

1 Einleitung

Introduction

Vor dem Hintergrund des zunehmend steigenden globalen Wettbewerbs sind Unternehmen herausgefordert, ihre Produktion flexibel und anpassungsfähig zu gestalten. Während die Zeit zwischen den einzelnen Produktgenerationen immer kürzer wird, muss die angebotene Variantenvielfalt gesteigert werden, um Kundenanforderungen gerecht zu werden. Die Gesamtheit dieser Faktoren führt zu einer stetig steigenden Komplexität der Produktionssysteme und somit auch von deren Automatisierungs- und Steuerungsprozessen. Gleichzeitig müssen Steuerungsprozesse schnell konfigurierbar sein, um auf kurze Produktlebenszyklen reagieren zu können. Stillstandzeiten einer Anlage, die wegen Rekonfigurationen entstehen, verursachen hohe Kosten: In Fließbetrieben wie z. B. der Automobilmontage können die Kosten einer Minute Bandstillstand für reaktive Instandhaltung bis zu 20.000 Euro betragen [SCHU20b]. Eine Verkürzung der Rekonfigurationszeit bietet somit ein immenses Kosteneinsparungspotential, dessen tatsächliche Umsetzung in der unternehmerischen Realität eine große Herausforderung darstellt.

Einen solchen Steuerungs- und Automatisierungsprozess stellt der roboterbasierte Klebstoffauftrag in der Automobilkarosseriemontage dar, der als Grundlage der Referenzimplementierung in diesem Dissertationsvorhaben genutzt wird. In der Karosseriemontage werden zunehmend Industrieroboter zum Kleben von Seitenscheiben eingesetzt, die den Fließbetrieb in der Montage ermöglichen. Der Klebstoffauftrag erfolgt automatisiert durch einen Industrieroboter. Die Qualität des Klebstoffauftrags ist essenziell für die Festigkeit der Klebeverbindung und hängt von einer Vielzahl von Kleber- und Prozessparametern ab, wie z. B. der Fließfähigkeit, dem Raupenquerschnitt oder der Fahr- und Kleberaustrittsgeschwindigkeit. Das Klebeergebnis wird maßgeblich durch das Zusammenspiel der Robotergeschwindigkeit und des Volumenstroms bestimmt, der sich aus Pumpendruck und -Antriebsleistung, Druckminderungs- und Überstromventilparameter und der Dichte des verwendeten Klebers berechnen lässt. Dabei bestehen Korrelationen zwischen den Einstellungen der einzelnen Parameter, wie z. B. zwischen dem maximal möglichen Pumpendruck, der Viskosität und somit der Dichte des Klebstoffs. Darüber hinaus hängt die Einstellung des Volumenstroms von spezifischen Systemrandbedingungen wie z. B. Herstellervorgaben oder konstruktiven Einschränkungen der Klebstoffdosiervorrichtung ab.

Bei einer funktionalen Produktionsprozessveränderung, wie z. B. dem Austausch des zu verwendenden Klebstoffs, müssen alle gegebenen Prozesszusammenhänge erneut analysiert und ggf. rekonfiguriert werden, um die Qualität der Klebeverbindung sicherzustellen. Die Prozessanalyse und Umstellung der entsprechenden technischen

Steuerungsparameter, wie z. B. der Robotergeschwindigkeit, werden zusätzlich dadurch erschwert, dass die umzustellenden Parameter über mehrere Steuerungseinheiten verschiedener Automatisierungsebenen verteilt sind. Umfassende Datenmanagementsysteme, die einen Überblick über die Gesamtheit der Systemkenngrößen bzw. Stellhebel verschaffen, sind in Unternehmen häufig nicht vorhanden, sodass die Rekonfiguration erfahrungsbasiert erfolgt. Somit verlangt eine richtige Einstellung der Prozessparameter eine genaue Kenntnis des Anwenders über die komplexen Zusammenhänge zwischen den Prozess- und Klebeparametern und deren Auswirkung auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte, was die Lösungssuche bei einer Prozessveränderung erschwert und zeitintensiv macht.

