

Selbstoptimierung hybrid-autonomer Montagezellen

Autonome Montagezellen in Matrix-Produktionssystemen

U. Frieß, L. Oberfichtner, A. Hellmich, M. Lorenz, S. Ihlenfeldt

Der Beitrag beschreibt einen Ansatz, mit dem autonome Montagesysteme ihre Eigenschaften durch lokale Selbstoptimierung verbessern. In Abgrenzung zu bestehenden Systemen ist dieser Ansatz für kleine und mittlere Chargen wesentlich besser geeignet, da die notwendige Anlagentechnik weniger komplex und adaptiv einsetzbar ist sowie eine sequenzielle Einbindung von Handarbeitsplätzen im Sinne „hybrid-autonomer Zellen“ vorsieht. Zudem wird die Einbettung des Konzepts in eine matrixbasierte Produktion aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Montage, Flexible Fertigungssysteme

Self-optimization of hybrid-autonomous assembly cells in matrix-based production systems

This article describes an approach how autonomous assembly systems use local self-optimization to improve their properties. In contrast to existing systems, this approach is much more suitable for small and medium-sized batches, since the system technology is less complex, can be used more adaptively and a sequential integration of manual workstations is planned in the sense of „hybrid autonomous cells“. Also, the embedding of the concept in a matrix-based production is presented.

1 Einleitung

Aktuelle politische, wirtschaftliche und ökologische Entwicklungen setzen die europäische Industrie stark unter Druck. Bedeutende Wertschöpfungsketten sind bei vielen industriellen Ressourcen, Rohstoffen, Halbfertigwaren und ganzen Komponenten auf einzelne Lieferanten angewiesen. Gleichzeitig muss – so die gesellschaftliche und politische Zielsetzung – die europäische Industrie innerhalb eines beispiellos kurzen Zeitrahmens klimaneutral werden.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, sind Flexibilität, Adaptivität und Wandlungsfähigkeit von entscheidender Bedeutung, auch auf der Grundlage adaptiver, autonom agierender Montage- und Demontagesysteme, die zudem resilient gegenüber äußeren Einflüssen sind. In der Vergangenheit wurde die Produktion und Montage hochwertiger Komponenten in entwickelten Volkswirtschaften zunehmend automatisiert, um den Marktanforderungen und dem wirtschaftlichen Druck gerecht zu werden. Zudem ermöglichte die „Just-in-time“-Lieferung von Halbfabrikaten und Rohstoffen auf der Grundlage globaler Lieferketten ein in der Geschichte einmaliges Produktivitätsniveau.

Diese starren und auf lange Transportwegen angewiesenen Konzepte sind aber anfällig für ungeplante externe Ereignisse mit entsprechenden Nachfrageschwankungen sowie aus ökologischen Gründen zunehmend unhaltbar. Klassische Automatisierungskonzepte wie Montagelinien sind nicht geeignet sowohl Qualitäts- als auch Quantitätsschwankungen zu bewältigen und Teilevariationen abzubilden. Der technische und wirtschaftliche Aufwand für

eine Automatisierung auf dieser Basis ist sehr hoch, zudem fehlen die kognitiven Fähigkeiten des Menschen, um Prozesse adaptiv auszuführen und für die nachfolgenden Tätigkeiten flexibel anzupassen (beispielsweise die situationsabhängige Bewertung/ Ergebniskontrolle/ Fortsetzung des Ablaufes). Aufgrund der hohen Investitionen für die notwendige Rekonfigurierung bei Produktwechsel oder Produktvolumenanpassungen sind diese Ansätze für kleine und mittlere Chargen ungeeignet.

Jüngste Entwicklungen bei cyber-physischen Systemen erlauben neue Produktionsanordnungen durch die Verkettung individuell beplanbarer Produktionszellen, zum Beispiel durch flexible Transportsysteme (FTS). Diese Produktionsarchitektur wird oft als Matrix-Produktion bezeichnet. Der Beitrag stellt ein Konzept für ein solches System einschließlich der wichtigsten zu erfüllenden Voraussetzungen mit dem Fokus auf Montageprozessen vor. Darauf aufbauend werden die Anforderung an die Aufgabenverteilung auf lokaler und globaler Ebene qualitativ beschrieben. Eine stapelweise Zuweisung von Teilaufgaben an autonome roboterbasierte Systeme und die manuelle Montage vor Ort führen zu maximaler Flexibilität und nutzen gleichzeitig die Vorteile beider. Eingegangen wird auch auf notwendige mathematische Ansätze zur Optimierung in einem derartig flexiblen Produktionssystem. Dies ist Grundvoraussetzung für die schrittweise Verbesserung der Produktion in den oben genannten Aspekten. Auch wird eine hybrid-autonome Zelle, die sowohl Roboterstationen als auch manuelle Stationen nutzt, als ein Element einer Matrix-Produktion qualitativ und ihren Kerntechnologien beschrieben.

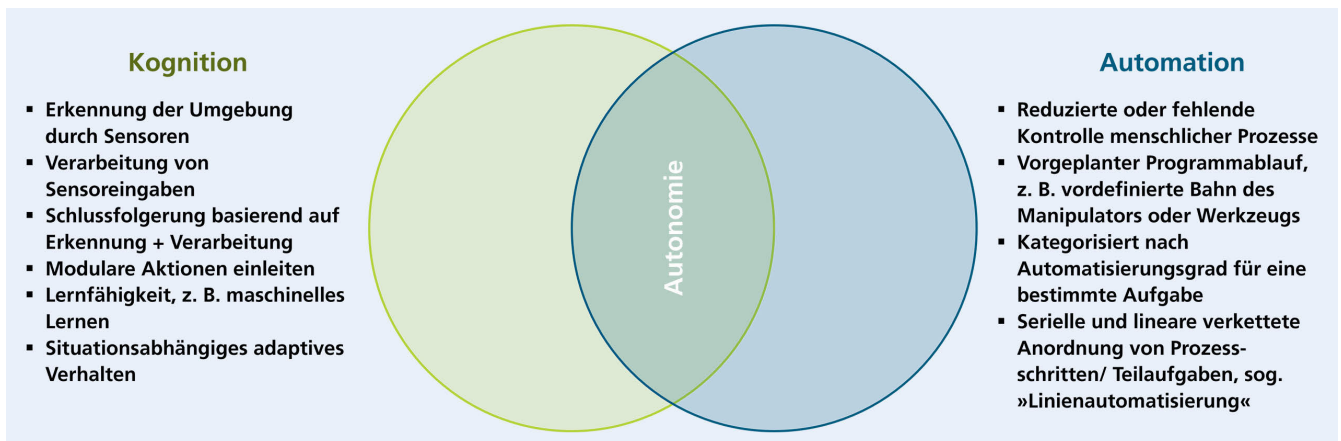


Bild 1. Autonomie als Schnittmenge zwischen Kognition und Automation. Grafik: Fraunhofer IWU angelehnt an [3]

1.1 Autonomie als Schnittmenge zwischen Kognition und Automatisierung

Aktuelle Entwicklungen in der Robotik und cyber-physischen Systemen sind geeignet die geschilderten Herausforderungen zu bewältigen. Die Kombination „kognitiver Fähigkeiten“ mit einer Automatisierung auf Basis von Robotersystemen ermöglicht autonome (Montage- und Demontage-) Systeme (**Bild 1**).

Diese Systeme können teils unabhängig vom Zustand des Bauteils agieren und sind in der Lage, Montageprozesse in Reihenfolge und Prozessparametern anzupassen. Ihre Hauptmerkmale sind die erkenntnisbasierte Anpassung der Montage und Demontage. Wenn einzelne autonome Systeme in einer cyber-physischen Umgebung miteinander verknüpft werden, werden Matrix-Konzepte möglich [1]. Ein bestimmtes Produkt kann durch eine Reihe dynamisch verbundener Matrixzellen zusammengebaut oder zerlegt werden, wobei jede Zelle einzeln gesteuert und dynamisch für bestimmte Zielkriterien (zum Beispiel Energieminimierung) optimiert wird, während externe oder interne Qualitätsschwankungen der Eingangsteile toleriert werden.

