

1 Einleitung

Introduction

Die Montage industriell gefertigter Produkte ist einem zunehmenden Druck sich verändernder Produktanforderungen und Produktionsrahmenbedingungen unterworfen. Wachsende Möglichkeiten zur passgenauen Produktkonfiguration für spezifische Einsatzzwecke bis hin zu Forderungen nach kundenindividuell gestalteten Einzelstücken haben die Variantenvielfalt stark steigen und Losgrößen einhergehend sinken lassen [HINR20, BERN22]. Hinzu kommen weitere Komplexitätssteigernde Aspekte, die sich aus den global aufgestellten Vertriebskanälen insbesondere für die exportorientierten, deutschen Produzenten ergeben [LANZ19, FRÄN22]. In Bezug auf die Montageorganisation bewirken diese Entwicklungen stetig kürzere Produktionszyklen und häufige Variantenwechsel, die durch das Produktionssystem unterstützt werden müssen [KERN21]. Bei der Gestaltung von Betriebsmittellösungen sind Flexibilitäts- bzw. Wandlungseigenschaften an der Schnittstelle zum gefertigten Produkt daher von zunehmender Bedeutung [KERN21, LOTT12, NYHU08].

Ein weiterer Flexibilitätstreiber für den Montagebereich stellen Nachfrageschwankungen dar. Globale Konflikte oder Ereignisse wie die Corona-Pandemie haben die Unsicherheit an den Märkten gesteigert und dazu geführt, dass Aufträge eher kurzfristig vergeben werden und sich Produktionskapazitäten verlagern können. Als Beispiel kann die weltweite Chipkrise angeführt werden, die die Zulieferketten der Automobilindustrie derart gestört hat, dass aufgrund von Produktionsstopps unmittelbar auch andere Zulieferbereiche betroffen waren [WUXI21, KLEE21].

Nachfrageschwankungen und Just-in-time-Produktion führen dazu, dass Zulieferbetrieben nur wenig Zeit bleibt, wirtschaftliche Betriebspunkte mit ihrem Produktionssystem einzunehmen. Durch die Distanz zum Endkunden werden langfristige Prognosen erschwert und somit Investitionen in komplexe Betriebsmittellösungen risikobehaftet [SCHÖ20, JARO18]. Hiervon sind insbesondere kleine und mittlere Betriebe (KMU) betroffen, die einen Großteil der Zulieferbetriebe in Deutschland ausmachen [JARO18].

Schließlich wirkt sich auch der demografische Wandel und der einhergehende Fachkräftemangel nachteilig auf den Produktionsbereich aus, wobei die Montage durch ihren vergleichsweise hohen Personaleinsatz stark betroffen ist [GROS21a, BAUE16]. Die Folgen des Personalmangels resultieren in einem gehemmten Wirtschaftswachstum, welches nur bedingt durch weitere Produktivitätssteigerungen je Mitarbeiter aufgefangen werden kann [GEEN19].

Aus diesen gegensätzlichen Entwicklungen – der mangelnden Investitionsbereitschaft z. B. in Bezug auf klassische Automatisierungslösungen einerseits und der notwendigen Produktivitätssteigerung andererseits, die einen höheren Automatisierungsgrad erfordert – ergibt sich ein hoher Bedarf nach innovativen, technischen Lösungen, die

flexibel an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst werden können [BAUE14]. Nur wenn eine hohe Ressourcenauslastung realisiert werden kann, sind eine Amortisation und ein wirtschaftlicher Betrieb an einem Hochlohnstandort wie Deutschland möglich.

Ausgehend von einem idealen, flexibel automatisierbaren Betriebsmittel, das zur Herstellung beliebiger Produktvarianten geeignet ist, kann eine mögliche Lösung in einer veränderten Rolle des Montagemitarbeiters bestehen. So kann er im Rahmen einer agilen Montageorganisation als delegierende Instanz smarte Produktionstechnik zur Automatisierung von Teilaufgaben nutzen und selbst lediglich schwierig automatisierbare bzw. kognitiv beanspruchende Montageoperationen ausführen [ZIPT13, SCHN20]. Roboterbasierte Anlagen sind bei der Montageunterstützung aufgrund ihrer freien Bewegungsprogrammierbarkeit von besonderer Bedeutung [GÖBE12].

Die Umsetzung der Arbeitsteilung setzt insbesondere die Verfügbarkeit einer geeigneten Interaktionsschnittstelle voraus, durch die der Bediener die automatisierte Ausführung an das jeweilige Betriebsmittel übertragen kann. Bestehende Programmier- und Inbetriebnahmeverfahren orientieren sich jeweils am Funktionsumfang einzelner Systemkomponenten und setzen umfangreiches Expertenwissen zu deren Integration in einen Gesamtlauf voraus [DARN22]. Hieraus ergibt sich ein hoher Qualifizierungsbedarf für Anwenderunternehmen, der eine umfassende Ausweitung auf alle Montagemitarbeiter als nicht praktikabel erscheinen lässt.

Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, ein intuitiv bedienbares Interaktionsverfahren für Montagemitarbeiter zu entwickeln, durch das diese neue Montageabläufe holistisch einlernen können. Nach dem Vorbild des Maschinenführers einer Werkzeugmaschine muss eine derartige Schnittstelle eine prozess- bzw. aufgabenorientierte Sicht auf die Steuerungsaufgabe ermöglichen, die gleichsam der Domäne des Bedieners entspricht [BRAN17]. Sie soll den Kenntnisstand der Bedienergruppe berücksichtigen und die produktsspezifische Einrichtung von Montageprozessen unterstützen. Eine flexibel automatisierbare Montageanlage fungiert somit als Werkzeug eines befähigten Mitarbeiters, durch das dessen Produktivität gesteigert wird und seine Rolle im Produktionssystem an Attraktivität gewinnt.

Die vorliegende Arbeit umfasst eine Analyse existierender Verfahren zur Inbetriebnahme industrieller Robotersysteme (Kapitel 2) und leitet aus den bestehenden Defiziten in Bezug auf den beschriebenen Anwendungsfall die Definition der untersuchten Forschungsfragen ab (Kapitel 3). In Kapitel 4 schließt sich die Synthese eines Inbetriebnahmekonzepts an. Dessen Kernelement der Entwicklung eines ereignisgesteuerten Multiagentensystems zur Sensordateninterpretation und Ablauferzeugung wird in Kapitel 5 erläutert. Schließlich erfolgen in Kapitel 6 eine Anwendung des Inbetriebnahmekonzepts für ein repräsentatives Demonstrationsszenario und eine abschließende Bewertung.

Introduction

The assembly of industrially manufactured products is subject to increasing pressure from changing product requirements and environment conditions of the production. Extending possibilities for custom-fit product configuration for specific applications and demands for individual customer-designed items have led to a sharp increase in the number of variants and a subsequent decrease in batch sizes [HINR20, BERN22]. In addition, there are further complexity-increasing aspects resulting from globally operating distribution channels, especially by the export-oriented German manufacturers [LANZ19, FRÄN22]. With regards to the assembly organization, these developments result in steadily shorter production cycles and frequent variant changes, which must be supported by the production system [KERN21]. Therefore, flexibility and adaptability properties at the interface to the manufactured product are of increasing importance in the design of production equipment solutions [KERN21, LOTT12, NYHU08].

Another flexibility driver for the assembly sector are fluctuations in demand. Global conflicts or events such as the Corona pandemic have increased uncertainty on the markets and led to orders being placed at short notice and production capacities being reallocated. One example is the global chip crisis, which disrupted the supply chains of the automotive industry to such an extent that supplier were also directly affected due to production stops [WUXI21, KLEE21].

Fluctuations in demand and just-in-time production mean that supplying companies have only little time to achieve economic operating points with their production systems. Due to the distance to the end customer, long-term forecasts are difficult and thus investments in complex operational equipment solutions are risky [SCHÖ20, JARO18]. This particularly affects small and medium-sized enterprises (SMEs), which make up the majority of supplying companies in Germany [JARO18].

Ultimately, demographic change and the inherent shortage of skilled workers also have a negative impact on the production sector, with assembly being heavily affected due to its comparatively high personnel deployment [GROS21a, BAUE16]. The consequences of the shortage of personnel result in inhibited economic growth, which can only be compensated to a limited extent by further increases in productivity per employee [GEEN19].

These contradictory developments - the lack of willingness to invest, e.g., in classic automation solutions, on the one hand, and the urgent need to increase productivity, which requires a higher degree of automation, on the other - result in a great demand for innovative, technical solutions that can be flexibly adapted to changing conditions [BAUE14]. Only if a consistently high level of resource utilization can be achieved will amortization and economic operation be possible.

Starting from an ideal, flexibly automatable resource that is suitable for the production of any product variant, a possible solution can be to change the role of the assembly worker. In the context of an agile assembly organization, they can use smart production

technology as a delegating authority for the automation of subtasks and themselves carry out assembly operations that are difficult to automate or require a high level of cognition [ZIPT13, SCHN20]. Robot-based systems are of particular importance in assembly automation due to their free programmability of motion [GÖBE12].

The implementation of task splitting highly depends on the availability of a suitable interaction interface through which the operator can transfer the automated execution to the respective operation equipment. Existing programming and commissioning methods are oriented to the functional scope of individual system components and require extensive expert knowledge for their integration into an overall process [DARN22]. This results in high qualification requirements for implementing enterprises, which makes a broad roll-out to all assembly employees seem impractical.

Therefore, the goal of this thesis is to develop an intuitive interaction method for assembly workers, which allows them to holistically teach new assembly processes. Following the example of the machine operator of a machine tool, such an interface must provide a process- or task-oriented view of the control task, which corresponds to the domain of the operator [BRAN17]. It should respect the level of knowledge of the operator group and support the product-specific configuration of assembly processes. An assembly system that can be flexibly automated thus functions as a tool for skilled employees, increasing their productivity and adding to the attractiveness of their role in the production system.

This thesis includes an analysis of existing methods for commissioning industrial robot systems (chapter 2) and derives the definition of research questions based on deficits with respect to the described use case (chapter 3). In chapter 4 the synthesis of a commissioning concept follows. Its core element is the development of an event-driven multi-agent system for sensor data interpretation and execution process generation, which is explained in chapter 5. Finally, in chapter 6 the commissioning concept is applied to a representative demonstration scenario and evaluated.