8.3) erfolgt über multiple, für alle beteiligten Gewerke realisierte Schnittstellen. Für alle aktiven Agenten sind daher umfangreiche Detail- und Meta-Informationen abrufbar, die je nach Agententyp erheblich variieren. Dies umfasst eine Lagerverwaltung für alle im System befindlichen Produktionsteile

inklusive deren Verfügbarkeit ebenso, wie eine Anzeige geplanter Fahrwege, des Bewegungszustands des Roboters und der Position von Produktionsteile auf Fahrzeugen und der Stetigfördertechnik in Echtzeit. Zusätzlich ermöglicht das System die Echtzeitüberwachung der Produktionsaufträge. Dabei wird eine intuitive Darstellung der den Aufträgen zugeordneten Vorranggraphen bereitgestellt, die mit Statusinformationen über die Fertigstellung sowie Details zu den verbauten Produktionsteile angereichert ist. Für alle abgeschlossenen Produktionsschritte ist zudem die Parametrisierung der vom Kooperationspartner FLS berechneten Qualicision-Werte abrufbar, welche zur Auswahl der jeweiligen Produktionsschritte geführt haben. Dadurch wird auf einer Controlling-geeigneten Abstraktionsebene eine umfassende und effiziente Echtzeitkontrolle der Systeme des Maxi-Demonstrators ermöglicht.

AP7: Steuerungssimulation

UAP 7.2: Realisierung einer algorithmisch und softwaretechnisch effizienten Simulation

Die Arbeiten der TU im Zusammenhang mit der Simulation wurden in die Teilaspekte Modellierung, Lösungsverfahren für die Simulationsinstanz und Interaktionsschnittstelle separiert. Dabei stellte die Modellierung aufgrund der Heterogenität der Komponenten (u. a. Roboterzelle, Fördertechnik, mobile Roboter) eine Herausforderung dar, da in gleicher Form Freiheitsgrade bzgl. der Mobilität, der zeitlichen und örtlichen Auflösung aber auch im Hinblick auf sekundäre Störgrößen (z. B. Reibung der Räder) zu berücksichtigen waren. Entsprechend dieser Anforderungen wurde ein generisches Modell erarbeitet, welches auch den Anforderungen entsprechender Lösungsverfahren genügt. Die eingesetzten Lösungsverfahren lassen sich der Gruppe der Meta-Optimierung zuordnen, wobei im Hinblick auf den zu erzielenden Parallelisierungsgrad GPU-gestützte Konzepte zum Tragen gekommen sind. Bei der Interaktionsschnittstelle wurde neben einer geeigneten Visualisierung auch auf intuitive Parametrisierungsmöglichkeiten geachtet. Die Überführung der klassischen linearen Produktion zu einer flexiblen Produktion setzt zudem voraus, dass auch Arbeiter dieser Flexibilisierung folgen können und nicht überfordert werden. Ausgehend von dieser Betrachtung wurde durch die TU Dortmund, teilweise auch innerhalb von Abschlussarbeiten untersucht, ob eine Virtualisierung bzw. Augmentierung von Informationen hilfreich ist. Neben den technischen Umsetzungen wurden auch erste Versuche im Hinblick auf eine Gamification durchgeführt.

Wegen der aufgrund zeitlicher Ressourcen begrenzten realen Skalierbarkeit der Systeme des Mini- und Maxi-Demonstrators, wurden multiple hochskalierbare Simulationsumgebungen (Stage, Gazebo, V-REP) an die im SMART FACE Kontext erforderlichen Rahmenbedingungen adaptiert und entsprechende Simulationen durchgeführt. Dabei wurden sowohl Experimente mit abweichender Hardware der simulierten Agenten durchgeführt (z.B. verfügbare Sensoren und Aktuatoren), als auch verschiedene Varianten bezüglich der zugrundeliegenden Kommunikationsarchitektur evaluiert. Dabei erwiesen sich die hohe Anzahl der simulierbaren Agenten und die Variierbarkeit der Simulationsgeschwindigkeit insbesondere bei der Evaluierung von Deadlock-Szenarien als vorteilhaft.

AP8: Kommunikation und Lokalisation

UAP 8.1: Entwurf einer durchgängigen Kommunikationsstruktur für Produktionsanlagen und Materialflusssysteme

Innerhalb des vorliegenden UAPs wurde durch die TU Dortmund ein Lokalisationssystem auf Basis von ROS (Robot Operating System) entwickelt. Die Zielsetzung war, dass sich verschiedene mobile Systeme, welche über einen Laserscanner (Modell TiM der Firma Sick) verfügen, ohne weitere externe Ortsinformationen, lokalisieren können. Hierzu wurde ein verändertes SLAM-Verfahren (Simultaneous Localization and Mapping) realisiert. Teilaspekte waren ein Scan Matching zur Fusion der Daten und eine nachfolgende Featureextraktion. Dabei war es notwendig, spezifische saliente Landmarks zu identifizieren. Diese dienten zur initialen Lokalisation/Kalibrierung und erlaubten einen globalen Nullpunkt zu bestimmen. Über Mechanismen der Feature-Assoziation wurde eine semantische Zuordnung getroffen. Dies beinhaltet eine Differenzierung in statische Strukturen (z.B. Wände) und bewegliche und

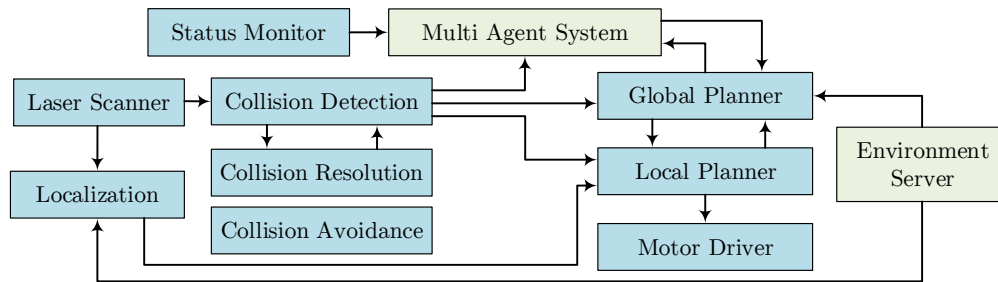


Abbildung 4: Vereinfachte Sicht auf die entworfene Software-Architektur basierend auf ROS [Qui+09]: blaue Komponenten werden auf dem Agenten ausgeführt, grüne auf einem separaten Server-Backend

nicht bewegliche Hindernisse. Dabei waren auch differenzierte Eigenschaften der Lasermodalität (u.a. Reflexionsverhalten) zu berücksichtigen.

Zur Sicherstellung eines modularen Ansatzes wurden entsprechende Parameter als Freiheitsgrade definiert, die sich innerhalb einer Kalibrierungsphase an veränderte Sachlagen anpassen können. Über Testphasen wurde zudem deutlich, dass eine Bahnplanung über eine alleinige Verwendung von Eigenschaften optischer Sensoren keine ausreichende Güte erlaubt. Daher wurden diese Daten mit Informationen aus der Odometrie für eine erhöhte Stabilität fusioniert. Besondere Herausforderungen lagen auch in der Skalierbarkeit der Lösung bei verschiedenen Fahrzeuganzahlen und Geschwindigkeiten. Zudem zeigte sich bei den Arbeiten im Hinblick auf den Mini-Demonstrator, dass auch ein eingeschränkter Betrachtungsraum mit einer entsprechend kleineren Unsicherheitstoleranz eine zusätzliche Herausforderung darstellt. Da Montagehallen, beispielsweise bei VW, auch eine hohe Anzahl von Produktionseinheiten pro Fläche aufweisen, ist die Eigenschaft gleichzeitig ein realer Testfall.

In Ergänzung der Notwendigkeit präziser Lokalisierungsinformationen wurde die Sensorfusion mit visueller Odometrie gekoppelt [Chi16]. Dazu wurde auf dedizierter eingebetteter Hardware (RaspberryPi 2) Daten einer 2D-CCD-Kamera in Echtzeit verarbeitet und in den Lokalisierungsprozess eingespeist. Als problematisch ergab sich dabei die Genauigkeit bei weniger strukturierten (Decken-)Umgebungen. Kompensiert werden konnte dies teilweise mittels einer Inertial Measurement Unit (Fusion heterogener Datenquellen). Problematisch war jedoch hier der langfristig auftretende Drift in den Sensordaten. Entsprechende industrielle Sensorik könnte dieses Problem unter Umständen beheben.

