Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2023–04–65

Flexible Produktionsplanung und -steuerung ohne Takt und starre Verkettung

Agile, frei verkettete Montage real erleben

J. Rachner, S. Wang, J. Mathews, L. Kaven, T. Adlon, A. Göppert, R. H. Schmitt

Im Forschungsprojekt „Aimfree“ wurde eine agile, frei verkettete Montage am Beispiel einer hoch skalierbaren und praxisnahen Batteriemontage realisiert. Durch taktzeitunabhängige Produktrouten und rekonfigurierbare Stationstechnik wurde eine Steigerung der Flexibilität und Resilienz erzielt. Befähigt wurde dies durch die ganzheitliche Integration der intelligenten Planung und Steuerung, des autonomen Fahrens und einer rekonfigurierbaren Infrastruktur.

STICHWÖRTER

Montage, Flexible Fertigungssysteme, Digitale Fabrik

Experiencing an agile, line-less assembly

The research project ‘Aimfree’ puts an agile, line-less assembly system into practice based on a highly scalable and praxis-oriented battery assembly. An increase in flexibility and resilience is achieved through cycle-time-independent product routes and reconfigurable station technology. This was made possible by the holistic integration of intelligent planning and control, autonomous driving, and reconfigurable infrastructure.

1 Einleitung

Zunehmende Variantenvielfalt und schwankende Nachfragemengen erfordern eine hohe Flexibilität in der Automobilproduktion [1]. Besonders in der Endmontage sind die Flexibilitätspotenziale der klassischen „Perlenkette“ bei schwankenden Stückzahlen, veränderlichem Variantenmix sowie der Reaktionsfähigkeit auf Abweichungen und Störungen wegen strikter Taktung und starrer Verkettung ausgeschöpft. Die steigende Variantenvielfalt schlägt sich in hohen Prozesszeitspreizungen nieder und resultiert in Taktzeitverlusten. [2]

Zudem sind produzierende Unternehmen mit kürzer werdenden Produktlebenszyklen konfrontiert [1]. Die notwendige Befähigung der Montage zur Abbildung neuer Produkte erfordert eine hohe Skalierbarkeit. Die Linienmontage stößt dabei an ihre Grenzen. Die Integration neuer Produkte ist häufig nur mit hohem Aufwand möglich. [2]

Hier setzt das Konzept der agilen, frei verketteten Montage an. Grundprinzipien sind die Auflösung der Perlenkette durch die freie Verkettung der Montagestationen sowie die Eliminierung der Taktzeit. Dem vorausgesetzt ist ein flexibler Materialfluss, der durch fahrerlose Transportsysteme (FTS) ermöglicht wird [3]. In Kombination mit multifunktionalen Montagestationen können Produkte mit individuellen Routen und flexiblen Montagesequenzen aufgebaut werden [4]. Zusätzlich wird durch die rekonfigurierbare Stationstechnik und die freie Verkettung eine hohe Skalierbarkeit des Systems erzielt.

Bisher wurden die Potenziale der agilen, frei verketteten Montage meist durch Simulationen untersucht (wie in [5–7]). Zur Validierung der skizzierten Potenziale und Identifikation von Umsetzungshürden ist eine ganzheitliche Umsetzung nötig. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Aimfree“ ein agiles, frei verkettetes Montagesystem anhand einer hoch skalierbaren und praxisnahen Batteriemontage realisiert. Die Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Porsche AG, ipolog GmbH, Siemens AG, Elabo GmbH, BÄR Automation GmbH, Pilz GmbH & Co. KG und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT.

2 Lösungskonzept

Das am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University aufgebaute Montagesystem umfasst alle Komponenten, welche für die Planung und Steuerung eines agilen, frei verketteten Montagesystems erforderlich sind. Durch die in Kapitel 3 –beschriebene modulare Gestaltung der Software- und Kommunikationsarchitektur ist eine theoretische Erweiterung um weitere Stationen und Produkte möglich. Dies gewährleistet die Skalierbarkeit und Anwendbarkeit für den Einsatz in industriellen Umgebungen.