Eine erfolgreiche Implementierung solcher Systeme ist nicht nur technologisch, sondern auch wirtschaftlich und hinsichtlich der Eintrittsbarrieren eine Herausforderung. Die Montage und Demontage von kleinen und mittleren Losgrößen sowie Komponenten mit nahezu unbegrenzten Konfigurationsmöglichkeiten wie Surface-mounted devices (SMD-Bauteile wie Leiterplatten) oder Schaltschränken erfordert ein schrittweises Vorgehen von 100 % manueller Handwerkskunst zu 100 % autonomer Automatisierung. Der Beitrag stellt ein solches Konzept vor, indem er eine hybrid-autonome Montagestation qualitativ beschreibt und wichtige technologische Voraussetzungen identifiziert. Besonders die schrittweise und datenbasierte Optimierung der autonomen Montage „vor Ort“ stellt einen Schlüsselbaustein dar, um autonome Montagesysteme trotz einer initial geringeren Produktivität gegenüber einer manuellen Ausführung einzuführen.

1.2 Klassifizierung der autonomen Montage nach Fähigkeitslevel

Für die Klassifizierung und den Vergleich autonomer Systeme ist die Etablierung einer Taxonomie erforderlich. Dies ermöglicht es, den aktuellen Zustand des Systems einzuordnen und Ziele für einen Übergang auf eine höhere Ebene zu definieren. Diese

sollten nicht als starre Stufenmodelle angesehen werden, da eine starke Abhängigkeit zum durchzuführenden Prozess und dessen Anforderungen besteht. Beispielsweise wird im Automobilbereich (autonomes Fahren) eine 6-stufige Taxonomie verwendet, in der Luftfahrt (UAV) eine 11-stufige Taxonomie und in der Bahntechnik eine 5-stufige Taxonomie [2, 3].

Typisch ist die Nutzung der Autonomiestufen, angelehnt an das autonome Fahren, in weiteren Bereichen. Dabei werden die allgemeinen Fähigkeiten autonomer Systeme, bezogen auf Anwendungen in der industriellen Produktion, in sechs Stufen eingeteilt. Mit zunehmendem Autonomiegrad werden allgemeine Systemeigenschaften wie Entscheidungsbefugnis, Kontrolle, Überwachung sowie die Tätigkeiten der Programmierung und Projektplanung sukzessive an das technische System übergeben und von diesem ausgeführt. Entscheidend für die Übernahme von Entscheidungs- und Überwachungsaktivitäten sind die kognitiven Fähigkeiten des technischen Systems (künstliche Intelligenz, maschinelles Lernen).

Die existierenden Taxonomien autonomer Systeme sind auf Montage- und Demontagesysteme nur bedingt anwendbar. So ist in der Taxonomie für das autonome Fahren der Grad der Umgebungswahrnehmung in jedweder klimatischen Situation zentral zur Unterscheidung in Fähigkeitslevel, welche auf Montage- und Demontagesysteme nicht direkt übertragbar sind. Aus diesem Grund ist in **Bild 2** [2, 4] eine Taxonomie für Montage- und Demontagesysteme anhand des Beispiels dargestellt.

Für jede der vier dargestellten Stufen sind charakteristische Eigenschaften und Technologien aufgeführt. Jede Ebene zeichnet sich durch unterschiedliche Eigenschaften des Systems aus, etwa unterschiedliche Nutzung von kognitiven Fähigkeiten und Automatisierungstechnologien wie KI, maschinelles Lernen, Robotik und Sensoren. Mit jedem Levelanstieg wird das System „intelligenter“ und anpassungsfähiger und erhöht so den Grad der Autonomie.

Montage und Demontage sind durch unterschiedliche Prozesse, wie Fertigungsverfahren und Fügevorgänge, geprägt. Diese sind im Kontext des jeweiligen Produktes mit dessen spezifischen Randbedingungen zu betrachten. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an den Prozess und dessen Umsetzung mittels Hardware (wie Robotik, Aktorik, Sensorik) und Software. Für das gewählte Beispiel „Pick-and-Place-Anwendung wurde daher mit einem Handlingroboter“ die Aufgabenstellung Hardware-Ressourcen teilweise definiert. Mit steigender Stufe ist die Pick-

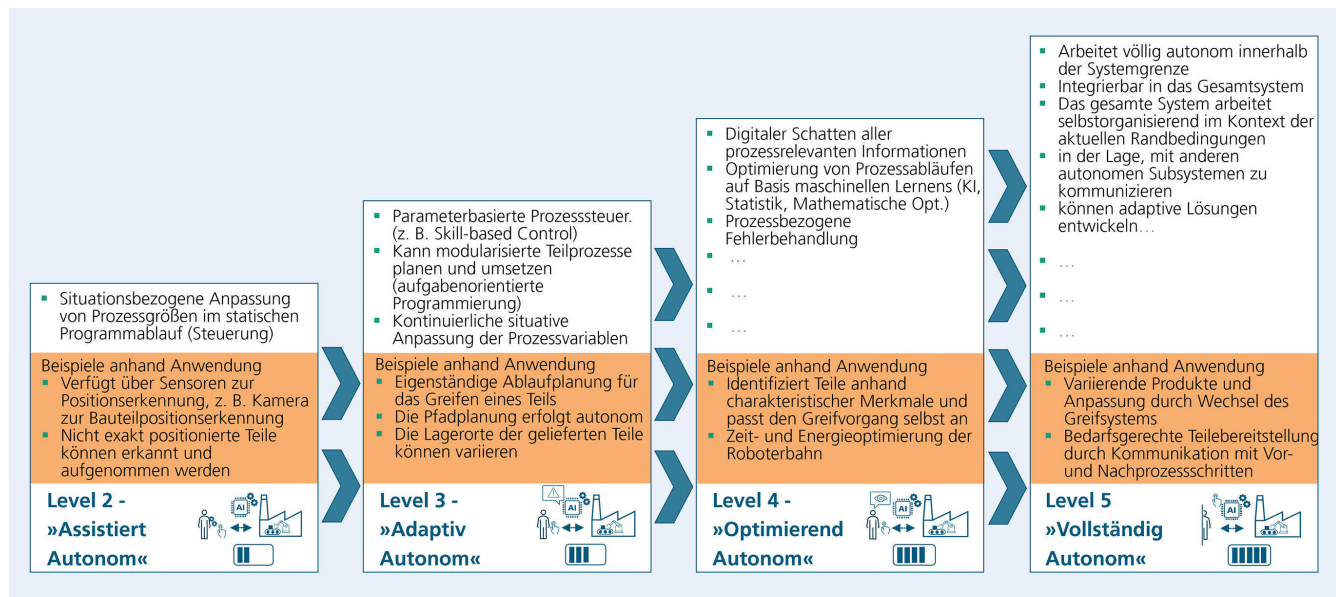


Bild 2. Einteilung des Autonomiegrads am Beispiel eines Handlingroboters mit Pick-and-Place-Anwendung. Grafik: Fraunhofer IWU in Erweiterung zu [4] und [2]

and-Place-Station in der Lage, weitere Aufgaben zu übernehmen und sich selbstständig an veränderte Situationen anzupassen, das heißt sie erhöht ihre Adaptivität und Flexibilität. Mit der Zeit kann das System komplexere Situationen bewältigen, von der Kompensation von Ungenauigkeiten über die Reihenfolgeplanung bis hin zu Identifikations- und Optimierungsaktivitäten. Abhängig vom Produkt, der Aufgabenstellung, den notwendigen Prozessen und der Struktur des Systems, also den eingesetzten Hard- und Softwareressourcen, können die Eigenschaften und Fähigkeiten stark variieren und unterschiedlich ausgeprägt sein.

1.3 Herausforderungen für die autonome Montage

Die erfolgreiche Umsetzung der autonomen Montage mittels roboterbasierter Zellen in matrixbasierten Produktionssystemen bringt Herausforderungen mit sich, die in autonomen Systemen für andere Anwendungsbereiche, wie selbstmontierende Raumfahrzeuge, nicht auftreten:

1. Wirtschaftlicher Druck, einschließlich begrenzter Gesamtkosten für die Ausrüstung
2. Instandhaltungsaufwand, vor allem im Vergleich zur manuellen Montage
3. Vergleichbare Montagezykluszeiten und vergleichbare Ausfallraten zur manuellen Montage
4. Vergleichbarer Umfang der Aufgabe, insbesondere für sensomotorisch anspruchsvolle Montagen
5. Notwendige Sicherheitsanforderungen und -konzepte

Diese technologischen Anforderungen verhindern den Einsatz autonomer Robotersysteme bei vielen typischen Montageaufgaben.