UAP 8.2: Umsetzung einer effizienten Kommunikations-Middleware für die diversen MMI und das HMI als SOA

Zur Umsetzung einer Service-Orientierten Architektur (SOA) sowohl im Sinne des effizienten Austauschs von Steuerungs- und Prozessinformationen zwischen den Agenten sowie auch zur Datenversorgung der Visualisierungskomponenten wurde das Robot Operating System (kurz ROS) als tragfähig identifiziert und erfolgreich eingesetzt. Es ermöglicht zum einen die dezentrale Kommunikation gemäß dem Publish-Subscriber-Prinzip und stellt andererseits Dienste (Services) gemäß klassischem SOA-Konzept bereit. Ergänzt wurde dies durch einen RabbitMQ-basierten Event- und Messaging-Mechanismus der plattformunabhängig und leichtgewichtig den Austausch von Eventinformationen ermöglicht und für alle verbreiteten Plattformen und Programmiersprachen verfügbar ist.

Als Beispiel für einen als Service im ROS-Kontext umgesetztes Prinzip des Datenaustauschs zwischen Agenten sei der sog. Meta-Data-Controller bzw. Status-Monitor [Böc+16] auf den Transport- bzw. Versorgungsfahrzeugen genannt (s. Abbildung 4). Dieser ermöglicht es den Fahrzeugen im Falle einer notwendigen Aushandlung der Vorfahrt bei nahender Kollision, ihre Geometrieinformationen auszutauschen, damit das lokale Wissen über Hindernisse energie- und kosteneffizient zu erweitern und final einen Umweg zu planen. Diese Umwegplanung nutzt somit Wissen, welches allein über Sensorik nicht erfassbar wäre. Schließlich wurde mit diesem Konzept erreicht, dass die Visualisierungskomponenten gemäß Publish-Subscriber-Prinzip („loosely coupled“) angebunden wurden. Vorteil ist, dass die Agenten selbst

nicht wissen (müssen), dass deren Informationen überwacht und visualisiert werden können. Zudem ist das Konzept robust gegen Ausfall von einzelnen Komponenten.

UAP 8.3: Zusammenführung, Auswertung und Aufbereitung der Positionsinformationen der einzelnen Maschinen, Ladungsträger und Transportmittel

In diesem UAP wurden diverse Datenschnittstellen (weiter-)entwickelt bzw. genutzt, um die Auswertung, Aufbereitung aber auch Visualisierung der anfallenden Daten einheitlich prozessieren zu können. Dazu wurde eine Datenschnittstelle zum Industrieroboter KUKA KR-125/3 entwickelt, die auch im Maxi-Demonstrator (Demonstrator II) zum Einsatz kam. Diese erlaubt es, Zustandsinformationen über den Roboter in Echtzeit abzufragen und unterstützt damit auch das Monitoring (siehe auch UAP 6.2). In weiteren Arbeiten wurde die Datenschnittstelle zu den FTS (Kontext: Demonstrator II, Skalierbarkeit der Arbeiten im Mini-Demonstrator) verfeinert und evaluiert um einschätzen zu können, inwieweit Echtzeitkommunikation möglich ist, um ggf. weitere Subsysteme anbinden zu können. Schließlich sei in diesem UAP-Kontext auf die in UAP 6.2 bzw. 6.3 vonseiten der TU Dortmund entwickelten Visualisierungskomponenten verwiesen, die ebenfalls Positionsinformationen von Agenten aufbereiten, verdichten und entsprechend darstellen und somit zur Echtzeit-konformen Überwachung von Positions- und Zustandsinformationen der Shopfloor-Einheiten beitragen.

In Vorbereitung der technischen Umsetzung einer Terminal-GUI für den Maxi-Demonstrator wurde nach einer Datenverfügbarkeitsanalyse ein Konzept zur Überführung aller benötigten Positionsdaten in ein einheitliches Einheiten- und Koordinatensystem erarbeitet.

Eine besondere Herausforderung stellte dabei eine Designbesonderheit der vom Projektpartner IML entwickelten Fahrzeuge des Mini-Demonstrators dar. Diese weisen zur Maximierung des Sichtbereichs der eingebauten radialen Laser-Scanner des Projektpartners Sick einen auf dieser Höhe, besonders im Bezug auf den Fahrzeugumfang minimalen, Sensorquerschnitt auf. Um trotzdem eine präzise relative Lokalisierung zu ermöglichen wurden multiple Konzepte zur kollaborativen Lokalisation untersucht. Entsprechende Konzepte konnten mit Erfolg umgesetzt und verifiziert werden. Es zeigte sich während der Bearbeitung, dass insbesondere die zunehmende Autonomie entsprechender smarterer Einheiten die Entwicklung teilweise grundlegend neuer Methoden erforderte, die auch in unerwarteten Situationen angemessene Reaktionen der mobilen Agenten ermöglichen.

AP9: Sensorik und Aktorik

Obwohl in der Phase der Beantragung keine Beteiligung der TU Dortmund am UAP 9.1 vorgesehen war, zeigte sich während der Bearbeitung, dass diese, auch im Abgleich mit den gemeinsamen Untersuchungen zum QAP1 „Intelligente Sensorik“ und im Abgleich mit dem UAP 9.2 notwendig ist.

UAP 9.1 Definition der Anforderungen an neuartige CPS-Sensorik und -Aktorik

Während sich die Partner, primär die Sick AG, auf die Anforderungsuntersuchungen aufseiten der Sensorik konzentrierten, lag ein Arbeitsschwerpunkt der TU Dortmund auf der Aktorik. Dabei wurde analysiert, welche Ansteuerungskonzepte den Anforderungen einer flexiblen Interaktion genügen. Hierzu wurde eine integrierte Steuerungsumgebung für Aktoren am Beispiel des am Fraunhofer Instituts vorhandenen KUKA-Roboters realisiert (s. auch UAP 8.3). Bedeutsame Fragestellungen waren die Echtzeitfähigkeit des Systems aus Sicht der Steuerung und die Genauigkeit des Aktors im Bezug zu Steuerungsbefehlen. Zudem wurde betrachtet, ob bestehende Systeme den zukünftigen Anforderungen an eine Mensch-Maschine(Aktor/Roboter)-Interaktion genügen. In diesem Zusammenhang erfolgte auch ein Abgleich mit dem UAP 8.1 zur Lokalisation. Ausgehend von den Arbeiten zur Identifikation von Anforderungen und dem Stand der Technik, konnten erste Konzepte zur Integration von Sensor und Aktor entwickelt werden. Das im UAP 8.1 vorgestellte Lokalisationssystem nutzt dabei bereits die entwickelten Konzepte. Exemplarisch sei die Fusion von Landmarks auf Basis optischer Sensoren und der Odometrie genannt. Eine zweite Möglichkeit liegt in der Veredlung von Lage-/Ausrichtungssensoren an Aktoren durch optische

Sensoren. Durch diesen Ansatz wird eine höhere Genauigkeit und eine bessere Integration in die Umgebung, speziell in Human-zentrierte Umgebungen erwartet. Innerhalb von UAP 10.1 wird eingehender auf die Evaluierung eingegangen.

Die integrierte, vielfach auch fusionierte Kooperation von Sensoren und Aktoren unter spezifischer Berücksichtigung einer nachhaltigen CPS-Konformität verlangte die Erarbeitung von veränderten teilweise auch neuen Anforderungscharakterisierungen. Hierzu wurden innerhalb des vorliegenden UAPs entsprechende Arbeiten durch die TU Dortmund unternommen. Dabei stellt die Härtung der Kommunikation eine wesentliche Anforderung dar, da dies eine entscheidende Grundlage zum Erreichen einer Echtzeitkonformität ist. Die Kommunikation ist eine der zu beachtenden Ressourcen, welche vereinheitlicht beachtet werden müssen. Insbesondere bei mobilen Einheiten gewinnt die Energie an Bedeutung, welches auch verlangt, Konzepte zur Ressourcenschonung, z. B. ein adaptives Offloading zu beachten. Weitere wesentliche Aspekte sind die Skalierbarkeit und Flexibilität. Dies bedingt die einfache Integration in vorhandene Netzwerkstrukturen oder die leichte Anbindung an unterschiedliche Sensoren.