Bild 1 zeigt einen Montageprozess für eine Batterie, dessen Vorranggraph eine Flexibilität in der Reihenfolge bietet.

Das System umfasst insgesamt drei manuelle und eine durch eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuerte, automatisierte Station. An den manuellen Stationen können Prozesse wie etwa Schrauben und Fügen durchgeführt werden. Prüfprozesse sind jedoch nur an Station 2 möglich. Zusätzlich gibt es ein Lager, in dem die Materialien gelagert werden.

Das System berücksichtigt die zur Umsetzung eines agilen, frei verketteten Montagesystems relevanten Gestaltungsfelder der Planung und Steuerung, der rekonfigurierbaren Infrastruktur, des autonomen Fahrens im End-of-Line-Bereich sowie dem zugrunde

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

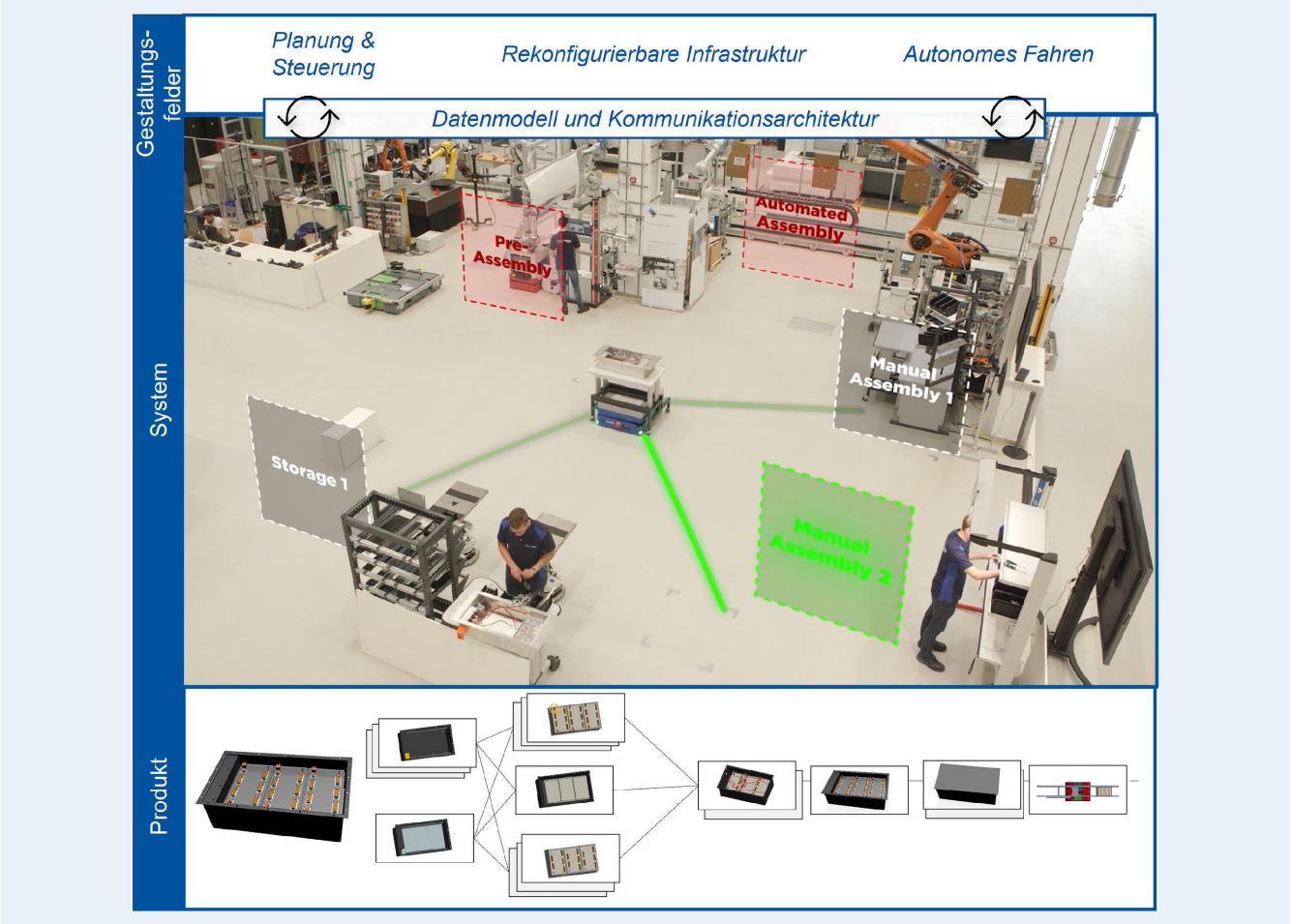

Bild 1. Übersicht des Systems für die agile, frei verkettete Batteriemontage. *Grafik: WZL | RWTH Aachen University*

liegenden Datenmodell und der Kommunikationsarchitektur, die im Folgenden vorgestellt werden.

3 Intelligente Planung und Steuerung

3.1 Softwarearchitektur

Agile, frei verkettete Montagesysteme sind geprägt durch eine erhöhte Komplexität in der Planung und Steuerung, da die flexiblen Auftragsrouten mehr Freiheitsgrade ermöglichen. Es wurde eine für das Projekt entwickelte Softwarearchitektur umgesetzt und validiert (**Bild 2**).