2 Stand der Technik

Autonome Montagesysteme und ihre notwendigen Fähigkeiten im industriellen Umfeld sind ein vergleichsweise neues Forschungsthema. Erste Überlegungen im akademischen Umfeld auf Basis von früher Robotik erschienen vor über 30 Jahren [5], eine Weiterentwicklung des Forschungsfeldes oder eine Nutzung im industriellen Umfeld resultierte jedoch nicht. Den Stand der

Technik um 2005 fassen *Reiter* und *Freitag* zusammen [6]. In neuerer Zeit werden autonome Systeme oft mit Blick auf Raumfahrtanwendungen betrachtet. Diese Anwendungen erfordern per Definition eine ganzheitliche Autonomie. Die Aufgabenzuweisung einschließlich Aufgabensequenzen und Aufgaben-zu-Roboter-Zuordnung wird in [7] für Raumfahrtanwendungen besprochen. *Roa* [8] liefert eine Potenzialanalyse der Robotertechnologie für die autonome Montage großer Weltraumteleskope einschließlich Demonstratoren des EU-Projekts Pulsar (Prototype of an Ultra Large Structure Assembly Robot). *Schnellhardt* [9] schlägt die Nutzung einer autonomen segmentierungs- und montagebasierter Prozesskette vor, um große Komponenten auf kleinen Maschinen skalierbar herzustellen. *Olszewska* [10] beschreibt einen Ontologiestandard für die Nutzung im Umfeld der autonomen Montage.

Weyrich [11] entwarf eine der ersten Architekturen zur automatisierten Demontage von Batterien. *Gronau* [12] entwickelte eine Methodik, um durch Simulation ein optimales Autonomie-niveau von cyberphysischen Produktionssystemen zu definieren. Er liefert bereits Schlüsselansätze für zentrale Herausforderungen in der Demontage wie Multi-Agenten-Systeme zur Komponente-identifikation auf Basis einer Datenbankerkennung mittels Bildverarbeitung sowie agentenbasierter Sequenzierung. In vieler Hinsicht sind die Herausforderungen bei autonomen Fahrzeugen und autonomen Robotern für Serviceaufgaben die gleichen wie bei Industrierobotern für die Montage. Typische Schlüsseltechnologie-Enabler sind Ansätze des maschinellen Lernens oder der künstlichen Intelligenz. Ein prominentes Beispiel sind Transportroboter von Boston Dynamics wie „Atlas“ oder „Spot“ [13].

Ein neuer Ansatz zur Organisation von Produktions- und Montagesystemen und Steigerung der Belastbarkeit und Flexibilität ist die flexible Verknüpfung einzelner Produktionszellen. Sie wird oft als Matrixproduktion bezeichnet [14]. Um Resilienz und Flexibilität zu erreichen, werden mehrere (teil-) autonome Produktionszellen aufgabengesteuert kombiniert. Sie werden von einer übergeordneten Ebene orchestriert, die individuell mit den Fähigkeiten der Zellen plant und den Materialtransport mit autonomen Transportfahrzeugen organisiert (siehe Abschnitt 4.2 und

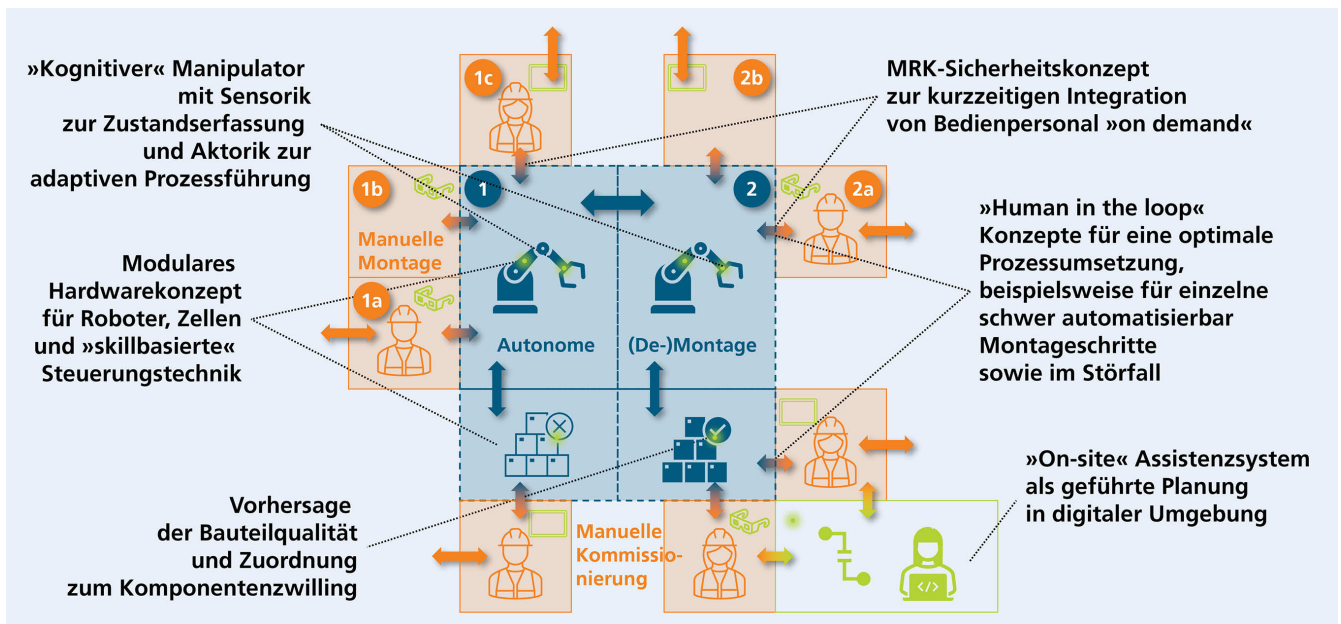


Bild 3. Konzept einer hybrid-autonomen Montagezelle mit Kerntechnologien. Grafik: Fraunhofer IWU

5.2). Die Verknüpfung bleibt temporär und steht im scharfen Gegensatz zu klassischen Automatisierungssystemen mit strikter Verknüpfung zwischen Prozessschritten (Linienautomatisierung).

Die integrative Einbettung autonomer Montagesysteme in matrixbasierte Produktionssysteme wurde bisher nicht betrachtet. Ursachen liegen in einer sich multiplizierenden Komplexität der Ansätze sowie der Neuartigkeit beider Produktionskonzepte. Wie unter [15] festzustellen, finden sich in der Industrie bereits einige vielversprechende Anwendungsszenarien für Matrixproduktionssysteme in der Montage elektronischer Komponenten, der Automobil- oder Halbleiterindustrie. Einer schnelleren Verbreitung des Ansatzes stehen derzeit die im Vergleich zu herkömmlichen Produktionssystemen höhere Komplexität und die mangelnde Erfahrung der Anwender entgegen. Für geeignete Anwendungsgebiete konnte der wirtschaftliche Nutzen bereits nachgewiesen werden.

Eine von der acatech initiierte Studie der Fraunhofer-Institute IWU und IPA ermittelte Handlungs- und Unterstützungsbedarfe in der Industrie, zukünftige Forschungsaspekte und Transferpfade des Konzeptes einer Matrixproduktion in die Industrie. Zudem werden Best-Practice-Beispiele skizziert. Ein zentrales Ergebnis der Studie ist, dass 13 Gestaltungsfelder berücksichtigt werden müssen, wenn ein Matrix-Produktionssystem etabliert werden soll [15].