Die aufgezeigten Konzepte wurden in einem prototypischen Demonstrationsszenario integriert, um diese evaluieren zu können. Diese orientierte sich am Konzept der Industrieroboter-basierten Arbeitsstation des Maxi-Demonstrators und greift dementsprechend die dort relevanten Fragestellungen (Feinpositionierung, autonome Montageprozesse, etc.) auf.

UAP 9.2: Entwicklung von (Retrofit-)Cyber-Physical-Units mit Sensorik und Aktorik

Im Rahmen dieses UAPs wurde durch die TU Dortmund eine Programmbibliothek (librtkrc) zur flexiblen Programmierung von KUKA-Industrierobotern konzipiert (siehe u.a. [Böc+15]), realisiert, evaluiert und fortlaufend weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang entstand auch die bereits in UAP 8.3 skizzierte Datenschnittstelle zum Abruf der Betriebsdaten des Roboters. Somit werden diese Daten allen Agenten im Netzwerk verfügbar gemacht (s. Abbildung 2). Die Programmbibliothek „librtkrc“ erlaubt die dynamische Integration von Sensorik in zu lösende Fragestellungen rund um den Roboter, die sich über Roboter-gebundene Hersteller-Programmiersprachen (hier am Beispiel der KUKA Robot Language, kurz KRL) nicht umsetzen lassen. Dies ist primär auf eine beschränkte Menge an Programmiermitteln und Rechenzeit zurückzuführen. Die Bibliothek ermöglicht auch die Bewegungsplanung und Werkzeugnutzung des Roboters über die entwickelten Elemente der Programmbibliothek. Da auf die Hersteller-Programmiersprache (beispielsweise industriell bei Volkswagen genutzt) zurückgegriffen wird, ist diese Betriebssystem-unabhängig einsetzbar und erfüllt damit die Anforderungen des Retrofittings.

In diesem Zusammenhang entstand auch eine kinematische Visualisierung, die mit der zuvor genannten Bibliothek genutzt werden kann, um den Aktorzustand live darzustellen. Als Grundlage für eine Abschlussarbeit und in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik entstand ein 3D-Laserscanner mittels durch Schrittmotor rotierendem 2D-Laserscanner.

UAP 9.4: Erstellung eines Konzeptes zur lokalen Ressourcenoptimierung inklusive einer Methodik zur Verarbeitung und Fusion der unterschiedlichen Sensordaten

In Kombination mit den Arbeiten am Mini-Demonstrator wurde eine Erweiterung der Lokalisierung entwickelt, die Optical-Flow-Algorithmen zur visuellen Odometrie nutzt. Diese wurden auf Raspberry Pi umgesetzt, um die primären eingebetteten Systemen zur Robotersteuerung nicht zu beeinflussen. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die über Netzwerk verfügbaren Kameradaten einen Blick auf die Umgebung aus Sicht der Roboters ermöglichen („remote visual debugging“).

Im Rahmen dieses UAPs wurde durch die TU Dortmund ein dezentrales Ausweichverhalten entwickelt und im ROS-Kontext prototypisch implementiert (s. Abbildung 3). Es ermöglicht über das SOA-Prinzip den Austausch von Daten mit anderen Agenten und kompensiert damit lokal das Fehlen von globalem Wissen, welches sich allein aus den verfügbaren Sensordaten eines Agenten (etwa der Laserscanner) nicht gewinnen lässt. Zudem wurden und werden weitere Aspekte zur Sensordatenfusion mit Rückgriff auf Inertial Measurement Units (IMU), optische Odometrie und fixed-focus CCD-Kameras untersucht

und praktisch erprobt. Dies verfolgt das Ziel, die Lokalisierungspräzision der Agenten zu verbessern um genaueres Ausweichen zu ermöglichen. Überdies stand in diesem UAP die Umsetzung einer dezentralen Pfadplanung auf den Agenten („global_planner“) unter Berücksichtigung der Umgebungstopologie im Mittelpunkt (s. [Böc+15]). Als Ergebnis ergab sich eine ROS-Komponente (ROS-Node), die im Mini-Demonstratorkontext die Wegplanung der Fahrzeuge übernimmt und statische (bzw. prinzipiell auch dynamische) Hindernisse berücksichtigt. Zusammen mit dem eingangs beschriebenen lokalen und dezentralen Ausweichverhalten sind die Agenten damit befähigt, gegenseitige Netzwerk-gestützte Aus-handlungen von Prioritäten durchzuführen und Kollisionskonflikte autonom aufzulösen.

AP10: Validierung

UAP 10.1: Versuchsszenarien und KPI

Die Versuchsszenarien bestanden i.W. aus dem Mini- und Maxi-Demonstrator sowie den in der Simulation abgebildeten Umgebungen. Key-Performance-Indicators (KPIs) wurden speziell im Hinblick auf die industrielle Tauglichkeit in enger Kooperation mit dem Projektpartner FLS abgestimmt. Weitere Details zum AP10 werden zusammen im UAP 10.2 vorgestellt.

UAP 10.2: Regelvalidierung

Die angestrebten Evaluierungskonzepte bzw. Zielsetzungen lagen in der Untersuchung, welcher Grad von Genauigkeit von aktuellen Aktoren zu erzielen ist, welche Unsicherheit im zugehörigen Systemaufbau besteht und, ob die zur Verfügung stehenden Sensoren ausreichend sind, um diese Sachverhalte zu untersuchen. Hierzu wurden umfangreiche Evaluierungsszenarien entwickelt, die den Vorgaben einer nachhaltigen technischen Validierung genügen. Das Evaluierungsszenario besteht aus einem hochpräzisen optischen Tracker vom Typ Optotrak Certus der Firma Northern Digital Inc. mit einer maximalen Auflösung von 0.01mm und der Option, bis zu 512 Marker mit einer Frequenz von 4600 Hz zu verfolgen. Die technischen Komponenten bestanden aus einem Roboter der Firma Kuka und einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS). Innerhalb von verschiedenen Messfolgen wurden definierte Bewegungspfade mit den Aktoren (Roboter, FTF) beschriftet. Als Daten stehen die Ist-Werte (Messung mit dem optischen Referenzsystem) und die Soll-Werte (definierte Position) zur Verfügung. Die aktuellen statistischen Auswertungen analysieren Soll- (definierte Pfade) und Ist-Werte (Referenzsystemmessungen), versuchen systematische Abweichungen und allgemeine Gütemaße zu bestimmen. Eine davon abgeleitete Frage ist die Möglichkeit zur Kompensierung von Systemunsicherheiten.

Die Arbeiten in AP 9 zur Genauigkeitsanalyse und Ansteuerung der MultiShuttle Move-Fahrzeuge und des Industrieroboters KUKA KR125/3 wurden in diesem AP fortgesetzt. Dazu wurden die Lokalisierungsdaten aufbereitet, statistisch analysiert, visualisiert und entsprechend hinsichtlich systematischer (Odometrie-)Fehler interpretiert. Zudem wurden geeignete Korrekturverfahren konzipiert. Diese wurden in zahlreichen Abschlussarbeiten auch auf die Lehrplattform KUKA YouBot angewandt. Die wesentlichen Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit, die gerade für die Umsetzung der Demonstratoren eine entscheidende Rolle spielt, lassen sich wie folgt zusammenfassen: Der Industrieroboter weist erwartungsgemäß eine sehr hohe Genauigkeit auf, die bis zum Level der Messgenauigkeit des optischen Tracking-Systems verifiziert werden konnte. Bezüglich der Fahrzeuge konnte festgestellt werden, dass Rotationen vergleichsweise präzise durchgeführt werden. Linearbewegungen sind jedoch mit starken Abweichungen (teilweise über 10 cm pro Meter), Drifts und Auslenkungen behaftet. Schließlich konnte der Zusammenhang bestätigt werden, dass eine sinkende Geschwindigkeit eine höhere Odometrie-Genauigkeit nach sich zieht. Im weiteren Verlauf des UAPs 10.2 wurden die Experimentdaten zur Bewertung kooperativer Arbeitsplätze im Schnittpunkt von Mensch und Roboter im Hinblick auf die Akzeptanz bzw. Wirkung solcher Arbeitsplätze wie im dezentralen Konzept von SMART FACE vorgesehen, ausgewertet. Die Ergebnisse wurden zudem in einem Paper „Mensch-Roboter-Interaktion im Kontext von Industrie 4.0: Annähern-Meiden-Tendenzen als ein Bewertungsmerkmal für die affektive Qualität der Interaktion?“ zusammengefasst, welches auf der Frühjahrskonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V.