In detaillierten Simulationsstudien konnten in vorherigen Untersuchungen die Potenziale eines agilen, frei verketteten Systems für die automobile Endmontage gezeigt werden: Während die starre Linienmontage bei voller Verfügbarkeit höchste Effizienz erzielt, reagieren flexible System deutlich robuster auf Störungen im laufenden Betrieb, die beispielsweise durch technische Ausfälle, Materialknappheit oder Personalmangel entstehen können [7]. Für die Umsetzung eines agilen frei verketteten Montagesystems werden Szenarioanalysen mittels Simulation verwendet, um den entstandenen Flexibilitätsgrad in die Planung des Montagesystems aufzunehmen. Neben der Vorabplanung werden die Simulationsmodelle auf Basis des durchgängigen Datenmodells im Sinne des digitalen Zwillings kontinuierlich aktualisiert und verwendet, zum Beispiel um bei der Integration eines neuen Produktes als Entscheidungsunterstützungssystem alternative Systemkonfigurationen zu finden. Die Modellierung des digitalen Zwillings stellt dabei sicher, dass alle Daten einem einheitlichen Datenmodell folgen und damit für alle Softwaresysteme bereitstehen.

Im Steuerungssystem spielen das Leitsystem und die Steuerungsalgorithmen eine zentrale Rolle in der Abwicklung und Kommunikation von Aufträgen im Montagesystem. Die Auftragsfreigabe als wesentlicher Bestandteil der Steuerung antizipiert die möglichen, flexiblen Auftragsrouten der freigegebenen sowie freizugebenden Aufträge, um anhand dieser einen Kapazitätsabgleich anhand des aktuellen Systemzustands durchzuführen. Dieser erlaubt eine gleichmäßige Auslastung der Montagestationen und wirkt sich somit positiv auf die Effizienz des Montagesystems aus [8]. Um maximale Flexibilität während der Montage eines Produkts zu erreichen, beruht die Auftragssteuerung auf reaktivem Online-Scheduling und KI-Algorithmen wie „AlphaZero“ [9].