3 Allgemeine Anforderungen und zentrale Lösungsbausteine

3.1 Gesamtkonzept

Im Folgenden wird ein Konzept am Beispiel der Montage von Leiterplatten vorgestellt, das die beschriebenen Herausforderungen mithilfe zentraler Lösungsbausteine adressiert. Diese Bausteine werden anschließend vertieft:

1. Hybrid-autonome Montagezellen, die grundsätzlich innerhalb ihres Fähigkeitsspektrums autark agieren und autonome, roboterbasierte Montageschritte mit manuellen Schritten verbinden (Abschnitt 3.2 beziehungsweise Bild 3)

2. Einbettung der hybrid-autonomen Montagezellen in eine flexibel verknüpfbare, matrixbasierte Produktionsorganisation (Abschnitt 3.3)
3. Entsprechende dynamische Aufgabenverteilung auf lokaler und globaler Ebene in Abhängigkeit des aktuellen Systemzustandes (Abschnitt 4.1 sowie 4.2)
4. Selbstoptimierung sowohl der autonomen Montageschritte auf lokaler Ebene für höhere Produktivität (Abschnitt 5.1) sowie Optimierung der Zellenbelegung auf globaler Ebene entsprechend der aktuellen Systemeigenschaften (Abschnitt 5.2)

3.2 Hybrid-autonome Montagezellen

Die Entwicklung eines vollautonomen, roboterbasierten Systems für alle Teilaufgaben würde zu einem äußerst komplexen und fehleranfälligen System führen. Das System würde komplexe und teure Erkennungsfunktionen erfordern, wie etwa schnelle 3D-Computervision, mehrere komplexe Greifer sowie eine hochentwickelte (Edge-)IT-Infrastruktur auf Zellenebene, um große Mengen an Prozessdaten live zu verarbeiten. Allein die Automatisierung nur des ersten Teils einer Leiterplattenbeschickung – der Montage der Kondensatoren – würde jedoch den menschlichen Arbeitsaufwand erheblich entlasten. Daher wird ein Konzept für eine hybrid-autonome Montagezelle abgeleitet, das auf der allgemeinen Abfolge der Zyklen autonomer Systeme in Erkennen – (Sensordaten-)Verarbeiten – Handeln basiert. Grundsätzlich ist dieses System in der Lage, je nach aktuellen Anforderungen und parametrisierter Aufgabenbeschreibung, ein breites Aufgabenspektrum abzudecken. Bild 3 zeigt Schlüsseltechnologien für ein solches System, das die Grundlage zur Umsetzung autonomer Systeme entsprechend der Autonomielevel 3 und 4 im Bild 2, Abschnitt 1.2 ist.

Das hier skizzierte modulare roboterbasierte Montagesystem ist technisch weniger aufwendig als ein vollständig automatisiertes oder autonomes System und damit wirtschaftlicher. Zudem könnte die Automatisierung von Produktionsschritten sukzessive in bestehende Produktionsarchitekturen integriert werden, wenn



Bild 4. Beispiellayout eines Matrix-Produktionssystem mit zentralen Bausteinen. Grafik: Fraunhofer IWU

auch auf dieser Ebene ein modularer Ansatz berücksichtigt würde. Daher sollte die etablierte Produktionslinienarchitektur durch eine flexiblere und skalierbare Matrixarchitektur ersetzt werden, die auch eine große Flexibilität für die schrittweise Integration manueller oder automatisierter Produktionsschritte bietet.

3.2 Matrix-Produktionssysteme

Cyber-physische Matrix-Produktionssysteme zeichnen sich vor allem durch einen modularen Aufbau, eine flexible Steuerung, eine dynamische Verknüpfung von Produktionsressourcen und einen hohen Grad an integrierter Informationstechnologie aus [15]. Der Kernpunkt von Matrix-Produktionssystemen ist, dass alle Produktionszellen frei zugänglich und beplanbar sind und der Materialfluss zum Beispiel durch fahrerlose Transportfahrzeuge (FTS; englisch: autonomous guided vehicles AGV) sichergestellt wird [1] (**Bild 4**). Nach Meinung von Produktionsexperten [1] gelten sie als vielversprechende Lösung für die kostengünstige und effiziente Herstellung anspruchsvoller Produkte bei gleichzeitiger hoher Flexibilität, um im herausfordernden Marktumfeld mit sinkenden Stückzahlen, steigender Variantenvielfalt und schlechter Vorhersehbarkeit der Kundenanforderungen bestehen zu können [15]. Gleichzeitig bieten Matrixproduktionssysteme durch die systembedingte Flexibilität, konsequente Vernetzung und ihr digitales Abbild ein hohes Maß an Widerstandsfähigkeit gegenüber ungeplanten Ereignissen und Unsicherheiten in der Lieferkette [1].

3.3 Kerntechnologien zur Umsetzung von matrixbasierten Montagesystemen

Um eine matrixbasierte und zudem auf Autonomie ausgelegte Montage zu realisieren, müssen Kernfähigkeiten vorhanden sein, die sich zum einen aus den in [15] genannten Gestaltungsfeldern der cyber-physischen Matrixproduktion und zum anderen aus Prozessanforderungen ableiten. Aus dem Matrixgedanken heraus müssen die frei beplanbaren Zellen je nach Fertigungsauftrag und Fähigkeit der Zellen dynamisch allokiert werden (siehe Abschnitt 4). Nachfolgend bekommen diese die (Teil-) Aufgaben beziehungsweise notwendigen Montageschritte durch die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zugewiesen. Dies geschieht dynamisch in Abhängigkeit des aktuellen und erwarteten Zellzustandes und bildet die Eingangsgröße für die Planung der Intralogistik. Die Zellen sind hardwareseitig und in ihrer Steuerungssoftware modular zu gestalten. So wird neben der Einbindung in das modulare Matrix-Konzept auch eine sukzessive Umstellung der aktuell vollständig manuellen Prozessschritte auf automatischen oder teilautomatischen Betrieb möglich. Das setzt wiederum die Segmentierung der Prozessschritte und deren digitale Beschreibung voraus, um die Teilprozesse in der Planungssoftware (PPS) zustandsaktuell berücksichtigen zu können. In diesem Zuge sollten zusätzliche Fähigkeiten der autonomen Montagezellen, welche für die Automatisierung notwendig sind, mit integriert werden.

In jedem Fall ist die PPS eine Mensch und Automation sowie Prozessschritt und Prozesskette verbindendes Element. Ihr obliegt der Abgleich gestellter Anforderungen seitens des

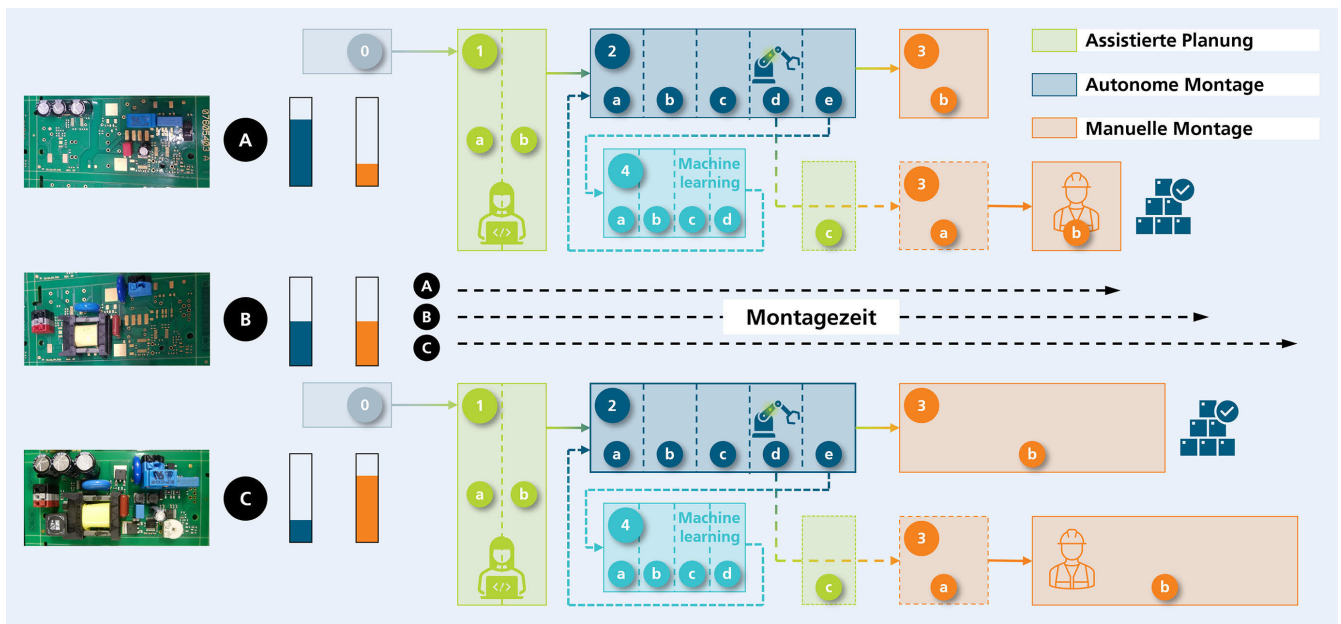


Bild 5. „Komponentenindividuelle Aufgabenverteilung“ zur hybriden Montage von Leiterplatten (lokal). Grafik: Fraunhofer IWU