(GfA), eingereicht und vorgestellt wurde. Die Ergebnisse der Datenauswertung lassen sich wie folgt zusammenfassen: In den Bewegungstrajektorien zeigen sich Annähern-Meiden-Muster die Rückschlüsse darüber erlauben, wie die Interaktionssituation vom Nutzer implizit bewertet wird. Insbesondere sind in langen bzw. weiten Bewegungen der Probanden auf den Roboter zu bzw. von ihm weg Effekte in den Bewegungstrajektorien erkennbar. Für weitere Details sei auf die Publikation verwiesen.

Neben der technischen Evaluierung wurden in dem Szenario auch Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Kooperation unter psychologischen Gesichtspunkten durchgeführt. Fragen sind, welcher Grad an Kooperation zwischen Mensch und Aktor möglich ist und, ob die Form der Aktorbewegung Einfluss auf die Akzeptanz/Kooperation hat. Die TU Dortmund konnte hierzu auf die Unterstützung des Leibniz-Instituts für Arbeitsforschung an der TU Dortmund zurückgreifen, zudem längerfristige Forschungskooperationen bestehen. Über eine ausgezeichnete Modell-basierte Bewegungsplanung für den Aktor wurde dieser entsprechend bewegt und im Nachgang sollten die Probanden diese Bewegungen imitieren. Die menschliche Bewegung wurde über den optischen Tracker (Optotrak Certus) aufgezeichnet. Durch eine zielgerichtete Annotierung der Daten unter psychologischen Gesichtspunkten werden in der zur Zeit stattfindenden Auswertung relevante Indikatoren für eine adäquate Mensch-Maschine-Schnittstelle oder Human-zentrierte Bewegungsmuster von Aktoren gesucht.

UAP 10.3: Übergreifende Validierung

Im Rahmen der Arbeiten von UAP 10.2 konnten Ergebnisse bzw. Erkenntnisse gewonnen werden, die für die Überprüfung des Gesamtsystems (speziell am Beispiel des Mini-Demonstrators und im weiteren Verlauf im Demonstrator II, siehe auch UAP 11.2) wesentlich sind. In diesem Zusammenhang wurde die Genauigkeit der Lokalisierung als wesentlich erachtet, da diese Einfluss auf die Realisierung von autonomem Verhalten wie etwa dezentrale Bahnplanung, lokale Kollisionsvermeidung bzw. Hindernisumfahrung hat. Aus diesem Grund wurde nach einer eingehenden Analyse verfügbarer Tracking-Lösungen ein leistungsfähigerer 6-DoF-Tracker mit passiven Markern beschafft. Bei dem zuvor genannten Tracker handelt es sich um ein Infrarot-basiertes 8-Kamera-System „OptiTrack“ der Firma NaturalPoint mit einem nutzbaren Basissichtvolumen von ca. 7x7x7 m, welches durch die Einbringung zusätzlicher Kameras um ein vielfaches erweiterbar ist. Dadurch konnte eine Eignung sowohl für die Validierung im Kontext des Mini-Demonstrators, als auch im Maxi-Demonstrator sichergestellt werden. Der Tracker wurde initial zur Bewertung der Lokalisierungsgenauigkeit in die Systeme des Mini-Demonstrators integriert. Dazu wurde ein mit den existierenden Aufbauten der Demonstrator-Fahrfläche kompatibles Betriebsszenario entworfen und umgesetzt, was zusätzlich zur Installation der Tracking-Hardware die Entwicklung eines VRPN (Virtual Reality Peripheral Network) Moduls für das ROS-basierte MAS zur Datenfusion beinhaltete. Zusätzlich wurden Prozeduren zur Kalibrierung der Tracking-Daten auf die Koordinatensysteme der Demonstrator-Fahrfläche und der Fahrzeuge entworfen. Das System ermöglichte hochgenaue Referenzmessungen hinsichtlich der Lokalisierungsgenauigkeit im Mini-Demonstrator und trug damit zu einer Verbesserung der Algorithmen zur Bahnplanung, Lokalisierung und autonomen Agentensteuerung sowie deren Validierung bei. In diesem Kontext konnten insbesondere die Genauigkeit der Fahrzeugodometrie bei Translations- und Rotationsbewegungen bestimmt werden und Samplingprobleme beim Transfer der Odometriedaten von den Motorkontrolleinheiten zur zentralen Recheneinheit der Fahrzeuge identifiziert und behoben werden. Als besonders wertvoll im Bezug auf die industrielle Nutzbarkeit der Lokalisierungs- und Manövrierengenauigkeit erwies sich die Fähigkeit des Tracking-Systems, eine Bewertung der Genauigkeit im Live-Betrieb zu ermöglichen.

Abschließend wurde im Rahmen der Publikation „Towards Autonomously Navigating and Cooperating Vehicles in Cyber-Physical Production Systems“ auf der „Machine Learning for Cyber-Physical-Systems in Industry 4.0“-Konferenz (ML4CPS) in Lemgo verschiedene Verfahren zur (proaktiven) Kollisionsvermeidung untersucht. Dazu wurde ein Verfahren simulativ sowie real im Mini-Demonstrator prototypisch umgesetzt. Dieses wurde im weiteren Verlauf auch hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit weiter validiert; speziell der Messebetrieb (z.B. auf der HMI) wurde als Dauertest genutzt. Auch hinsichtlich einer erfolgreichen Umsetzung der Demonstratoren (inkl. Weiterentwicklung des Mini-Demonstrators) wurden



Abbildung 5: Nachrichtenauslastung im Maxi-Demonstrator

verschiedene Randaspekte wie Kommunikationslatenz, Rechenzeit/Offloading und Verbindungsstabilität bewertet. Speziell in Bezug auf robuste Kommunikation zwischen dezentral agierenden Agenten konnte der WLAN-Standard (IEEE 802.11) im 5 GHz-Band als tragfähig identifiziert werden, da hier die geringsten Störungen und Latenzen zu verzeichnen waren. Letzteres zeigte sich insbesondere beim Mini-Demonstrator auf der Hannover-Messe (> 150 WLAN-Netze im Parallelbetrieb). Es ist hier jedoch auch festzuhalten, dass es Defizite bei Betriebssicherheit in Konsumerbereich gibt, die ggf. mit Industriegeräten beseitigt werden kann. Als Beispiel sei ein Netzfilter für die Stromversorgung von WLAN-Routern genannt. Dieser machte gerade bei hohen Lastspitzen große Probleme in der Verbindungsstabilität.

Außerdem wurden Präzisionsevaluierungen der Odometriedaten mit Hilfe des eingangs bereits erwähnten Trackers durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Überdies wurde die Netzwerklast überwacht, um das charakteristische Verhalten von WLAN auch simulativ geeignet abzubilden. Eine exemplarische Aufzeichnung findet sich in Abbildung 4.1.