Das Flottenmanagementsystem ist für die Auswahl des fahrerlosen Transportfahrzeuges für Produkt- und Materialtransporte zuständig. Zudem wird der Verkehr geregelt, indem Vorfahrtsregeln implementiert und kontrolliert werden. Die FTS erhalten gemäß VDA-5050-Richtlinie Wegpunkte und Wegkanten per MQTT (Message Queueing Telemetry Transport)-Nachricht gesendet und fahren dann frei navigierend, basierend auf SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)-Algorithmen, zwischen den Punkten. [10]

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

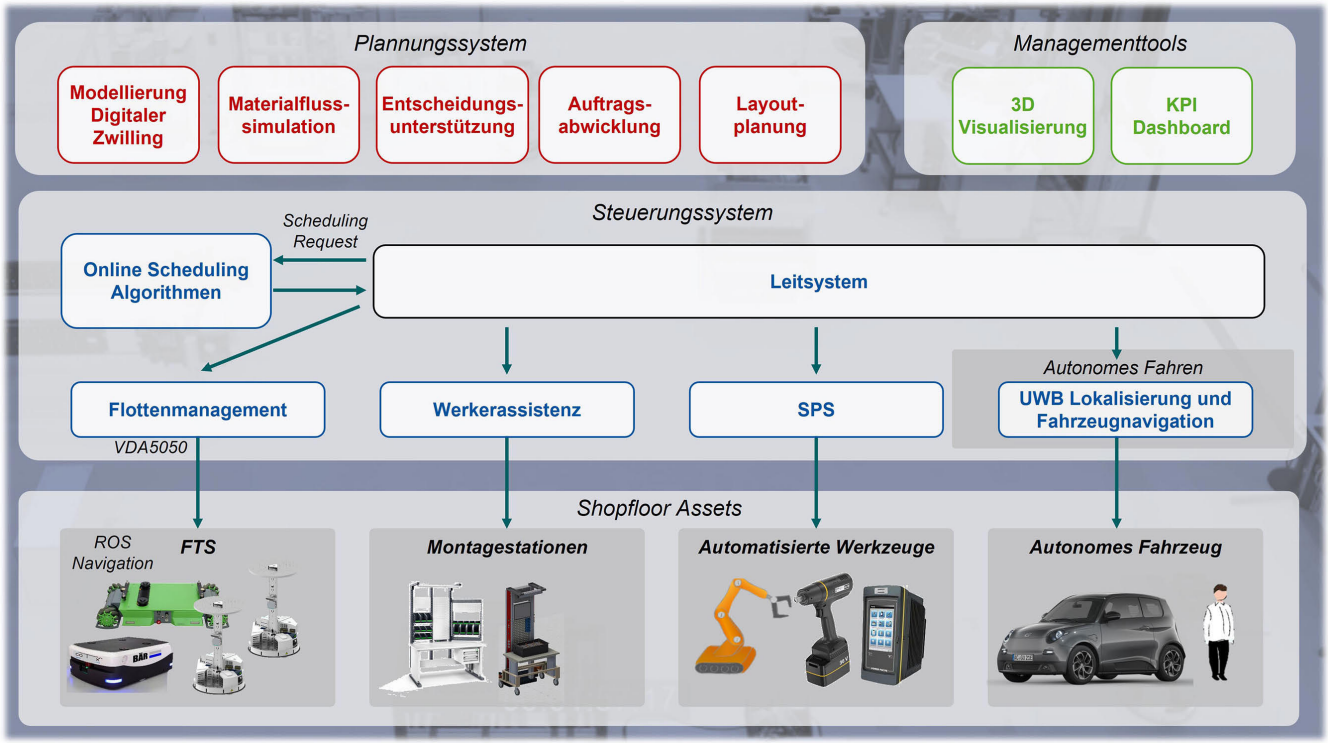

Bild 2. Implementierte Steuerungs- und Kommunikationsarchitektur. *Grafik: WZL | RWTH Aachen University in Anlehnung an [11]*