Prozesses mit den Fähigkeiten der Produktionsressourcen sowie die weitgehend autonome Verteilung aller nötigen (bekannten und digital beschriebenen) Prozessschritte für ein bestimmtes Produkt auf die jeweiligen Montagezellen/Ressourcen und Menschen. Dies umfasst:

- Eine Fähigkeitsbeschreibung der Anlagenbausteine, wie Robotergröße und Roboterreichweite, verfügbare Sensoren, Prüf- und Erkennungsfähigkeiten
- Die autonom-adaptive lokale Aufgabenverteilung und Prozessführung und Optimierung auf Zellenebene (siehe Abschnitt 4.1 und 5.1)
- Eine globale Aufgabenverteilung unter Berücksichtigung des aktuellen Zustands der einzelnen Systembausteine sowie deren Optimierung (siehe Abschnitt 4.2 sowie 5.2)
- Eine befähigte, modulare Anlagentechnik mit den entsprechenden intelligenten Komponenten

4 Aufgabenverteilung auf lokaler und globaler Ebene als zentrale Planungsaufgabe

Wesentlicher Baustein einer effizienten und matrixbasierten autonomen Montage von Komponenten durch hybride Zellen ist die Verteilung der einzelnen Montageschritte des Gesamtprozesses auf unterschiedliche Zellen entsprechend der notwendigen Fügereihenfolge, der technischen Fähigkeiten der Zellen (»Skills«) sowie der jeweiligen Verfügbarkeiten (globale Ebene). Zusätzlich sind entsprechend der globalen Verteilung innerhalb der einzelnen Zellen eine weitere Untergliederung und Verteilung zwischen autonomen Roboter und manuellen Schritten durchzuführen (lokale Ebene).

Um die Potenziale der autonomen Montage sowie der anfallenden Prozessdaten zu nutzen und gleichzeitig von Beginn an prozesssicher zu arbeiten, ist es notwendig, die autonomen Montageprozesse schrittweise zu optimieren. Dieser Ansatz stellt den Kern des vorliegenden Konzeptes dar und ermöglicht eine sukzessive Erhöhung der Produktivität pro Montageoperation

über der Zeit. Gleichzeitig ist ein sofortiger autonomer Anteil notwendig, um die datenbasierte, schrittweise Optimierung zu erlauben. Der Grundansatz wird nachfolgend am Beispiel des Setzens von Kondensatoren auf eine Leiterplatte beschrieben. Darauf aufbauen wird in Kapitel 5 anhand eines Beispiels die Optimierung konkretisiert.

4.1 Lokale Aufgabenverteilung auf Zellenebene

Bild 5 stellt den Ansatz dar und visualisiert die unterschiedlichen autonomen und manuellen Aufgaben in Abhängigkeit von beispielhaften Chargen von Leiterplatten für die Steuerung eines übergeordneten Beleuchtungssystems in Abhängigkeit von ihrem Komplexitätsgrad (unterschieden in A-B-C in Bild 5, wobei eine steigende Komplexität unterstellt wird).

Der autonome Teil besteht in der Aufnahme und dem anschließenden Setzen geometrisch ähnlicher Kondensatoren auf die Leiterplatte. Anschließend werden individuelle Schalt- und Steuerelemente manuell ergänzt, bevor die fertig bestückte Leiterplatte dem Lötautomat zugeführt wird (nicht dargestellt und nicht Teil des Zellenumfanges).

Der Gesamtprozess kann in die folgenden Unteraufgaben unterteilt werden (Schritte 1–4 in Bild 5):

- Schritt 1: Geführte Montageplanung vor Ort: Die Aufgabenverteilung zwischen der autonomen Montage (blau in Bild 5) und der manuellen Montage (orange in Bild 5) erfolgt lokal vor Ort (grün in Bild 5). Dieser Prozessschritt ist nicht für jedes autonome System notwendig, ermöglicht aber eine kurzfristige Anpassung durch Fachpersonal in Abhängigkeit verfügbarer Kapazitäten:
 - a. Die Prozessplanung wird doppelt überprüft und die Aufgabenverteilung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Situation vor Ort detailliert
 - b. Bei Bedarf kann das Montagepersonal vor Ort (unten rechts in Bild 5) oder am Arbeitsplatz (orange Kästchen 3a–3e in Bild 5) durch geführte Montage geschult werden, zum Beispiel von AR-Systemen.

- c. Wenn autonome Montageschritte fehlschlagen (Schritt 2d in Bild 5), werden die Teilaufgaben zwischen den autonomen Robotern und den manuellen Montagestationen neu geplant
- Schritt 2: Autonome Prozessausführung: Die autonomen Prozessschritte werden ausgeführt und ständig überwacht (blau in Bild 5). Der Montageprozess wird als Predictive-Quality-Ansatz digital verfolgt, um Lebensinformationen über den Montagezustand der aktuellen Charge zu unterstützen:
 - a. Überwachung der Teileorientierung und flexible Roboterbahnanpassung auf Basis geeigneter Sensoren, etwa Abstandssensoren basierend auf Triangulation oder Tiefenkamera
 - b. Sensorisch erfasste Parameter wie Positionsinformationen von Schlüsselbereichen werden mit den nominalen Parametern verglichen, basierend zum Beispiel auf CAD-Modellen
 - c. Der Pfad wird basierend auf dem berechneten Delta dynamisch angepasst, zum Beispiel durch Verschieben des Koordinatensystems oder Anpassen von Skillparametern für maximale Leistung bei minimalen Hardware-Ressourcen
 - d. Adaptive Montageprozesssteuerung anhand zusätzlicher Sensoren: Zur Anpassung des Montagewerkzeugs an die Bauteilanforderungen werden Drehmomentsensoren eingesetzt
 - e. Montage-/Demontagevorgang mit Werkzeug, zum Beispiel Verstopfen der Kondensatoren
- Schritt 3: Manuelles Beenden der Montageaufgabe (orange in Bild 5):
 - a. Zusätzliche ungeplante manuelle Montageschritte bei Bedarf
 - b. Geplante manuelle Montageschritte abhängig von der einzelnen Charge
- Schritt 4: Machine-Learning-basierte In-Prozess-Optimierung der autonomen Aufgaben
 - a. Das Einstecken der Kondensatoren in die elektrische Platine erfolgt zunächst sorgfältig mit minimaler Dynamik und Doppelkontrollen wie der Bestätigung der Einstichstelle mittels Lasersensoren
 - b. Für jede erfolgreiche Aufgabe werden die Parameter vor Ort (auf einer Edge-Infrastruktur) überwacht und gespeichert.
 - c. Ein mathematischer Optimierungsalgorithmus minimiert mögliche Montagefehler („Treffer ins Einstichloch“) für den Montageschritt anhand von In-Prozess-Daten
 - d. Der Prozess wird ständig angepasst, um die Leistung des Montageschrittes zu steigern, etwa die Zykluszeit für das Kondensatorstecken durch die erhöhte Roboterdynamik verkürzt

4.2 Anforderungen an die globale Aufgabenzuweisung

Die komplexe Interaktion und Planung notwendiger Aufgaben und Teilaufgaben zwischen den einzelnen autonomen Montagezellen zur Realisierung ganzer Prozessketten geht grundsätzlich über den Rahmen des Beitrags hinaus. Beispiele sind der Einsatz künstlicher Intelligenz zur Lösung der Zeitplanung, wie in *Rinciog* beschrieben [16] und [17], sowie Ansätze für die Intralogistik anhand Matrixkonzepten wie in *Li* [18]. Das Kernproblem, Aufgaben dynamisch zwischen einzelnen Zellen zu verschieben und nicht nur die Teile, sondern auch dynamische Datenmodelle zur Parametrisierung fähigkeitsbasierter Steuerungen zu verteilen, ist Gegenstand umfangreicher Forschung.