Zur Beherrschung der Komplexität in der Prozessplanung und -konfiguration existiert eine Vielzahl an anwenderunterstützenden Lösungen, die u. a. Produktionsmitteleinsatzplanung miteinschließen. Klassische Funktionalitäten verfügbarer Planungstools umfassen i. d. R. die Simulation des realistischen Roboter- oder Maschinenverhaltens und die Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Funktionsbausteinen der Programmablauflogik und der Ausführungshardware. Die Tools fassen die verfügbaren technischen Daten zum Gesamtsystem (Maschine, Komponenten, Prozess, Produkt) zusammen und bieten somit eine Hilfestellung zur realen Inbetriebnahme im Maschinen- und Anlagenbau. Somit beschränkt sich jedoch die Assistenzleistung der meisten Systeme auf die visuelle Darstellung der Zusammenhänge zwischen vorhandenen Systemkomponenten. Aufgrund fehlender Wissensverarbeitungsfähigkeit verfügen übliche Assistenzsysteme weder über die Funktionalität, Lösungs- und Optimierungsvorschläge zu generieren, noch bilden sie das vorhandene Expertenwissen mit sog. Erfahrungswerten über das Systemverhalten ab [HOLL17], [ZIGA22]. Daraus folgt, dass die Anwenderunterstützung in der Entscheidungsfindung nicht vollständig ist und das Konfigurationszeit- und damit auch das Kosteneinsparungspotential nicht ausgeschöpft sind.

Ein großes Potential stellen semantische Technologien zur Lösung beider Herausforderungen dar: zum einen zur Bildung einer vollständigen Systemwissensbasis samt dem Expertenwissen und zum anderen zur intelligenten Assistenz bei der Konfigurationslösungssuche. Darauf deuten aktuelle Forschungserkenntnisse aus dem Exzellenzcluster „Internet of Production“ [BREC23a] und anderen europäischen Forschungsinstituten (TU Wien, Universität Stuttgart) hin [SAHL21], [STEI19a], [LIPP20]. Dank einer Graphenstruktur, die aus einer Vielzahl zusammenhängender Knoten bzw. Datenpunkte besteht, ermöglichen Ontologien eine flexiblere Modellierung bestehender Datenzusammenhänge als tabellarisch aufgebaute Datenbanken oder hierarchische Klassendiagramme. Die Knotenmenge kann beliebig erweitert werden, wodurch die Vernetzung der einzelnen Datendomänen modelliert werden kann und die Einbindung des vorhandenen Expertenwissens erfolgt [DENG11]. Darüber hinaus eignet sich die Sprache der Graphentheorie besonders gut zur Lösung vieler Optimierungsprobleme, in denen Paare von Objekten in Relation stehen [JUNG13]. Datenpunkte einer

Prozesssteuerungsarchitektur stellen ein gutes Beispiel für ein Optimierungsproblem dieser Art dar. Des Weiteren können Ontologien auf bereits bestehenden Datenmanagementsystemen aufbauen, sodass keine vollständige Neumodellierung vorhandener Daten notwendig ist. Ansätze des sog. OBDA (eng. *Ontology based data access*, dt. ontologiebasierter Datenzugriff) ermöglichen die technische Umsetzung mehrschichtiger Datenmanagementsysteme, in denen eine Ontologie mithilfe einer Verbindungsschicht (sog. *Mapping layer*) zur Verwaltung bestehender Datenressourcen wie z. B. Datenbanken verwendet werden kann [BREC23b]. Nicht zuletzt haben sich Technologien des Semantic Web seit einigen Jahren im Bereich der IT und des WorldWide-Webs (WWW) etabliert und unterstützen weltweit verbreitete Systeme wie z. B. Google-Suchfunktionen und Wissensmanagementsysteme verschiedener Domänen, inkl. Produktionssystemkonzipierung [KEJR19], [BAUE15].

Die aufgeführten Vorteile der semantischen Technologien wie Ontologien verdeutlichen deren Potential als Grundlage einer wissensbasierten Assistenzlösung, deren Konzeption das Ziel dieser Arbeit darstellt. Es werden Aspekte wie ein Datenkonzept zur Bereitstellung relevanter Produktionssysteminformationen, Einbindung des vorhandenen Expertenwissens des Anwenders sowie die Funktionsweise des Assistenztools basierend auf ausgewählten Optimierungsalgorithmen betrachtet. Darüber hinaus soll exemplarisch ein semantisches Wissensmanagementsystem mit einer intelligenten Assistenzleistung beschrieben und implementiert werden.