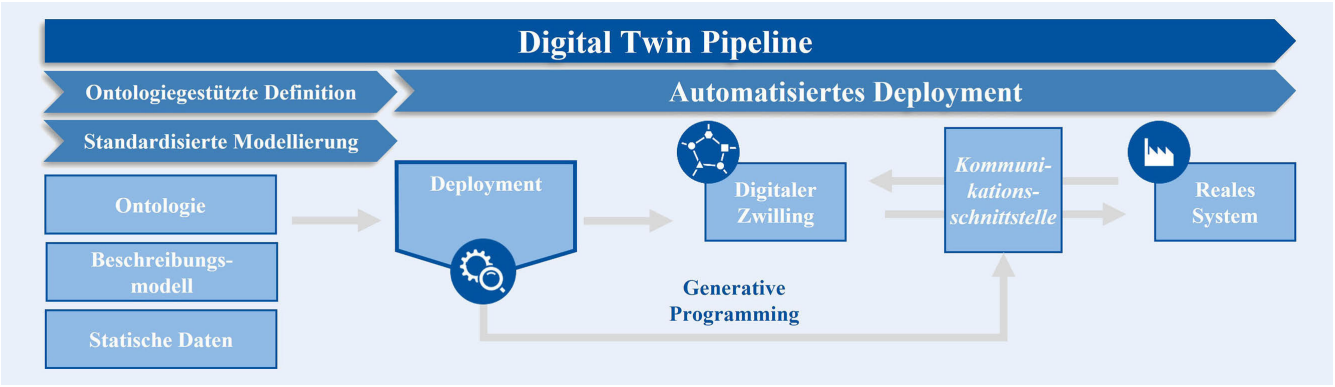

Bild 3. Automatisiertes Deployment der digitalen Zwillinge durch den Einsatz der Digital Twin Pipeline.
Grafik: WZL | RWTH Aachen University in Anlehnung an [13]

Die Information des nächsten Prozessschritts wird von dem Leitsystem an die ausgewählte Station weitergeleitet. Dort zeigt ein adaptives Werkerassistenzsystem die passende Anleitung zu dem nun ausgewählten Prozessschritt an und sammelt Daten bei Prüfprozessen.

Bei automatisierten Prozessen regelt eine Stations-SPS den Ablauf in der Station. Diese erhält vom Leitsystem und Flottenmanagement die Informationen über den auszuführenden Prozess und steuert die Einfahrtsfreigaben der FTS sowie das Drehmoment des automatisierten Schraubprozesses.

Damit die Komplexität beherrschbar bleibt, nutzt innerhalb der Managementtools eine 3D-Visualisierung basierend auf einer Gaming Engine die vorhandenen Informationen im digitalen Zwilling zur realitätsnahen Visualisierung. Innerhalb der Visualisierung werden beispielsweise Positionen der FTS, aber auch aktuelle Statusinformationen als KPI (Key Performance Indicator)-Dashboard angezeigt.

3.2 Datenmodell und Kommunikationsarchitektur

Eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb eines frei verketteten Montagesystems ist der funktionierende Informationsaustausch zwischen den einzelnen Modulen der Softwarearchitektur [11]. Für den interoperablen Datenaustausch wird ein digitaler Zwilling des Produktionssystems, also eine digitale Repräsentation aller Produktionsressourcen, Produkte und Prozesse, genutzt [12, 13]. Zur Modellierung und Erstellung der digitalen Zwillinge wird die im Projekt entwickelte Digital Twin Pipeline verwendet (**Bild 3**) [14]. In den ersten beiden Phasen der Pipeline wird ein anwendungsfallspezifisches Beschreibungsmodell erstellt.

Das Beschreibungsmodell basiert auf der Manufacturing's Semantics Ontology (MASON-Ontologie), die entsprechend des Anwendungsfalls der frei verketteten Montage modifiziert wurde [15]. Hierdurch folgen alle kreierten digitalen Zwillinge einem

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Bild 4. FTS (fahrerlose Transportsysteme) mit entwickeltem Adapter zur Aufnahme des Arbeitstisches. *Foto: WZL | RWTH Aachen University*

gemeinsamen Datenmodell mit festgelegter Struktur, Semantik und Meta-Informationen. Anschließend werden die digitalen Zwillinge mit statischen Informationen wie zum Beispiel dem Datenblatt der Maschine angereichert. Danach werden sie in das Informationssystem des Steuerungssystems integriert und eine Kommunikationsschnittstelle generiert, die den Datenaustausch zwischen realem System und digitalem Zwilling ermöglicht.