AP11: Demonstrator

UAP 11.2: Demonstrator I: Halle mit autonomen Transportfahrzeugen und Industrieroboter

Im Fokus dieses UAPs standen vonseiten der TU Dortmund umfangreiche Arbeiten am Mini-Demonstrator, welcher auf der Hannover Messe 2015 ausgestellt wurde. Die TU Dortmund übernahm dabei wesentliche Sachverhalte der Kommunikationsinfrastruktur und der Visualisierung. Auch fungierte sie als Mittler, auf konzeptioneller und technischer Ebene, zwischen den weiteren Gewerken respektive der Arbeiten der Partner. Für weitere Details zum Status des Mini-Demonstrators zum Zeitpunkt der Hannover Messe sei auf den Konsortialbericht verwiesen. Im Nachgang zur Messe wurde durch die TU Dortmund

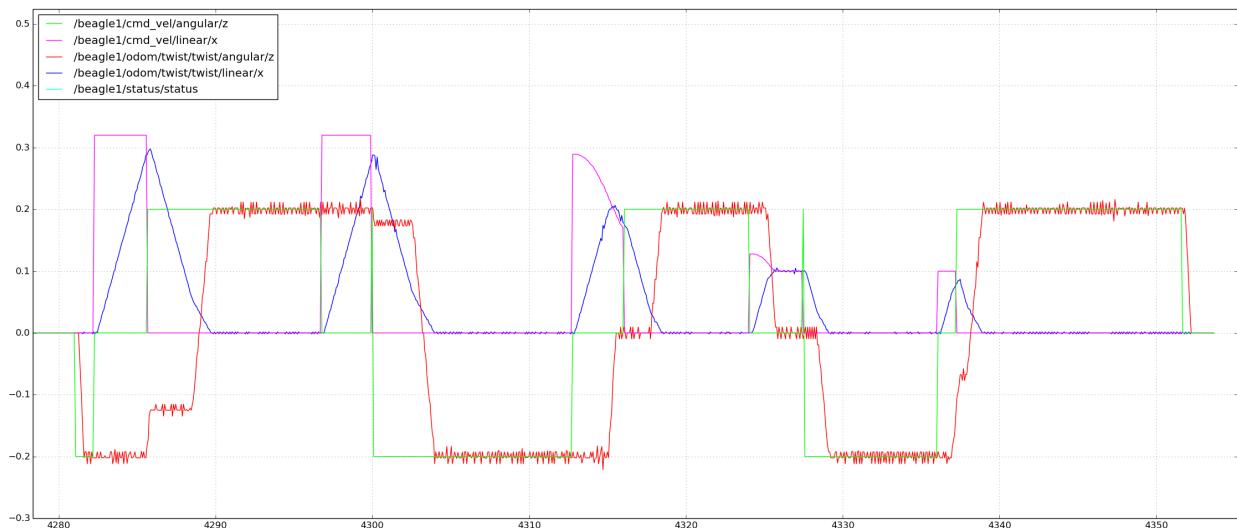


Abbildung 6: Odometrieabweichungen

eine nachhaltige Erweiterung des Mini-Demonstrators durchgeführt. Auf instanzierender Ebene wurde eine Erweiterung der Fläche von 4x3 auf 4x4 Meter vorgenommen, durch welche die fahrtechnischen Freiheitsgrade des Systems signifikant gesteigert werden konnten. Dadurch wurde die Evaluierung erweiterter Konzepte zur Pfadplanung (siehe AP 7) und Kollisionsbehandlung im Vorfeld der Realisierung des Maxi-Demonstrators ermöglicht. Konzeptionell wurde die bisher vorhandene Blockstreckensteuerung durch ein flexibles Multiagenten-System ersetzt, welche eine freie Bewegungsplanung erfolgt. In Zusammenhang mit den Sensor-assiierten APs respektive dem QAP „Intelligente Sensorik“ konnte eine reaktive und damit adaptive Bewegungsplanung realisiert werden. Die TU Dortmund unterstützte zudem in zahlreichen Diskussionen und Besprechungen die Konzeptionierung des sogenannten Maxi-Demonstrators (= Demonstrator II) in der ZFT-Halle des Fraunhofer IMLs. Neben einem übergreifenden Konzept stehen dabei unter anderem Fragestellungen wie die Integration der Roboterzelle durch die dynamisch und flexibel programmierbare Schnittstelle (siehe UAP 9.2) sowie die Anbindung der führerlosen Transportsysteme (FTS) hinsichtlich Autonomiefunktionen und Kommunikationsinfrastruktur im Mittelpunkt. Die bisherigen Arbeiten konnten ein Konzept bezüglich der zuvor beschriebenen Komponenten und deren Interaktion festlegen, welches in nachgeschalteten Arbeiten weiter verfeinert und schließlich umgesetzt wurde.

Unter Zuhilfenahme der in AP6 entwickelten Monitoring Werkzeuge, war die TU Dortmund eng in die finale Konzeptionierungs- und Testphase des Maxi-Demonstrators unter Leitung des IML eingebunden. Dabei erwies sich vor allem die Visualisierung der im Betrieb des Demonstrators nicht sichtbaren System- und Planungszustände in der Terminal-GUI als wichtiges Werkzeug bei der Verifikation der korrekten Betriebsabläufe. Auch das im Rahmen von AP10 entwickelte Werkzeug zur Überwachung der AMQP-Kommunikation konnte erfolgreich zur Optimierung der internen Kommunikationssysteme eingesetzt werden. Im Zuge dessen wurden die Kommunikationsabläufe im Maxi-Demonstrator sowohl im laufenden Betrieb, als auch auf der Basis aufgezeichneter, längerer Betriebszeiträume analysiert, wodurch eine starke Reduktion des zu übertragenden Datenvolumens erreicht werden konnte.

Die Konzeption und Produktion der im Maxi-Demonstrator produzierbaren prototypischen Automobile durch das IML wurde von Seiten der TU Dortmund konzeptionell sowie durch den Entwurf und die Erstellung von CAD-Modellen unterstützt. Dies umfasste unter anderem die 3D-Modellierung mehrerer Varianten von Radkappen, die Konzeption von Haltevorrichtungen sowie deren Anpassung an die Fahrzeugprototypen. Darüber hinaus wurden unterstützende Arbeiten bei der Hardware-seitigen Adaption der Fahrzeugprototypen sowie deren Endmontage geleistet.

UAP 11.3: Demonstrator II: Exemplarische Integration relevanter Teilprozesse bei VW

Im Rahmen des UAPs 11.3 wurden Vorarbeiten zur Untersuchung von tragfähigen und sinnvoll integrierbaren Assistenzsystemen in Fertigungsabschnitte (Demonstrator III) der Volkswagen AG durchgeführt. Dies erfolgte unterstützend in Form von interdisziplinären bzw. internationalen Abschlussarbeiten (Bachelor- sowie Masterarbeiten). Einige Ergebnisse sind vielversprechend, eine abschließende Bewertung erfolgte durch VW.

4.2 Wissenschaftliche Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes wurden durchgängig von der Projektleitung und den Projektmitarbeitern publiziert. Zudem wurde innerhalb des Projektes wissenschaftliche Abschlussarbeiten (Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten) vergeben, die sich aus dem Kontext des Projektes ergaben.

In der nachfolgenden Auflistung sind Projekt-assoziierten wissenschaftlichen Arbeiten aufgelistet:

- [Boc+15] Lennart Bochmann u. a. „Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs“. In: *Int. J. of Automation Technology* 9 (2015), S. 270–282.
- [Böc+15] Adrian Böckenkamp u. a. „Automatic Robot-based Unloading of Goods out of Dynamic AGVs Within Logistic Environments“. In: *Lecture Notes in Logistics, Commercial Transport* (2015), S. 397–412.
- [Böc+16] Adrian Böckenkamp u. a. „Towards Autonomously Navigating and Cooperating Vehicles in Cyber-Physical Production Systems“. In: *ML4CPS - Machine Learning for Cyber Physical Systems and Industry 4.0* (2016), S. 111–121.
- [Böc+17] Adrian Böckenkamp u. a. „A Versatile and Scalable Production Planning and Control System for Small Batch Series“. In: *Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems, Springer* (2017), S. 541–559.
- [Bor15] Sebastian Borchert. „Sensorgestützte Präzisionsevaluierung eines Industrieroboters“. Bachelorarbeit. 2015.
- [BWP16] Adrian Böckenkamp, Frank Weichert und Christian Prasse. „A Robust, Real-time Capable Framework for Fully Automated Order Picking of Pouch-parceled Goods“. In: *SAI Intelligent Systems Conference (accepted for publication)* (2016).
- [Chi16] Tim Chilla. „Odometrie- und Sensorfusion-gestützte Selbstlokalisierung eines FTS“. Bachelorarbeit. 2016.
- [Gre15] Fabian Greefrath. „Entwicklung eines Gesten-gestützten Steuerungskonzepts für Industrieroboter“. Bachelorarbeit. 2015.
- [Hal16] Anes Halilovic. „Exploration von Routendaten zur adaptiven Kollisionsvermeidung“. Bachelorarbeit. 2016.
- [Ikh15] Ibrahim Ikhlawi. „Konzeptionierung und Realisierung eines mobilen Leitsystems für den öffentlichen Raum“. Bachelorarbeit. 2015.
- [Krä14] Maximilian Krämer. „Selbstlokalisierung eines mobilen Robotersystems mittels 3D-Sensorik“. Bachelorarbeit. 2014.
- [Lau16] Florian Lauf. „Adaptive Bewegungsplanung für mobile Robotereinheiten“. Bachelorarbeit. 2016.
- [Mül15] Bernd Müller. „Die autonome Autofabrik“. In: *weiter.vorn 4/2015* (2015).
- [Pin15] Paul Pinkal. „Interaktives Monitoring und Assistenzsystem von Produktionsprozessen auf mobilen Endgeräten“. Bachelorarbeit. 2015.