Unabhängig von individuellen Ansätzen auf der Planungsebene erfordern alle diese Konzepte aber eine Auswahl adaptiver, autonomer Produktions- beziehungsweise (De-) Montagezellen zur Durchführung dieser Art von Produktion. Der gewünschte Fertigungsverfahren muss auf die verfügbaren Zellen verteilt werden, indem die bereitgestellten Fähigkeiten jeder Zelle aufgerufen werden, die dem Gesamtziel entsprechen. Dies sollte durch eine untergeordnete, aber standardisierte Ebene erfolgen. Wenn mehr als eine Produktionszelle über die erforderlichen Fähigkeiten verfügt, kann eine Auswahl anhand verschiedener Optimierungskriterien wie Zeitaufwand, Produktionsqualität, Kosten oder CO₂-Fußabdruck getroffen werden. In diesem speziellen Bereich entstehen unterschiedliche Ansätze, die auf Enterprise-Resource-Planning-Softwaresystemen oder speziellen Produktionssprachen wie der von Fraunhofer entwickelten [19] Production Flow Description Language (PFDL) basieren. Unabhängig von dieser Entscheidung sollte die Kommunikation zwischen Produktionsanlagen und der untergeordneten Ebene standardisiert werden, etwa durch den Einsatz von OPC UA oder MQTT aus Gründen der Modularität und Erweiterbarkeit.

5 Selbstoptimierung der autonomen Montage

5.1 Lokale Selbstoptimierung der Prozessführung

Eine lokale Optimierung ermöglicht eine sukzessive Verkürzung einzelner Unteraufgaben. Im Anwendungsbeispiel aus der lokalen Aufgabenverteilung (Abschnitt 4.1) soll vor allem die Bewegung des Kondensators bei notwendiger Zeit und Trajektorie optimiert werden. Zudem beschleunigen sich auch manuelle Montageschritte über der Zeit durch das Sammeln von „Erfahrung“, wobei neu anzulernendes Personal entsprechend neu ansetzt. Zusätzlich wurde zum Zeitpunkt t2.1 eine Optimierung des Greifens der Kondensatoren als auch des Durchsteckprozesses unterstellt. Die Wirkung zeigt **Bild 6** symbolisch für drei unterschiedliche Zeitpunkte, beginnend bei t0.1 (keine Optimierung) über t1.1 (erster Optimierungszyklus abgeschlossen, zum Beispiel nach 1000 Bauteilen) bis hin zu einem unterstellten 2ten Optimierungszyklus t2.1.

Um das Ganze zu verallgemeinern, wird es aus mathematischer Sicht betrachtet. Die Unteraufgaben (U) haben jeweils eine gewisse Dauer (d_u mit $u \in U$).

Im oben genannten Beispiel ist U die Menge über Greifen (1), Roboterbewegung (2), Platzieren (3) und manueller Montage (4). Die Dauer d_u ist sowohl von der Unteraufgabe u als auch von dem lokalen Optimierungslevel abhängig. Vereinfacht gesprochen besteht dieses aus zwei Faktoren Wiederholungen ($w \in \mathbb{N}$) und Training ($tr \in \mathbb{R}^+$). Je nach Aufgabe haben diese beiden Faktoren unterschiedlichen Einfluss auf die Dauer des Prozesses. Im Falle der Roboterbewegung hat die Wiederholung an sich keinerlei Einfluss auf die Durchführungszeit, nur in Kombination mit Training kann sich diese verbessern. Das Training ist wiederum von Wiederholungen abhängig, damit wird dieser Zusammenhang etwas komplexer. Bei der manuellen Montage hingegen beschleunigen Wiederholungen den Prozess merklich, da die Person in dem Vorgang routinierter wird.

Es ist außerdem bekannt, dass die Durchführungsdauer Schranken besitzt. Der Prozess kann nicht beliebig stark gekürzt werden. Formulierbar ist dies als $d_u(w, tr) \in [d_{u,min}, d_{u,max}]$

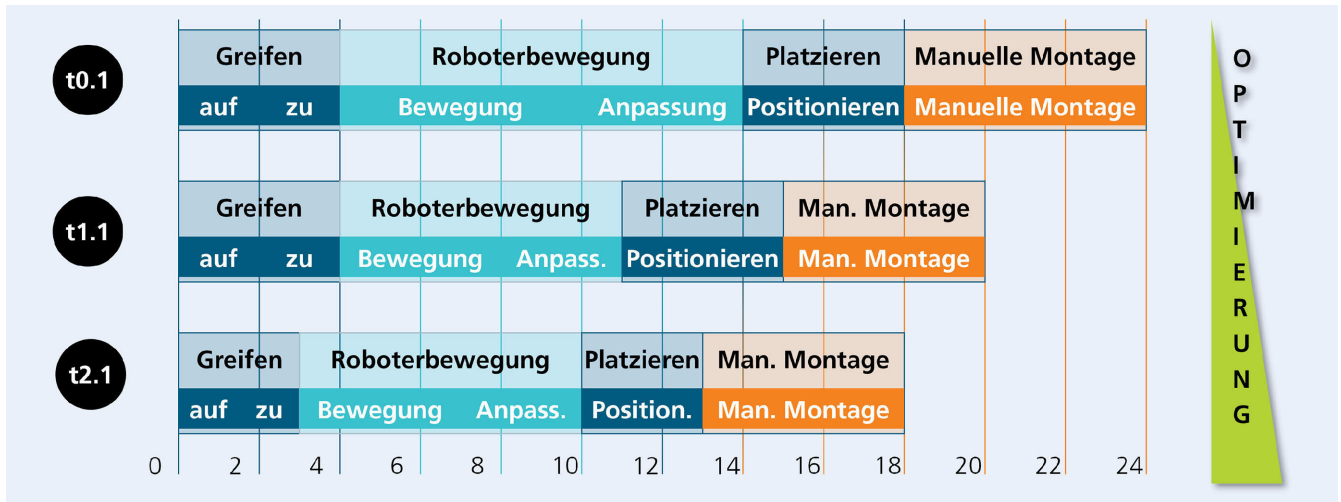


Bild 6. Wirkung der lokalen Optimierung für einzelne Prozessabschnitte auf Zellebene. Grafik: Fraunhofer IWU

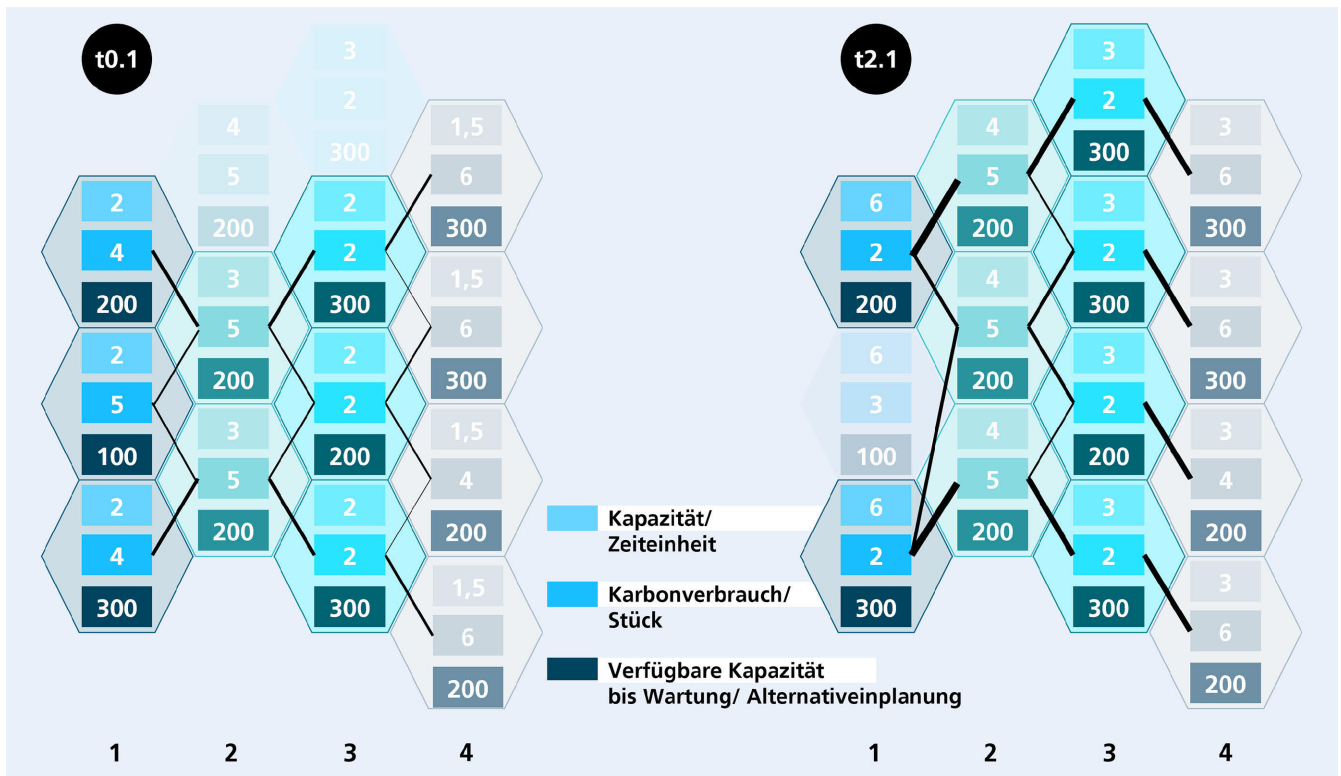


Bild 7. Globale, dynamische Verknüpfung von Montagezellen für eine bestimmte Montageaufgabe mit vier notwendigen Zellen zu zwei Zeitpunkten als Ergebnis der Optimierung (nur Kapazität). Grafik: Fraunhofer IWU

mit $d_{u,min}, d_{u,max} \in \mathbb{R}^+$. Wobei diese die untere und obere Schranke darstellen.

Verallgemeinert lässt sich eine Formel aufstellen:

$$d_u(w, tr) = d_{u,min} + (d_{u,max} - d_{u,min}) \cdot f_u(w, tr) \text{ mit } f_u(w, tr) \in [0, 1].$$

Diese ist stark von der Funktion $f_u(w, tr)$ abhängig. Diese gibt den Faktor an, wie viel schon verbessert wurde. Allgemein bekannt ist: $f_u(w, tr)$ ohne Wiederholungen und Training ist 1 und kann bestenfalls 0 erreichen. Alles Weitere ist vom individuellen Fall abhängig und muss gezielt dafür formuliert oder approximiert

werden. Vorstellbar sind nahezu alle Funktionstypen sei es linear, exponentiell oder gar implizit.

5.2 Globale Optimierung der Aufgabenverteilung auf Basis der lokalen Optimierung

Um die sukzessiven Verbesserungen der einzelnen Zellen auf lokaler Ebene in der Matrixproduktion auf globaler Ebene zu nutzen, ist eine dynamische Optimierung der Produktionsplanung über alle Zellen vorzunehmen.

Auf Basis der individuellen aktuellen Eigenschaften der einzelnen Zellen wird eine Losgröße dynamisch auf die Zellen verteilt.

Bild 7 zeigt dies am Beispiel einer rein kapazitätsbasierten Verteilung. Dabei sind vier verschiedene Aufgabenkomplexe (entsprechend den Zellarten als 1...4 dargestellt) zu durchlaufen.

Zu Zeitpunkt $t_{0.1}$ (vor der lokalen Optimierung der Zellen) besitzen die Zellen in der 1-Montagestufe jeweils eine Kapazität von 2 Einheiten/Zeiteinheit (zum Beispiel [h]), in der 2-Stufe von 3 Einheiten usw. Die Gesamtkapazität beträgt im Beispiel 6/Zeiteinheit, wobei insgesamt 12 Zellen genutzt werden. Zum Zeitpunkt $t_{1.1}$, also nach der Optimierung, beträgt die Kapazität der Zellen der 1-Montagestufe 6/Zeiteinheit, sie hat sich also pro Zelle verdreifacht. In der 2-Stufe beträgt die Kapazität jetzt 4/Zeiteinheit, was „nur“ einer Verbesserung von 50 % entspricht usw. Die Gesamtkapazität beträgt jetzt 12/Zeiteinheit bei 13 Zellen in Summe. Auch die individuell benötigten Zellen pro Stufe haben sich geändert.

Praktisch lassen sich weitere Kriterien wie Karbonverbrauch pro Stück oder (noch) verfügbare Belegungszyklen bis zu einer notwendigen Wartung und/oder bereits vorgeplante Kapazität berücksichtigen. Entsprechend entsteht ein multikriterielles Optimierungsproblem. Restriktionen zur Nutzung einzelner Zellen wären als Nebenbedingungen zu formulieren.

Zur Verallgemeinerung werden zunächst folgende Variablen eingeführt:

Variable	Erklärung
$n \in \mathbb{N}$	Menge an zu produzierenden Einheiten, weshalb es sich um positive ganze Zahl handelt.
$i \in \{1, \dots, i_{\max}\}$ mit $i_{\max} \in \mathbb{N}$	Variablen zur Iteration durch die Montagestation, i_{\max} steht für die Anzahl der Montagestationen. Im Beispiel in Bild 6 ist $i_{\max} = 4$.
$j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}$ mit $j_{i,\max} \in \mathbb{N}$	Variablen zur Identifizierung der Montagezelle innerhalb der verschiedenen Montagestation i , wobei $j_{i,\max}$ für die Anzahl an Montagezellen innerhalb der jeweiligen Montagestation steht.
$p \in \{1, \dots, p_{\max}\}$ mit $p_{\max} \in \mathbb{N}$	Steht für die unterschiedlichen Faktoren, die Berücksichtigt werden können. Im Beispiel von Bild 6 ist $p_{\max} = 3$ und stehen für Kapazität/Zeiteinheit, Karbonverbrauch/Stück und verfügbare Kapazität bis Wartung/Alternativeinplanung.
$t \in \mathbb{N}$	Der Zeitpunkt, was nicht als genaue Zeitbestimmung anzusehen ist, sondern eher als Kategorisierung. Ändert sich t , so deutet dies auf Faktorveränderung(en) in der Montagezellen hin.
$k_{i,j}^p(t) \in \mathbb{R}^+$	Der Kostenfaktor für eine genau definierte Montagezelle, je nach Faktor und abhängig vom Zeitpunkt. Die in Kapitel 5.1 beschriebene Dauer $d_u(w, tr)$, findet hier ihre Anwendung.
$m_{i,j} \in \mathbb{N}$	Die Menge die an Montagezelle j der Montagestation i produziert werden soll. Über diesen Faktor wird meist optimiert.

Es gibt wie erwähnt verschiedene Aspekte, anhand derer die Situation optimiert werden kann. Zunächst wird angelehnt an das Beispiel die Minimierung des Gesamtkarbonverbrauches betrachtet. In Bild 7 ist ersichtlich, dass der Karbonverbrauch der zweite Kostenfaktor ist, weshalb in diesem Beispiel $p=2$ in der Minimierung als gegeben angesehen wird.

$$\min_{m_{i,j} \in \mathbb{N}} \sum_{\substack{i \in \{1, \dots, i_{\max}\}, \\ j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}}} m_{i,j} \cdot k_{i,j}^2(t)$$

Die Karbonverbräuche in Abhängigkeit von der produzierten Menge je Zelle werden über alle Stationen hinweg aufsummiert (Achtung: „2“ ist hier keine Potenz, sondern der Indikator, dass es sich um den Karbonverbrauch handelt).

s.t.

$$\sum_{j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}} m_{i,j} = n \quad \forall i \in \{1, \dots, i_{\max}\}$$

Die Menge an vorgegebenen Einheiten muss durch jedes Modul laufen.

$$m_{i,j} \leq k_{i,j}^3 \quad \forall i \in \{1, \dots, i_{\max}\}, j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}$$

Die Kapazitäten der einzelnen Montagezellen müssen beachtet werden.