Die gesamte Kommunikation basiert auf dem MQTT-Protokoll, in welchem die Nachrichten über einen Broker nach dem Publish-Subscribe-Prinzip verschickt werden. Da der Informationsfluss nicht streng hierarchisch ist, unterstützt er den modularen Aufbau der Softwarearchitektur und ermöglicht eine einfache Anpassbarkeit des Systems.

Grundsätzlich folgend die verschickten MQTT-Nachrichten dem Aufbau des verwendeten Beschreibungsmodells. Dabei können bestehende Standards in das Beschreibungsmodell integriert werden. Im vorgestellten Demonstrator erfolgt die Kommunikation mit FTS von drei verschiedenen Herstellern über eine VDA-5050-konforme Schnittstelle [16]. Die VDA-5050-Spezifikation definiert die Nachrichteninhalte und Nachrichtenstruktur sowie über welche Topics die Informationen zwischen FTS und dem Flottenmanagement ausgetauscht werden. Die Kombination des Fahrzeugherstellers mit einer FTS-Seriennummer dient der eindeutigen Identifikation ein- und ausgehender Nachrichten für ein FTS.

4 Rekonfigurierbare Infrastruktur

Der Ansatz der agilen Montage sieht eine dynamische Rekonfiguration des Montagesystems vor, um auf Veränderungen des Produktmixes, Nachfrageschwankungen oder Materialknappheiten reagieren zu können. Der Einsatz flexibler, mobiler Montagestationen erlaubt die kurzzyklische Anpassung des gesamten Montagelayouts, beispielsweise über Nacht, und die dynamische Bereitstellung von Spezialkomponenten (wie etwa Prüfwagen) an jeder Station.

Im Zuge des Projektes wurde dafür flexibel aufgebaute Intralogistik-, Zuführ- und Stationstechnik entwickelt. Das Konzept basiert auf einem modularen Arbeitstisch mit mobilen Materiallagerregalen, Handling-Geräten und Montagevorrichtungen. Die Module sind mit RFID (Radio-Frequency Identification)-Chips ausgestattet, sodass das Werkerassistenzsystem der Station neue Module (wie etwa Regal) erkennt und in die Stationssteuerung integriert. Die Mobilisierung der Module erfolgt autonom durch FTS, die mit einem modularen Greifwerkzeug ausgestattet wurden (**Bild 4**). Mithilfe 3D-gedruckter Adapter kann eine Vielzahl an Stationstechnik aufwandsarm für den Transport mit den FTS umgerüstet werden.

Im Vergleich mit dem traditionellen, statischen Montageansatz resultieren aus der Rekonfigurierbarkeit ein erhöhter Grad der Wiederverwendbarkeit. Die Lebensdauer eines Montagesystems kann durch aufwandsarme Anpassung flexibel länger genutzt werden. Zudem ermöglicht die autonome Layoutanpassung eine sch nelle Umsetzung einer Umplanung und damit die Verringerung von Warte- und Stillstandszeiten.

5 Effizienzsteigerung durch autonomes Fahren in der Fabrik

Über die gesamte Distributionskette hinweg durchlaufen Fahrzeuge eine hohe Anzahl an manuellen Bewegungen. Ab der Fahrzeugprüfung im End-Of-Line-Bereich (EOL) bis hin zur Auslieferung entstehen im Schnitt 25 manuelle Fahrzeugbewegungen [17]. Bislang wird jede dieser Fahrzeugbewegungen von Mitarbeitenden durchgeführt. Vor diesem Hintergrund bietet das autonome Fahren hohe Einsparungspotenziale beim Personaleinsatz und Flächenbedarf. Das autonome Fahren wurde ab dem End-Of-Line-Bereich des Montagesystems am Beispiel eines Elektrofahrzeugs auf Einsparungspotenziale untersucht (**Bild 5**). Durch die Automatisierung ist ein um bis zu 40 % verminderter Flächenbedarf beim Parken auf dem Werksgelände möglich. [18]