- [RBW16] Gerhard Rinkenauer, Adrian Böckenkamp und Frank Weichert. „Mensch-Roboter-Interaktion im Kontext von Industrie 4.0: Annäheren-Meiden-Tendenzen als ein Bewertungsmerkmal für die affektive Qualität der Interaktion?“ In: *GfA-Frühjahrskongress* (2016).
- [Reh14] Philip Rehm. „Bahnplanung kooperativer Arbeitsprozesse von Industrierobotern“. Bachelorarbeit. 2014.
- [Rud14] Yan Rudall. „Prädiktive Bewegungsbestimmung von fahrerlosen Transportsystemen im Kontext von Sensor-/Aktorkopplungen“. Masterarbeit. 2014.
- [Söz15] Sercan Sözügüzel. „Interaktive dreidimensionale Visualisierung kooperativer Arbeitsumgebungen“. Bachelorarbeit. 2015.
- [Ste14] Christofer Steingreifer. „Identifikation von bedeutungstragenden logistischen Einheiten unter Beachtung von Ressourcenschranken“. Bachelorarbeit. 2014.
- [Vog16] Dennis Vogt. „Dynamische LiDAR-gestützte Personendetektion“. Bachelorarbeit. 2016.

4.3 Öffentlichkeitsarbeit

Der Projektfortschritt, die Zwischenergebnisse und Ergebnisse des Vorhabens wurden in unterschiedlicher Form der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Dabei bildet die für das Projekt eingerichtete Internetseite unter der Adresse <http://www.smartfactoryplanning.de> (s. Abbildung 4.3) eine erste Adresse, um sich über das Projekt zu informieren. Anzumerken ist, dass die Webseite durch den Projektpartner TU Dortmund eingerichtet und gewartet wurde. In Anlehnung an den bzw. in Ergänzung zum Verwertungsplan hatte das Konsortium zudem beschlossen, einen zusätzlichen Demonstrator für die Darstellung der Vorgehens- und Funktionsweise zu realisieren - im Folgenden als „Minidemonstrator“ bezeichnet (s. Abbildung 4.3).

Dieser vereinfachte Demonstrator hat den Vorteil, dass sich die Konzepte in einer simplifizierten Form entwickeln und verifizieren lassen. Die TU Dortmund hat sowohl bei der Umsetzung als auch bei den Präsentationen wesentliche Aufgaben übernommen. Präsentiert wurde der Minidemonstrator u.a. innerhalb der nachfolgend aufgeführten Veranstaltungen:

- Hannover Messe, 13.-17.04.2015, Hannover
- Continental AG „Industrie 4.0 Convention“, 09.10.2015, Regensburg
- Volkswagen AG, Doktorandentag, 03.09.2015, Wolfsburg
- Automatica, 21.-24.06.2016, München
- Continental AG „Top Transfer Forum - Lean meets Industrie 4.0“, 08.10.2015, Regensburg
- Abschlusskonferenz AUTONOMIK, 13.10.2016, Berlin

Ergänzend zu den umfangreichen Präsentationen des Minidemonstrators wurde das Projekt innerhalb der nachfolgenden Veranstaltungen thematisiert:

- DGUV Congress, Die Zukunft der Arbeit: Sicherheit und Gesundheit im 4.0-Zeitalter -Arbeit, Verkehr, Bildung, „Der Mensch ist der omnipotente Industrieroboter“, 11 .10.2016, Dresden
- IML-Führungen für die Industrie
- Maxi-Demonstrator: Abschlusspräsentation, 18.11.2016, Dortmund

Auch stand die TU Dortmund als einer der Ansprechpartner für Anfragen über die Kontaktrubrik der Webseite zur Verfügung. Insbesondere KMUs waren an den Ergebnissen des Projektes interessiert und wurden entsprechend informiert. Zudem repräsentieren die im Abschnitt 4.2 angeführten Publikationen eine aus wissenschaftlicher Sicht ideale Form der Außendarstellung.

Start | Kontakt | Login Kontrastansicht | Schriftgröße | Impressum | Datenschutzerklärung

SMART FACE

Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung









Projekt
Veranstaltungen
Abschlusspräsentation
Veröffentlichungen
Intelligente Sensorik

Projekt Home > Projekt

Aktuelles

Industrielle Verbundpartner

Institutionelle Verbundpartner

Universitäre Verbundpartner

Beschreibung

Mitarbeiter

Veranstaltungen

Abschlusspräsentation

Veröffentlichungen

Intelligente Sensorik

Minidemonstrator auf der AUTOMATICA 2016

Industrie 4.0 auf der AUTOMATICA 2016 hautnah erleben: Eine wandlungsfähige, sich selbst steuernde Kleinserienfertigung von konventionellen Fahrzeugen und Elektrofahrzeugen veranschaulicht der Minidemonstrator. Dieser erweckte bereits auf der HMI 2015 reges Interesse und wurde jetzt auf der AUTOMATICA 2016 (Messe München GmbH), der führenden Messe für industrielle Automatisierung und Mechatronik, in einer weiterentwickelten Form präsentiert. Den Besuchern wurde damit die Möglichkeit gegeben, ein selbstorganisiertes, dezentral gesteuertes Produktionssystem nach Industrie 4.0 Prinzipien live vor Ort zu erleben.



Projekttreffen im Open Innovation Center Bocholt

Am 02.06.2016 fand das 2. Projekttreffen 2016 des „Autonomik 4.0“-Verbundprojektes „SMART FACE“ im Open Innovation Center der LB-group in Bocholt statt.

Neben Präsentationen zum Projektstatus wurden in mehreren Workshops einzelne Sachverhalte von den anwesenden Vertretern der beteiligten Partner (Continental, Fraunhofer IML, F/L/S, Lanfer, LB-group, Logata, Sick, TU Dortmund, VW) sowie vom VDI/VDE-IT weiter vertieft. Dies betraf u.a. die Umsetzung des „Maxi-Demonstrators“ zur Demonstration der finalen Projektergebnisse.

1. Projekttreffen 2016

Bei der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg fand am Donnerstag, den 4. Februar 2016 das Projekttreffen des „Autonomik 4.0“-Verbundprojektes „SMART FACE“ statt. Anwesend waren neben den Projektpartnern auch ein Vertreter der Begleitforschung vom VDI/VDE-IT.

Es wurden die Fortschritte der einzelnen Arbeitsgruppen präsentiert und das weitere Vorgehen abgestimmt.

„Keine Angst vor 4.0“ – Die Automobilindustrie als Vorreiter

Kleine und mittelständische Betriebe schaffen den Einstieg in die vernetzte Produktion nur in kleinen Schritten, neue Angebote sollen diese dabei unterstützen. Dies fasst den wesentlichen Inhalt des Artikels „Keine Angst vor 4.0“ aus der 12. Ausgabe 2015 des Technology Review zusammen. Vorbild für die Anwendung von Industrie 4.0 Prinzipien bildet die Automobilindustrie. Die Losgröße 1, also eine völlig individuelle Produktion nach Kundenwunsch spielt in der Automobilindustrie eine immer größer werdende Rolle. Als Aushängeschild einer auf die Losgröße 1 angepassten Strategie, wird das vom Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik und deren Partnern entwickelte „SMART FACE“ Konzept aufgezeigt. Kern der Strategie ist eine inselbasierte, autonome Endmontage der Fahrzeuge und eine flexible Produktionsplanung nach dem Prinzip Industrie 4.0.

Aktuelles

Minidemonstrator auf der AUTOMATICA 2016

Industrie 4.0 auf der AUTOMATICA 2016 hautnah erleben: Eine...

[mehr]

SMART FACE auf der deutschlandweiten Online-Landkarte „Industrie 4.0“ (19.11.2015)

Die deutschlandweite Online-Landkarte „Industrie 4.0“ der Plattform...

[mehr]

Fördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abbildung 7: Exemplarischer Screenshot zur Projekt-Webseite <http://www.smartfactoryplanning.de>



Abbildung 8: Ausstellung des Mini-Demonstrators auf der Automatica 2016

5 Nutzen und Verwertung

Im Fokus der Verwertung der Projektergebnisse steht die Erweiterung zum Stand der Forschung, welche im Abschnitt 4.2 dargestellt wurden. Zudem stehen erarbeitete Teilaspekte im Zentrum der (sich in der Bearbeitung befindenden) Dissertation des Projektmitarbeiters Adrian Böckenkamp. Auch wurden Erkenntnisse und Beispiele aus dem Projekt in Vorlesungen integriert, um Studierenden einen Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zu geben. Auf einer weiteren Ebene dienen die Ergebnisse des Projektes zur Anbahnung und Beantragung von neuen Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Insbesondere die Integration des Menschen und die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine ist eine Erkenntnis des Vorhabens, die nachhaltige Bedeutung für die zukünftige Forschung hat.

6 Literatur

- [AA04] T. Arici und Y. Altunbasak. „Adaptive Sensing for Environment Monitoring using Wireless Sensor Networks“. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 4* (2004), S. 2347–2352.
- [ABI09] Marco Autili, Paolo Benedetto und Paola Inverardi. „Context-Aware Adaptive Services: The PLASTIC Approach“. In: *Fundamental Approaches to Software Engineering*. Bd. 5503. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 124–139.
- [AK08] D. Aigera und K. Kedem. „Applying graphics hardware to achieve extremely fast geometric pattern matching in two and three dimensional transformation space“. In: *Information Processing Letters* 106.6 (2008), S. 224–230.
- [AMA10] AMA Fachverband für Sensorik e.V. *Sensor-Trends 2014*. Apr. 2010.
- [BCG12] Manfred Broy, MariaVictoria Cengarle und Eva Geisberger. „Cyber-Physical Systems: Imminent Challenges“. In: *Large-Scale Complex IT Systems. Development, Operation and Management*. Bd. 7539. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 1–28.
- [BEN09] A. Ben-Tal, L. El Ghaoui und A. Nemirovski. *Robust Optimization*. Princeton Series in Applied Mathematics. Princeton University Press, 2009.

- [BI98] R. Brooks und S. S. Iyengar. *Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software*. Prentice-Hall, Inc., 1998.
- [Bro10] M. Broy. *Cyber-Physical Systems*. acatech DISKUTIERT. Springer, 2010.
- [BS03] D. Bertsimas und M. Sim. „Robust discrete optimization and network flows“. In: *Mathematical Programming* 98.1 (2003), S. 49–71.
- [BS05] Bruno Bouyssounouse und Joseph Sifakis. *Embedded Systems Design: The ARTIST Roadmap for Research and Development*. Bd. 3436. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2005.
- [CCP09] Bo Chen, Harry H. Cheng und Joe Palen. „Integrating mobile agent technology with multi-agent systems for distributed traffic detection and management systems“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17.1 (2009), S. 1–10.
- [Cop+05] B. Cope u. a. „Have GPUs made FPGAs redundant in the field of Video Processing?“ In: *IEEE* (2005).
- [CP09] Gerardo Canfora und Massimiliano Penta. „Service-Oriented Architectures Testing: A Survey“. In: *Software Engineering*. Bd. 5413. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 78–105.
- [De +08] Luciana Moreira Sá De Souza u. a. „SOCRADES: a web service based shop floor integration infrastructure“. In: *Proceedings of the 1st international conference on The internet of things. IOT'08*. Springer-Verlag, 2008, S. 50–67.
- [DW09] D. Delling und D. Wagner. „Pareto Paths with SHARC“. In: *SEA*. Bd. 5526. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009, S. 125–136.
- [FM08] J. Fung und S. Mann. „Using Graphics Devices in Reverse: GPU-based Image Processing and Computer Vision“. In: *Proceedings of the IEEE Int'l Conf. on Multimedia & Expo, Hannover, Germany* (2008).
- [Gab15] Sigmar Gabriel. „Visionen und Geschäftsmodelle - Neuer Standard Industrie 4.0“. In: *Unternehmermagazin Ausgabe 3/4* (2015).
- [Gao+05] Q. Gao u. a. „Analysis of energy conservation in sensor networks“. In: *Wirel. Netw.* 11 (6 Nov. 2005), S. 787–794.
- [Ger+10] David Geronimo u. a. „Survey of pedestrian detection for advanced driver assistance systems“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 32.7 (2010), S. 1239–1258.
- [Gho+06] S. E. Ghobadi u. a. „Classification of 3D Moving Objects using Support Vector Machines and 3D-Time of Flight Camera“. In: *3rd International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology* (2006), S. 224–229.
- [GW01] Rafael C. Gonzalez und Richard E. Woods. *Digital Image Processing*. 2nd. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.
- [Hen+98] T. C. Henderson u. a. „Sensor fusion“. In: *Control Problems in Robotics and Automation* (1998), S. 193–208.
- [HGR07] Gregory Hackmann, Christopher Gill und Gruia-Catalin Roman. „Extending BPEL for Interoperable Pervasive Computing“. In: *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Pervasive Services*. 2007, S. 204–213.
- [HR07] K. Huguenin und J. Rendas. „Distributed Adaptive Sampling using Bounded-Errors“. In: *ROBOCOMM'07: Proceedings of the First International Conference on Networked Robots*. 2007.
- [HW08] Wiebe van der Hoek und Michael Wooldridge. „Chapter 24 Multi-Agent Systems“. In: *Handbook of Knowledge Representation*. Bd. 3. Foundations of Artificial Intelligence. Elsevier, 2008, S. 887–928.

- [Kol+09] A. Kolb u. a. „Time-of-Flight Sensors on Computer Graphics“. In: *Proc. Eurographics (State-of-the-Art Report)* (2009).
- [KPM10] Kavi Kumar Khedo, Rajiv Perseedoss und Avinash Mungur. „A Wireless Sensor Network Air Pollution Monitoring System“. In: *CoRR* abs/1005.1737 (2010).
- [KY97] P. Kouvelis und G. Yu. *Robust Discrete Optimization and Its Applications*. 1st. Springer, Nov. 1997.
- [Lee08] E.A. Lee. „Cyber Physical Systems: Design Challenges“. In: *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on*. 2008, S. 363–369.
- [Loc+06] P. Lockemann u. a. „Architectural Design“. In: *Multiagent Engineering - Theory and Applications in Enterprises* (2006), S. 405–430.
- [LYL08] Y. Liu, J. Yang und M. Liu. „Recognition of QR Code with Mobile Phones“. In: *Control and Decision Conference* (2008), S. 203–206.
- [Mar84] E. Martins. „On a multicriteria shortest path problem“. In: *European Journal of Operational Research* 16.2 (1984), S. 236–245.
- [MCC04] Matthew L Massie, Brent N Chun und David E Culler. „The ganglia distributed monitoring system: design, implementation, and experience“. In: *Parallel Computing* 30.7 (2004), S. 817–840.
- [Mic06] S. Michael. „GPGPU Computing and the Heterogeneous Multi-Core Future“. In: *HPC wire* (2006).
- [Mod+06] P. Modi u. a. „Towards a Reference Model for AgentBased Systems“. In: *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'06)*. 2006, S. 1475–1482.
- [MSA12] Mardiyono Mardiyono, Reni Suryanita und Azlan Adnan. „Intelligent Monitoring System on Prediction of Building Damage Index using Artificial Neural Network“. In: *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering* 10.1 (2012), S. 155–164.
- [MVK06] L. Monostori, J. Vancza und S.R.T. Kumara. „Agent-Based Systems for Manufacturing“. In: *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology* 55.2 (2006), S. 697–720.
- [MW01] M. Müller-Hannemann und K. Weihe. „Pareto Shortest Paths is Often Feasible in Practice“. In: *Algorithm Engineering*. Bd. 2141. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2001, S. 185–198.
- [OHH04] E. Ohbuchi, H. Hanaizumi und L. Hock. „Barcode Readers using the Camera Device in Mobile Phones“. In: *Proceedings of the 2004 International Conference on Cyberworlds*. CW '04. IEEE Computer Society, 2004, S. 260–265.
- [Owe+07] J. D. Owens u. a. „A Survey of General-Purpose Computation on Graphics Hardware“. In: *Computer Graphics Forum* 26.1 (2007), S. 80–113.
- [PFR09] M. Pipattanasomporn, H. Feroze und S. Rahman. „Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation“. In: *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*. 2009, S. 1–8.
- [PL05] Liviu Panait und Sean Luke. „Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art“. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 11.3 (Nov. 2005), S. 387–434.
- [Qui+09] M. Quigley u. a. „ROS: An Open-Source Robot Operating System“. In: *ICRA Workshop on Open Source Software*. 2009.
- [RN03] S. Russell und P. Norvig. *Artificial intelligence: a modern approach*. 2. Aufl. Prentice-Hall, Inc., 2003.

- [RW05] P. Rigby und S. Williams. „Adaptive Sensing for Localisation of an Autonomous Underwater Vehicle“. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. 2005.
- [Sal+13] N. Salameh u. a. „Collaborative positioning and embedded multi-sensors fusion cooperation in advanced driver assistance system“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 29.0 (2013), S. 197–213.
- [Sha+09] J. Shalf u. a. „The Manycore Revolution: Will the HPC Community Lead or Follow?“ In: *SciDAC Review* (2009).
- [Shi+11] Jianhua Shi u. a. „A survey of Cyber-Physical Systems“. In: *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2011 International Conference on*. 2011, S. 1–6.
- [SSL07] A. Sun, Y. Sun und C. Liu. „The QR-code reorganization in illegible snapshots taken by mobile phones“. In: *Proceedings of the The 2007 International Conference Computational Science and its Applications*. ICCSA '07. IEEE Computer Society, 2007, S. 532–538.
- [SV00] Peter Stone und Manuela Veloso. „Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective“. In: *Autonomous Robots* 8.3 (2000), S. 345–383.
- [Tim12] Constantin Timm. „Resource Efficient Processing and Communication in Sensor/Actuator Environments“. Dissertation. TU Dortmund, Department of Computer Science, 2012.
- [Tos+08] H. Toshihiro u. a. „A Multi-Sensing-Range Method for Position Estimation of Passive RFID Tags“. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*. 2008, S. 208–213.
- [VD10] A. Vijayaraghavan und D. Dornfeld. „Automated energy monitoring of machine tools“. In: *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology* 59.1 (2010), S. 21–24.
- [VRV05] Mathieu Valle, Fano Ramparany und Laurent Vercoeur. „Flexible composition of smart device services“. In: *In: The 2005 International Conference on Pervasive Systems and Computing(PSC-05), Las Vegas*. 2005, S. 27–30.
- [Wan+11] Jiafu Wan u. a. „A General Test Platform for Cyber-Physical Systems: Unmanned Vehicle with Wireless Sensor Network Navigation“. In: *Procedia Engineering* 24.0 (2011), S. 123–127.
- [WX06] L. Wang und Y. Xiao. „A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks“. In: *Mob. Netw. Appl.* 11 (2006), S. 723–740.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Smart FacE-Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung Teilprojekt: Daten- und Prozessanalyse, -visualisierung, -optimierung sowie -kommunikation innerhalb CPS-gestützter Produktionssysteme	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Frank Weichert, Adrian Böckenkamp	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016
	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2017
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Dortmund Informatik VII Otto-Hahn-Str. 16 44227 Dortmund	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MA13007E
	11a. Seitenzahl Bericht 30
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für BMWi (BMWi) 53107 Bonn	12. Literaturangaben 56
	14. Tabellen
	15. Abbildungen 8
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Projekt SMART FACE ist Teil der Initiative Autonomik 4.0 für die Industrie, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird. Das Projekt wurde Ende 2014 initiiert und befasste sich mit den Herausforderungen durch die Kombination von Cyber-Physical-Systems mit bestehenden Technologien und Produktionsstrukturen. Ziel war die Entwicklung innovativer Lösungen für dezentrale Produktionssysteme (bis zur Losgröße 1), in denen dezentral agierende, teilweise autonome Einheiten (z. B. Montagestationen, Fahrerlose Transportsysteme, und Industrieroboter) für den Warentransport und die Produktion von Gütern auf einem sich selbst-organisierenden Shopfloor verantwortlich sind. Produktionssysteme dieser Art haben den Vorteil, hochindividualisierte Produkte für einen Massenmarkt produzieren zu können, die Fehleranfälligkeit zu verringern und sich unterschiedlichen Marktsituationen anpassen zu können. Demnach wurden im Projekt SMART FACE moderne Konzepte für Sensorik und Aktorik entwickelt, um eine Transformation von der zentralen Planung zu einer selbstorganisierenden Prozessierung auf den Shopfloor zu erzielen. Dabei übernehmen dezentrale Einheiten adaptiv und selektiv differenzierte Arbeiten und Prozessschritte. In dem Kontext ist beispielsweise die Verlagerung der benutzerdefinierten Funktionalität (etwa Lokalisierung) in den Sensor (z. B. Laserscanner) zu nennen. Dies erlaubt integrale Aufgaben dezentral zu übernehmen und die Autonomie der Entitäten zu verstärken. Wesentlicher Bestandteil der erarbeiteten cyber-physischen Produktionssysteme (CPPS) sind daher autonom handelnde Einheiten, ausgestattet mit zunehmend intelligenter Sensorik und Aktorik, um die intelligente Interaktion der Systementitäten mit der Umgebung zu gewähren. Menschliche Arbeiter sind aber weiterhin ein wesentlicher Bestandteil entsprechender Systeme, da sie im Vergleich zu Maschinen die größt-mögliche Flexibilität aufweisen und sich damit ideal in die zuvor beschriebenen Konzepte einbetten.	
19. Schlagwörter Industrie 4.0, schlanke Produktionsplanung, Kleinstserienfertigung, dezentrale Produktions- und Materialflussmechanismen, intelligente Sensor-Aktor-Netzwerke	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Smart FacE-Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung Teilprojekt: Daten- und Prozessanalyse, -visualisierung,-optimierung sowie -kommunikation innerhalb CPS-gestützter Produktionssysteme		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Frank Weichert, Adrian Böckenkamp	5. End of Project 31.12.2016	
	6. Publication Date 30.06.2017	
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	7. Form of Publication	
	9. Originator's Report No.	
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Technische Universität Dortmund Informatik VII Otto-Hahn-Str. 16 44227 Dortmund	10. Reference No. 01MA13007E	
	11a. No. of Pages Report 30	
	11b. No. of Pages Publication	
	12. No. of References 56	
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	14. No. of Tables	
	15. No. of Figures 8	
	16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract The SMART FACE project is part of the Autonomics for Industry 4.0 program, sponsored by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy. The project was launched in late 2014 and addressed the challenges of combining cyber-physical systems with existing technologies and production structures. The aim of the SMART FACE project was to develop innovative solutions for decentralized production systems (up to lot size 1) where decentrally and autonomously acting units (e. g., assembly stations, automated guided vehicles, industrial robots) are responsible for transporting and producing goods on a self-organizing shop floor. Production systems based on these concepts take advantage of the ability to handle mass customization (up to lot size 1), decreased vulnerability to (machine) failures, and the flexibility to adapt to varying selling conditions. Therefore, intelligent Cyber-Physical Production Systems (CPPS) are developed by the SMART FACE project. Essential elements of such CPPS are autonomously interacting units equipped with sensors and actuators to interact with their environment and to allow them to be intelligent, cooperative, and communicative. Within this context actuators and sensors in particular play an important role as enable the intelligent interaction of entities with their environment. It is therefore required to develop modern sensor and actor concepts that integrate user-defined function (like localization) into sensors (like laser scanners) as a "ready to use" feature. This way, sensors are refined to fulfil essential tasks and enable the autonomy of entities. Within the project, the concept of such adaptive behavior of sensors and actors have been defined as well. Human workers are still an important part since they exhibit the largest flexibility that is an important enabler for the concepts.		
19. Keywords Industry 4.0, lean production planning, small batch production, decentralised production und material flow concepts, intelligent sensor and actor networks		
20. Publisher	21. Price	