Dieses einfache explizite Beispiel kann auch verallgemeinert werden, indem ein Faktor g_p eingeführt wird. Dieser steht für die Gewichtung der einzelnen Kostenfaktoren.

$$\min_{m_{i,j} \in \mathbb{N}} \sum_{p \in \{1, \dots, p_{\max}\}} \sum_{\substack{i \in \{1, \dots, i_{\max}\}, \\ j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}}} m_{i,j} \cdot k_{i,j}^p(t) \cdot g_p$$

s.t.

$$\sum_{j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}} m_{i,j} = n \quad \forall i \in \{1, \dots, i_{\max}\}$$

$$m_{i,j} \leq k_{i,j}^3 \quad \forall i \in \{1, \dots, i_{\max}\}, j \in \{1, \dots, j_{i,\max}\}$$

$$g_p \in \mathbb{R}^+ \quad \forall p \in \{1, \dots, p_{\max}\}$$

Möchte man im Beispiel aus Bild 7 nun über den Karbonverbrauch und die Dauer minimieren, so wären $g_1, g_2 > 0$ und $g_3 = 0$, da die Auslastung nicht berücksichtigt wird.

6 Zusammenfassung

Die Montage von Komponenten wie Leiterplatten, Ventilen oder weiteren mechatronischen Funktionsbaugruppen stellt klassische Automatisierungskonzepte immer noch vor sehr große Herausforderungen. Dies gilt besonders, wenn es sich um kleine und mittlere Losgrößen beziehungsweise Produktbaukästen handelt, welche für eine klassische (Linien-) Automatisierung hochkomplexe und teure Anlagen erfordern. Daher wurde im Beitrag ein Ansatz vorgestellt, wie hybrid-autonome Zellen, eingebettet in matrixbasierte Produktionsanlagen, diese Herausforderungen adressieren können.

Durch die Nutzung autonomer Montageschritte mithilfe flexibler, roboterbasierter Zellen können wesentliche Prozessanteile automatisiert werden. Gleichzeitig werden für schwer automatisierbare Teilschritte (weiterhin) manuelle Montagen integrativ vorgesehen. Durch eine flexible Verknüpfung der einzelnen Zellen in einer matrixbasierten Organisation der Gesamtmontage ist es möglich, eine maximale Flexibilität im Hinblick auf variierende Losgrößen und Teilespektren zu erzielen. Um dies praktisch umzusetzen, ist eine dynamische Aufgabenverteilung zwischen den einzelnen Montageschritten auf lokaler Ebene (einzelne hybrid-autonome Montagezelle) sowie auf globaler Ebene (matrixbasiertes Montagesystem) essenziell. Zuletzt ist es wesentlich, diese Ansätze gestuft und bei minimalem Risiko für bestehende Montageketten zu integrieren. Daher wird eine

„Selbstoptimierung“ der autonomen Schritte als Möglichkeit, die Produktivität und damit die Kapazität der einzelnen Zellen schrittweise zu erhöhen, eingeführt und mathematisch beschrieben. So können autonome Teilprozesse ohne aufwendige Anlernphasen in neue oder bestehende Montageketten integriert und deren wirtschaftliche und ökologische Bilanz fortwährend verbessert werden.

DANKSAGUNG

Der Beitrag wurde im Rahmen des „MODUL4R“-Projekts als Teil des Horizon Europe-Förderprogramms für Forschung und Innovation der Europäischen Union mitfinanziert.

Literatur

- [1] Foith-Förster, P.: Design of matrix production systems for the personalized production of mechatronic machine modules. Dissertation (under publication), Universität Stuttgart, 2023
- [2] Gamer, T.; Hoernicke, M.; Kloepper, B.; Bauer, R.; Isaksson, A. J.: The Autonomous Industrial Plant -Future of Process Engineering, Operations and Maintenance, IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 1, pp. 454–460
- [3] Damm, W.; Kalmar, R.: Autonome Systeme. Informatik-Spektrum. 40 (2017) 5, S. 400–408
- [4] BMWi (Hrsg.): KI in der Industrie 4.0: Orientierung, Anwendungsbeispiele, Handlungsempfehlungen. Stand: 2020. Internet: www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-orientierung-anwendungsbeispiele-handlungsempfehlungen.pdf?__blob=publication-file&v=1. Zugriff am 01.09.2023
- [5] Hörmann, A.; Rembold, U.: Development of an advanced robot for autonomous assembly. Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, USA, 1991, pp. 2452–2457 vol. 3
- [6] Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. CIRP Annals 56 (2007) 2, pp. 712–729
- [7] Moser, J.; Hoffmann, J.; Hildebrand, R. et al.: An Autonomous Task Assignment Paradigm for Autonomous Robotic In-Space Assembly. Frontiers in Robotics and AI 9 (2022) 9, p. 709905
- [8] Roa, M. A.; Koch, C.; Rognant, M. et al.: PULSAR: Testing the Technologies for On-Orbit Assembly of a Large Telescope. 16th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation, ASTRA 2022, 1–2 Jun 2022, Noordwijk, Netherlands
- [9] Schnellhardt, T.; Hemschik, R.; Weiß, A. et al.: Scalable production of large components by industrial robots and machine tools through segmentation. Frontiers in Robotics and AI 9 (2022), p. 1021755
- [10] Olszewska, J. I.; Barreto, M.; Bermejo-Alonso, J. et al.: Ontology for autonomous robotics. 2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), Lisbon, Portugal, 2017, pp. 189–194
- [11] Weyrich, M.; Wang, Y.: Architecture design of a vision-based intelligent system for automated disassembly of E-waste with a case study of traction batteries. 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), Cagliari, Italy, 2013, pp. 1–8
- [12] Gronau, N.; Grum, M.; Bender, B.: Determining the optimal level of autonomy in cyber-physical production systems. 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, France, 2016, pp. 1293–1299
- [13] Guizzo, E.: By leaps and bounds: An exclusive look at how Boston dynamics is redefining robot agility. IEEE Spectrum 56 (2019) 12, pp. 34–39
- [14] Ihlenfeldt, S.; Wunderlich, T.; Süße, M. et al.: Increasing Resilience of Production Systems by Integrated Design. Applied Sciences 11 (2021) 18, p. 8457
- [15] Acatech GmbH (Hrsg.): Flexibel und produktiv – cyber-physische Matrixproduktionssysteme machen Fabriken fit für die Zukunft. Stand: 2022. Internet: www.acatech.de/allgemein/cyber-physische-matrixproduktionssysteme/. Zugriff am 01.09.2023
- [16] Rinciog, A.; Meyer, A.: Fabricatio-RL: A Reinforcement Learning Simulation Framework For Production Scheduling. 2021 Winter Simulation Conference (WSC), Phoenix, AZ, USA, 2021, pp. 1–12
- [17] Rinciog, A.; Meyer, A.: Towards Standardising Reinforcement Learning Approaches for Production Scheduling Problems. Procedia CIRP 107 (2022), pp. 1112–1119
- [18] Li, Z.; Sang, H.; Pan, Q. et al.: Dynamic AGV scheduling model with special cases in matrix production workshop. IEEE Transactions on Industrial Informatics (2022), pp. 1–10
- [19] Detzner, P.; Ebner, A.; Horstrup, M. et al.: PFDL: A Production Flow Description Language for an Order-Controlled Production. 22nd International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2022, Jeju, Republic of Korea, 2022, pp. 1099–1106



Dr.-Ing. **Uwe Frieß**
Foto: Autor

Lena Oberfichtner, M. Sc.

Dr.-Ing. **Arvid Hellmich**

Marcel Lorenz, M. Eng.

Prof. Dr.-Ing. **Steffen Ihlenfeldt** 
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz
Tel. +49 371 5397-1445
buero.ihlenfeldt@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

LIZENZ



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