Für die Aufnahme und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist das Fahrzeug mit einem Sensor-Set aus Light Detection and Ranging (LiDAR), Trägheitsnavigationssystem (IMU) und Global Navigation Satellite System (GNSS) ausgestattet.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und übergeordnetem Leitsystem basiert auf der UWB (Ultra-Wideband)-Technologie. Außerdem ermöglicht die entwickelte Automatisierungsstruktur sowohl die Lokalisierung, Kartierung und Bewegungsplanung des Fahrzeugs als auch die Ansteuerung der Fahrzeugaktorik.

Die Selbstlokalisierung des Fahrzeugs basiert auf den eingehenden Sensordaten sowie Algorithmen zur simultanen Positionsbestimmung und Kartierung (SLAM). Dazu werden Odometrie-Daten abgeleitet, wobei eine zusätzliche Robustifizierung

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

durch die Fusion mit externen Lokalisierungsdaten erzielt wird. Innerhalb der Fabrik erfolgt dies über UWB-Tracking-Tags. Im Außenbereich werden GNSS-Daten herangezogen.

Darüber hinaus ist eine zuverlässige Hinderniserkennung für das autonome Fahren essenziell. Dazu wurde ein Computer-Vision-Algorithmus entwickelt, der die zuverlässige Hinderniserkennung anhand von Kamerabildern der Monokamera ermöglicht [19]. Ein Algorithmus zur Erkennung von Anomalien in Bildaufnahmen wurde untersucht. Dabei wird das künstliche neuronale Netz mit Bildern einer Hallenumgebung im „Normalzustand" trainiert. Abweichungen hiervon werden als anormal – also als Hindernis – erkannt. Im Rahmen von Aimfree wurde der Ansatz weiterentwickelt und mit etablierten Methoden der Bildverarbeitung verglichen. [20]

6 Fazit und Ausblick

Die starre Linienmontage stößt unter den aktuellen Herausforderungen an Resilienz und Flexibilität an ihre Grenzen. Im AIMFree-Projekt wurde ein agiles, frei verkettetes Montagesystem realisiert, welches die Beherrschung der Komplexität durch die richtige Softwarearchitektur und ein einheitliches Datenmodell aufzeigt. Digitale Tools werden genutzt, um die Planung, Steuerung und Visualisierung zu ermöglichen. Durch das autonome Fahren im End-of-Line-Bereich wird der Einsatzbedarf reduziert, während die Sicherheit weiterhin gewährleistet ist.

Weiterer Forschungsbedarf besteht noch in der Detaillierung des Intralogistikkonzeptes und in der Entwicklung sowie angepassten Personalplanung für die manuellen Montageprozesse. In Zukunft wird das System erweitert, um das Remanufacturing von Batterien zu demonstrieren. Dafür werden Demontageprozesse integriert, in denen nach Ende des ersten Lebenszyklus Batterien bis auf Zellebene demontiert und geprüft werden, um dann nach einer Aufbereitung einen zweiten Lebenszyklus oder die Nutzung in einem anderen Anwendungsfall zu ermöglichen.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojekts „Aimfree", das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen der „Richtlinie über eine gemeinsame Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Elektromobilität" (Förderkennzeichen: 01MV19002A) gefördert und vom Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-PT) unterstützt wird.