Die Vorgehensweise der Arbeit sieht vor, dass in Kapitel 4 zunächst eine studienbasierte Analyse der Anforderungen an wissensbasierte Assistenzsysteme vorgenommen wird. Auf Basis jener wird anschließend das Wissensmanagementsystem, bestehend aus zusammenhängenden Modulen und Schnittstellen zu relevanten Prozesswissensquellen, als zentraler Punkt dieser Arbeit vorgestellt (s. Kapitel 5). Im Fokus steht dabei eine an Ontologienhierarchie [KHIL09] angelehnte Modularchitektur, die auf einer heterogenen IIoT-Prozessarchitektur aufbaut.

Durch die Zusammenführung von datenbasierten Informationen aus verschiedenen Produktionssteuerungssystemen, Datenmodellen und vorhandenem Expertenwissen eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Steuerungsrekonfiguration. Diese Potenziale konnten bisher nicht vollständig genutzt werden, da eine fehlende Verknüpfung relevanter Datenquellen und die begrenzte Semantik der verfügbaren Informationen der Optimierung im Weg standen. Kapitel 6 widmet sich daher der Evaluation verschiedener Optimierungsalgorithmen zur Anwendung in Kombination mit dem Wissensmanagementsystem, sodass sich ein entscheidungsunterstützendes Assistenzsystem ergibt.

Zur Validierung des konzipierten Rahmenwerks wird in Kapitel 7 eine prototypische Umsetzung anhand des zuvor genannten Anwendungsfalls durchgeführt. Hierbei wird der Demonstrator IoP-AC (*Internet of Production Automation Cell*) weiterentwickelt, um den Komplettierungsprozess in der Herstellung von Automobilseilenscheiben

darzustellen. Die bestehende vielfältige IIoT-Steuerungsarchitektur, die auf verschiedenen Kommunikationsprotokollen inkl. OPC UA und MQTT basiert, dient als Ausgangspunkt für die Umsetzung. Diese Architektur soll durch die Implementierung der vorgestellten Konzepte um ein anwenderunterstützendes Assistenzsystem für die wissensbasierte Steuerungsrekonfiguration erweitert werden.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für sich ergebende Fragestellungen in Forschung und Industrie in Kapitel 8.

Die vorgeschlagenen Ansätze orientieren sich an den aktuellen Anforderungen und Problemen der Industrie. Die erzielten Ergebnisse werden in die Entwicklung zukünftiger Produktionsassistentenkonzepte sowie in die Weiterentwicklung von Industrie 4.0 und die Gestaltung des Internet of Production einfließen.

Introduction

Against the backdrop of increasing global competition, companies are challenged to make their production flexible and adaptable. While the time between individual product generations is becoming ever shorter, the number of variants on offer must be increased in order to meet customer requirements. All of these factors lead to a steady increase in the complexity of production systems and therefore also of their automation and control processes. At the same time, control processes must be quickly configurable in order to be able to react to short product life cycles. System downtimes caused by reconfigurations result in high costs: In flow operations such as automotive assembly, the cost of one minute of line downtime for reactive maintenance can be up to 20,000 euros [SCHU20b]. Shortening the reconfiguration time therefore offers immense cost-saving potential, the actual implementation of which represents a major challenge in business reality.

One such control and automation process is robot-based adhesive application in automotive body assembly, which is used as the basis for the reference implementation in this dissertation project. In car body assembly, industrial robots are increasingly being used for gluing side windows, which enable flow operation in assembly. The adhesive is applied automatically by an industrial robot. The quality of the adhesive application is essential for the strength of the bonded joint and depends on a variety of adhesive and process parameters, such as flowability, bead cross-section or the speed of travel and adhesive exit. The gluing result is largely determined by the interaction of the robot speed and the volume flow, which can be calculated from the pump pressure and drive power, pressure reduction and overflow valve parameters and the density of the adhesive used. There are correlations between the settings of the individual parameters, e.g. between the maximum possible pump pressure, the viscosity and thus the density of the adhesive. In addition, the setting of the volume flow depends on specific system boundary conditions such as manufacturer specifications or design limitations of the adhesive dispensing device.

In the event of a functional change to the production process, such as replacing the adhesive to be used, all of the given process relationships must be analyzed again and reconfigured if necessary in order to ensure the quality of the bonded joint. The process analysis and conversion of the corresponding technical control parameters, such as the robot speed, are further complicated by the fact that the parameters to be converted are distributed across several control units at different automation levels. Comprehensive data management systems that provide an overview of all the system parameters or control levers are often not available in companies, meaning that reconfiguration is based on experience. Correct adjustment of the process parameters therefore requires the user to have precise knowledge of the complex relationships between the process and bonding parameters and their effect on upstream and downstream process steps, which makes the search for solutions in the event of a process change more difficult and time-consuming.

To master the complexity of process planning and configuration, there is a wide range of user-supported solutions that include production resource planning. Classic functionalities of available planning tools generally include the simulation of realistic robot or machine behaviour and the visualization of the relationships between function blocks of the program flow logic and the execution hardware. The tools summarize the available technical data on the overall system (machine, components, process, product) and thus provide assistance for real commissioning in mechanical and plant engineering. However, the assistance provided by most systems is limited to the visual representation of the relationships between existing system components. Due to a lack of knowledge processing capability, conventional assistance systems neither have the functionality to generate solution and optimization proposals, nor do they map the existing expert knowledge with so-called empirical values about the system behavior [HOLL17], [ZIGA22]. As a result, user support in the decision-making process is not complete and the configuration time and therefore also the cost-saving potential is not exhausted.

Semantic technologies offer great potential for solving both challenges: on the one hand, for creating a complete system knowledge base including expert knowledge and, on the other hand, for intelligent assistance in the search for configuration solutions. This is indicated by current research findings from the Cluster of Excellence "Internet of Production" [BREC23a] and other European research institutes (TU Vienna, University of Stuttgart) [SAHL21], [STEI19a], [LIPP20]. Thanks to a graph structure consisting of a large number of connected nodes or data points, ontologies enable a more flexible modeling of existing data relationships than tabular databases or hierarchical class diagrams. The set of nodes can be expanded as required, which allows the networking of individual data domains to be modeled and the integration of existing expert knowledge [DENG11]. In addition, the language of graph theory is particularly well suited to solving many optimization problems in which pairs of objects are related [JUNG13]. Data points of a process control architecture are a good example of an optimization problem of this type. Furthermore, ontologies can build on existing data management systems so that no complete re-modeling of existing data is necessary. Ontology-based data access (OBDA) approaches enable the technical implementation of multi-layer data management systems in which an ontology can be used to manage existing data resources such as databases with the help of a mapping layer [BREC23b]. Last but not least, semantic web technologies have been established in the field of IT and the World Wide Web (WWW) for several years and support systems that are used worldwide, such as Google search functions and knowledge management systems in various domains, including production system design [KEJR19], [BAUE15].

The listed advantages of semantic technologies such as ontologies illustrate their potential as the basis for a knowledge-based assistance solution, the design of which is the aim of this thesis. Aspects such as a data concept for the provision of relevant production system information, integration of the user's existing expert knowledge and the functionality of the assistance tool based on selected optimization algorithms are

considered. In addition, a semantic knowledge management system with an intelligent assistance service will be described and implemented as an example.

The approach of the thesis provides for a study-based analysis of the requirements for knowledge-based assistance systems in Chapter 4. Based on this, the knowledge management system, consisting of interrelated modules and interfaces to relevant process knowledge sources, is then presented as the central point of this work (see Chapter 5). The focus here is on a modular architecture based on ontology hierarchy [KHIL09], which builds on a heterogeneous IIoT process architecture.

Combining data-based information from different production control systems, data models and existing expert knowledge opens up new possibilities for improving control reconfiguration. This potential has not yet been fully exploited, as a lack of links between relevant data sources and the limited semantics of the available information have stood in the way of optimization. Chapter 6 is therefore dedicated to the evaluation of various optimization algorithms for use in combination with the knowledge management system, resulting in a decision-support assistance system.