Bild 5. Autonomes Fahren im End-of-Line-Bereich.
Foto: WZL | RWTH Aachen University

Literatur

[1] Bertram, S.; Burggräf, P.; Dannapfel, M. et al.: Agile Low-Cost Montage. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R. et al. (Hrsg.): Internet of Production für agile Unternehmen. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai. Aachen: Apprimus Verlag 2017, S. 231–259

[2] Feldkamp, N.; Bergmann, S.; Straßburger, S.: Modellierung und Simulation von modularen Produktionssystemen. Tagungsband zu ASIM Fachtagung: Simulation in Produktion und Logistik 2019. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2019

[3] Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P. et al.: Simulation of matrix-structured manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) part 1, pp. 104–112

[4] Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Adlon, T. et al.: Multiagentensysteme in der Agilen Montage. wt Werkstattstechnik online 110 (2020) 04, S. 170–176. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien

[5] Greschke, P.: Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2016

[6] Bochmann, L. S.: Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für variantenreiche Produkte. Dissertation, ETH Zürich, 2018

[7] Rachner, J.; Kaven, L.; Voet, F. et al.: Simulation-based potential analysis of line-less assembly systems in the automotive industry. TechRXiv (2022), doi.org/10.36227/techrxiv.19772977.v1

[8] Schukat, E.; Rachner, J.; Maidl, A. et al.: Agent-based Order Release in Matrix-Structured Assembly Systems. Hannover : publish-Ing 2022

[9] Göppert, A. M. R.: Artificial intelligence in online scheduling of dynamically interconnected assembly systems. Dissertation, RWTH Aachen University, 2022

[10] Verband der Automobilindustrie VDA: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA 5050, Version 2.0.0. Stand: Januar 2022. Internet: www.vda.de/dam/jcr:a059f08e-15ad-4d9e-b285-c0f657ba-da3c/VDA5050-V2_0_0-DE.pdf. Zugriff am 17.04.2023

[11] Hüttemann, G.; Buckhorst, A. F.; Schmitt, R. H.: Modelling and Assessing Line-less Mobile Assembly Systems. Procedia CIRP 81 (2019), pp. 724–729

[12] Mathews, J. B.; Rachner, J.; Kaven, L. et al.: Industrial Applications Of A Modular Software Architecture For Line-Less Assembly Systems Based On Interoperable Digital Twins. Frontiers in Mechanical Engineering, Section Digital Manufacturing 9 (2023)

[13] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: Chatti, S.; Tolio, T. (Eds.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Heidelberg: Springer 2019, S. 1–8

[14] Göppert, A.; Grahn, L.; Rachner, J. et al.: Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing (2021), doi.org/10.1007/s10845–021–01860–6

[15] Lemaignan, S.; Siadat, A.; Dantan, J.-Y. et al.: MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain. IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06), Prague, Czech Republic, 2006, pp. 195–200

[16] Kaven, L.; Abele, E.; Göppert, A. et al.: Digital Twin Pipeline zur VDA-5050-Integration. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 5, S. 327–331

[17] Hjalmarsson-Jordanius, A.; Edvardsson, M.; Romell, M. et al.: Autonomous Transport: Transforming Logistics through Driverless Intelligent Transportation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2672 (2018) 7, pp. 24–33

[18] Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Vierschilling, S. P. et al.: Selbstfahrende Pkw in der Distributionslogistik. ATZproduktion 7 (2020) 2, S. 52–55

[19] Wenning, M.; Backhaus, A. A.; Adlon, T. et al.: Testing the reliability of monocular obstacle detection methods in a simulated 3D factory environment. Journal of Intelligent Manufacturing 33 (2022) 7, pp. 2157–2165

[20] Wenning, M.; Adlon, T.; Burggräf, P.: Anomaly detection as vision-based obstacle detection for vehicle automation in industrial environ-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

ment. Frontiers in Manufacturing Technology, Section Automated
ystems 2 (2022), doi.org/10.3389/fmtec.2022.918343

Jonas Rachner, M.Sc.
Foto: WZL | RWTH Aachen University
Siyuan Wang, M.Sc.
Lea Kaven, M.Sc.
Tobias Adlon, M.Sc.

Dr.-Ing. **Amon Göppert**
Prof. Dr.-Ing. **Robert H. Schmitt**
WZL | RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52064 Aachen
Tel. +49 711 / 80-26950
j.rachner@wzl-mq.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de

Julius Mathews, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. **Robert H. Schmitt**
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, 52064 Aachen
www.ipt.fraunhofer.de

LIZENZ
Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-65 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY