

Ein service-orientierter Ansatz zur Automatisierung adaptiver, individueller Prozesse

Smarte Steuerung flexibler Produktionssysteme

S. Hort, B. Nießing, S. Jung, Prof. R. Schmitt

Um trotz kleiner Stückzahlen kundenindividuelle Produkte effizient herstellen zu können, müssen Produktionssysteme variable Prozesse ausführen und Aufträge optimal einsteuern können. Bei der Umsetzung birgt - neben einer variablen Verkettung der Maschinen - die steuerungsseitige Implementierung große Herausforderungen. Dieser Beitrag stellt sich letzterer Herausforderung und zeigt einen service-orientierten Ansatz zur intelligenten, adaptiven Prozesssteuerung auf.

A service-oriented approach for the automation of adaptive, individual processes

Smart control of flexible production systems

In order to efficiently manufacture customized products despite small quantities, production systems must be able to execute variable processes and optimally control orders. In addition to the dynamically interconnection of machines, control implementation poses great challenges. This article addresses the latter challenge and shows a service-oriented approach to intelligent, adaptive process control.

1 Einleitung

Im Zuge der Industrie-4.0-Initiative werden Produktionsprozesse zunehmend automatisiert und vernetzt, um die Produktivität und die Produktqualität zu erhöhen. Dabei werden die automatisierten Produktionssysteme so flexibel wie möglich gestaltet, um auf Änderungen im Produktionsprogramm, z.B. durch neue Produktvarianten oder Nachfrageschwankungen, effizient reagieren zu können [1]. Weiterhin können nachträglich neue Produktionsprozesse realisiert werden, wodurch ein langer Einsatz des Produktionssystems im Unternehmen gewährleistet wird. Die Flexibilität in Produktionssystemen kann je nach Betrachtungsweise unterschiedlich definiert und auf bestimmte Komponenten, wie Mensch, Produkt, Organisation, Prozess oder Ressource bezogen werden [2]. In diesem Beitrag bezieht sich die Flexibilität auf die Fähigkeit des Produktionssystems, unterschiedliche Bearbeitungsprozesse parallelisiert auf verschiedenen Ressourcen ausführen zu können. Dies wird durch eine freie Verkettung der einzelnen Maschinen und Geräte und eine im gleichen Maße flexible Softwarearchitektur realisiert. Durch die freie Verkettung können die Aufträge die Einzelmaschinen in beliebiger Reihenfolge durchlaufen [3]. Wann welcher Auftrag auf welcher Maschine bearbeitet wird, wird durch ein Leitsystem festgelegt. Damit das Leitsystem diese Entscheidungen optimal treffen kann, muss dieses auf alle relevanten Produkt-, Maschinen- und Prozessdaten zugreifen können. Die Maschinen werden durch standardisierte Kommunikationsprotokolle (z.B. MQTT, OPC-UA) an das Leitsystem angebunden und ermöglichen so eine aufwandsarme, herstellerunabhängige Integration [4].

Eine Herausforderung stellt sich in den hohen Implementierungs- und Rechenaufwänden, die durch die gewonnenen Freiheitsgrade aufgrund der flexiblen Automatisierung entstehen. Wie diese Aufwände reduziert werden können, beschreiben die folgenden Abschnitte anhand des Konzeptes der service-orientierten Automatisierung.

2 Flexible Produktionssysteme

Flexible Produktionssysteme führen verschiedene Produktions-, Mess- und Prüfprozesse automatisiert aus. Unterschiedliche Maschinen und Geräte werden dazu so verkettet, dass die Aufträge diese in beliebiger Reihenfolge durchlaufen können [5].

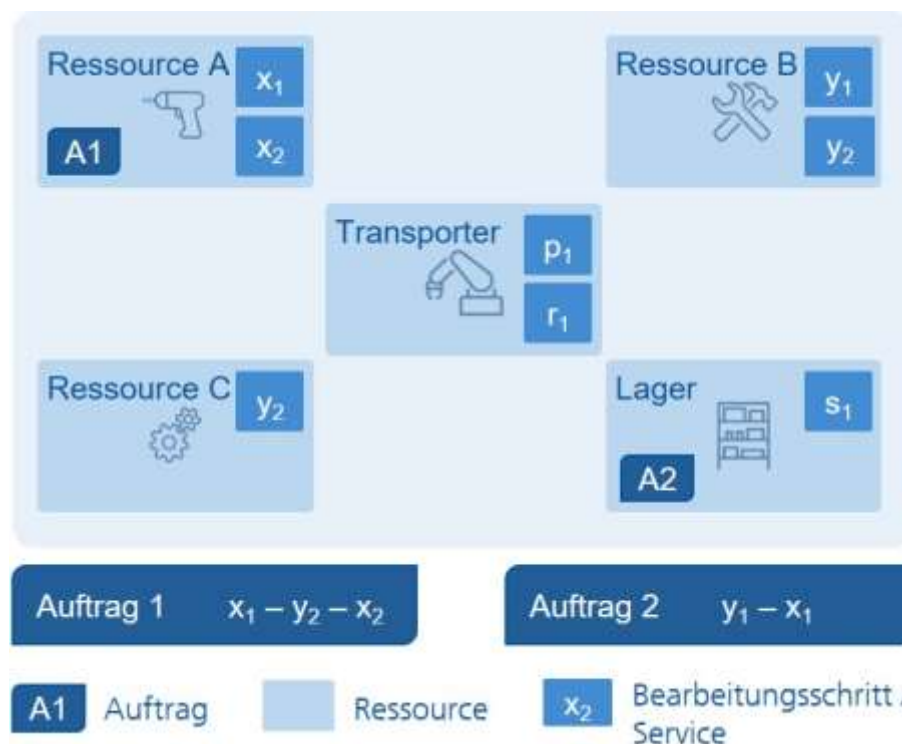


Bild 1: Beispielhafter Aufbau eines flexiblen Produktionssystems

Bild 1 zeigt eine Möglichkeit zur Realisierung einer solchen Anlage. Die einzelnen Maschinen und Geräte (im Weiteren mit Ressourcen bezeichnet) sind in der Lage, unterschiedliche Bearbeitungsschritte auszuführen. Das Produktionssystem besteht aus drei Bearbeitungsressourcen (A, B und C) und zwei Hilfsressourcen (Transporter und Lager). Jede Ressource bietet verschiedene Services an. Die Services der Bearbeitungsressourcen entsprechen dabei den Bearbeitungsschritten der Aufträge. Ressource A kann die Services x_1 und x_2 ausführen. Diese könnten beispielsweise zwei verschiedene Bohrvorgänge repräsentieren. Um die automatisierte Ausführung zweier Bearbeitungsschritte unterschiedlicher Ressourcen durchzuführen, müssen diese verbunden werden. Dafür können flexible Transportsysteme eingesetzt werden, die die Aufträge zwischen den Ressourcen befördern. Je nach Art des Systems kann es sich dabei um Roboterarme, Fließbänder oder fahrerlose Transportsysteme (FTS) handeln. Weiterhin ist auch ein Aufbau denkbar, in dem sich die Ressourcen zum Produkt bewegen. In Bild 1 wird ein Roboterarm eingesetzt, der mittels der Services p_1 und s_1 die Aufträge zwischen

den Bearbeitungsstationen befördert. Jedem Auftrag liegt ein Bearbeitungsprozess zu Grunde, der sich aus verschiedenen Bearbeitungsschritten zusammensetzt. So muss Auftrag 1 die Bearbeitungsschritte x_1 , y_2 und x_2 in genau dieser Reihenfolge durchlaufen. Da sowohl Ressource B als auch Ressource C den Bearbeitungsschritt y_2 anbieten, ergeben sich dadurch zwei verschiedene Möglichkeiten den Auftrag auszuführen. Welche dieser beiden Möglichkeiten gewählt werden soll, muss situativ, zum Beispiel auf Basis der Ressourcenauslastung bzw. -verfügbarkeit oder den jeweiligen ressourcenindividuellen Bearbeitungszeiten, entschieden werden. Weiterhin führt die parallele Bearbeitung zweier oder mehrerer Aufträge zu weiteren Entscheidungsmöglichkeiten. So muss beispielsweise entschieden werden, ob zuerst Auftrag 1 nach der Durchführung von x_1 zu Ressource B bzw. C oder Auftrag 2 vom Lager zu Ressource B transportiert wird. Die auf diese Weise im Vergleich zu starren Produktionssystemen gewonnenen Freiheitsgrade verbessern die allgemeine Verfügbarkeit des Systems, indem Produkte bei Maschinenausfall oder -wartung auf alternativen Ressourcen bearbeitet werden können. Weiterhin wird die Gesamtdurchlaufzeit durch parallele Bearbeitung reduziert. [6]

3 Service-orientierte Automatisierung im Smart Manufacturing Network

Für eine aufwandsarme Kommunikation und eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf Änderungen im Produktionsablauf wird eine service-orientierte Architektur zur Automatisierung der verschiedenen Ressourcen verwendet. Im sogenannten Smart Manufacturing Network bieten die Ressourcen ihre Services und Daten eigenständig an und ermöglichen so eine flexible Steuerung durch ein Leitsystem [7]. Hier werden die von den Ressourcen angebotenen Services mit den Bearbeitungsschritten der Aufträge abgeglichen und diesen zugewiesen. Darüber hinaus müssen die Ressourcen effizient in das System integriert werden [8, 9]. **Bild 2** zeigt eine solche Architektur auf, die sich über alle Ebenen der Automatisierungspyramide erstreckt.

Das **Integration Framework** ist für die Anbindung der Ressourcen an das Leitsystem zuständig. Mittels eines Plug & Produce-Ansatzes können sich diese bei dem Leitsystem anmelden und ihre Services zur Verfügung stellen. Dazu wird für jede Ressource ein *Software Agent* erstellt, der als Treiber fungiert und mit dem das Leitsystem kommuniziert. Der Software-Agent definiert die von den Ressourcen angebotenen Services (z.B. Greifen, Wiegen, Transportieren) und ermöglicht so die Serviceanfrage durch das Leitsystem. Software-Agenten werden dabei individuell erstellt, was eine Anbindung durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) oder auch interne Regler oder Fremdsoftware ermöglicht. Weiterhin fungiert der *Software-Agent* als digitaler Zwilling, indem er alle Informationen der Ressource (z.B. Status, mittlere Prozesszeiten, Auslastung) in einem standardisierten Informationsmodell speichert und zur Verfügung stellt.

Der **Befehlsprozessor** kommuniziert direkt mit dem Integration Framework, indem er die Befehle zur Ausführung der Services an die entsprechenden Software-Agenten weiterleitet. Dazu überprüft er regelmäßig die aktuellen Zustände der Ressourcen (z.B. verfügbar, in Bearbeitung, gestört) und ob die Anforderungen an die Ausführung des

Service erfüllt sind (z.B. Material vorhanden). Weiterhin erhält der Befehlsprozessor eine Mitteilung, wenn eine Ressource einen Service beendet hat und gibt dann den Befehl zur Ausführung des nächsten.

Das **Informationssystem** aggregiert und verarbeitet alle Informationen der Ressourcen, Produkte, Materialien sowie weitere Prozessdaten (z.B. Durchlaufzeiten) und stellt diese im Smart Manufacturing Network über Cloudlösungen zur Verfügung.

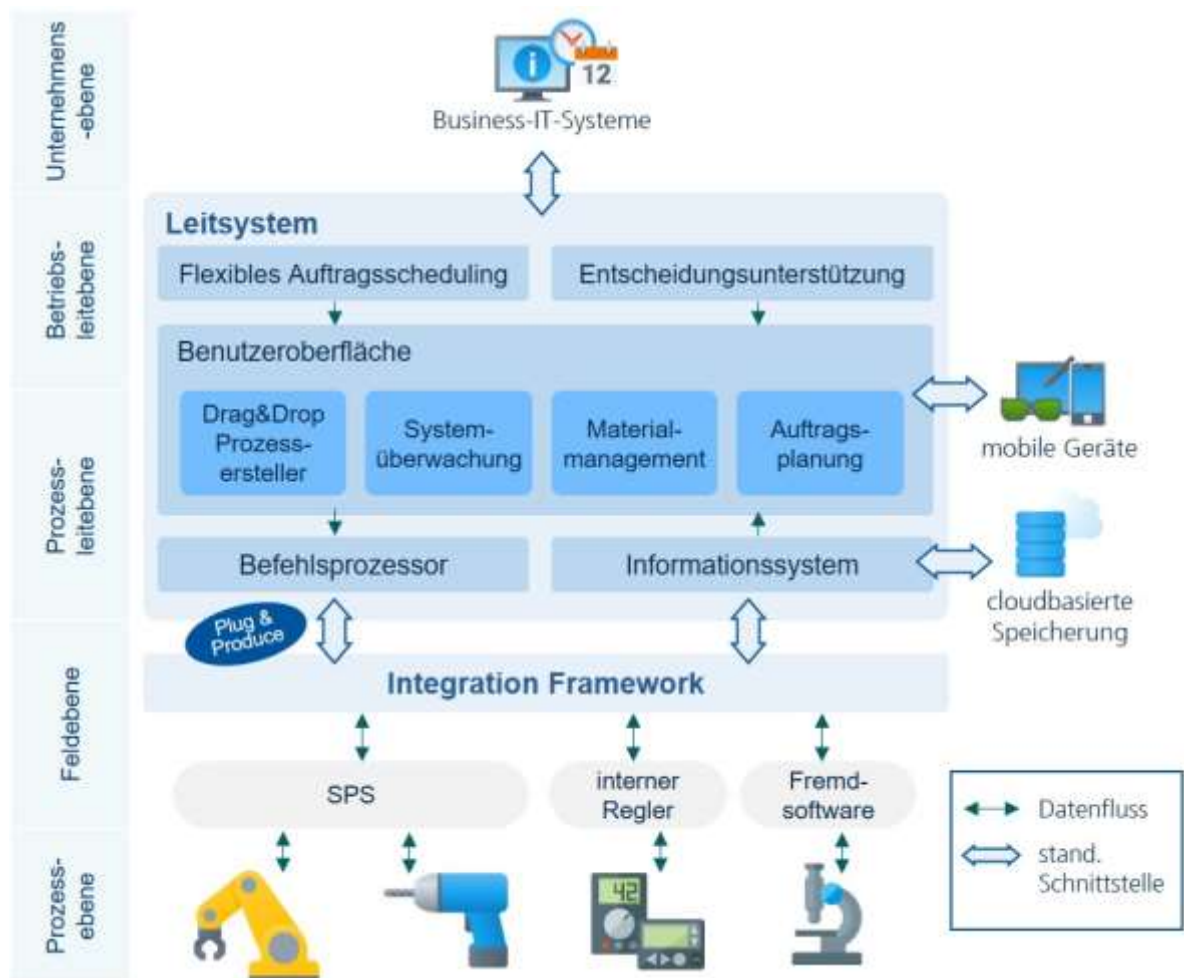


Bild 2: Service-orientierte Architektur für die flexible, adaptive Prozesssteuerung im Smart Manufacturing Network

Die **Benutzeroberfläche** ermöglicht dem Anwender das Steuern und Überwachen des Produktionssystems. Zur Realisierung von flexiblen Prozessen dient dazu ein *Prozessersteller*, der die verschiedenen Services mittels Drag & Drop zu Prozessen verbindet. Dabei können auch logische Verknüpfungen zur Ausführung alternativer Prozessverläufe (z.B. „Wenn Toleranzabweichung größer als zwei Prozent, führe Prozessschritt A aus, sonst B.“) modelliert werden. In der *Auftragsplanung* können durch die Zuweisung von Startzeitpunkten zu den Prozessen Aufträge erstellt werden. Diese werden dann in einem Ablaufplan (Schedule) angeordnet und in der definierten Reihenfolge abgearbeitet. In verschiedenen Ansichten werden die Zustände der einzelnen Ressourcen und die Abarbeitungsreihenfolgen zur *Systemüberwachung* bereitgestellt. Weiterhin können die aktuellen Informationen aller verwendeten Materialien eingesehen

werden (*Materialmanagement*). Eine REST-API (engl. Representational State Transfer – Application Programming Interface) bietet den Zugriff auf die Benutzeroberfläche mittels eines Internetbrowsers über beliebige mobile Geräte, wie Handy oder Tablet. Dies ermöglicht die Überwachung des Produktionssystems und sogar die Ausführung neuer Aufträge von einem beliebigen Ort.

Um die durch die service-orientierte Architektur geschaffenen Freiheitsgrade der variablen Produktionsanlage optimal nutzen zu können, müssen intelligente Planungs- und Steuerungssysteme wie das flexible Auftragsscheduling und die Entscheidungsunterstützung dem Anwender helfen. Dabei stellt das **flexible Auftragsscheduling** den Produktionsaufträgen die Ressourcen gegenüber und ermittelt so alle möglichen Kombinationen zu deren Ausführung (*Matching*). Aus diesen Kombinationen werden dann im nächsten Schritt die optimalen Routen im sogenannten *Routing* ausgewählt. Die Auswahl des Zielkriteriums, beispielsweise Minimierung der Durchlaufzeiten oder Erhöhung der Auslastung, wie auch die Berechnungsart, zum Beispiel Reihenfolgenregeln, Lineare Optimierung oder Maschinelles Lernen, können dabei frei gewählt werden. So können auch komplexe und parallel ausgeführte Prozesse effizient geplant und durchgeführt werden. Die **Entscheidungsunterstützung** hilft bei anderen produktionsrelevanten Themen, wie der Materialbereitstellung und Maschinenwartung, indem sie Entscheidungen auf Basis Künstlicher Intelligenz trifft und diese nachvollziehbar darlegt. Die benötigten Informationen werden dazu aus dem Informationssystem und den Business-IT-Systemen wie z.B. ERP (engl. Enterprise-Resource-Planning), PLM (engl. Product-Lifecycle-Management) oder auch Simulationssoftware in die Entscheidung mit einbezogen.

4 Anwendungsfall: Messzelle

Das zuvor beschriebene Konzept der service-orientierten Steuerung flexibler Produktionssysteme wurde in einer Forschungsplattform des Instituts für Bio- und Geowissenschaften Pflanzenwissenschaften (IBG-2) am Forschungszentrum in Jülich implementiert und für die vorliegende Aufgabenstellung angepasst. Dazu wurde als Leitsystem eine am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) entwickelte Steuerungssoftware verwendet.

Im Anwendungsfall des IBG-2 sollen Pflanzen schnell, präzise und automatisiert mit verschiedenen Sensorsystem vermessen werden. Dadurch können unter anderem Rückschlüsse auf das Wachstumsverhalten und die -geschwindigkeit der Pflanzen gezogen werden.

Zur Realisierung dieser Aufgabe besteht die Messzelle aus verschiedenen Messsystemen, einem Roboterarm, der Beleuchtung, dem Förderband und dem Rolltor (siehe **Bild 3**). Für die Messaufgabe wurden die folgenden drei *Messsysteme* vorgesehen: Manta-Kamera, LMS 400, Sick Ranger. Die Messsysteme sind dabei an dem *Roboterarm* befestigt, was eine flexible und adaptive Vermessung der Pflanzen ermöglicht (Bild 3 oben rechts). Der Roboter umkreist dabei die zu vermessende Pflanze auf bestimmten Bahnen, die sich an die Form und Größe dieser anpassen. Die individuell steuerbare *Beleuchtung* leuchtet die Messzelle homogen aus und bietet so eine optimale Messumgebung. Das *Förderband* positioniert die Pflanze auf der exakt gewünschten Messposition. Das *Rolltor* wird für die

Messungen geschlossen und ermöglicht so einen störungsfreien Messvorgang. Vermiedene Störungen können dabei das Eintreten eines Menschen in den Bewegungsbereich des Roboters sein oder externe Lichteinflüsse, die die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erschweren.

In Bild 3 oben links ist die Benutzeroberfläche des Leitsystems abgebildet. In der zu sehenden Ressourcenübersicht sind die zuvor beschriebenen Bestandteile abgebildet. Anhand der Umrandung kann der aktuelle Zustand der Ressourcen abgelesen werden. Die grüne Umrandung zeigt dabei an, dass die Station störungsfrei und bereit zur Ausführung eines Service ist. Mit Klick auf die einzelnen Ressourcen können dann die einzelnen Services angezeigt und ausgeführt werden. So kann beispielsweise das Rolltor geöffnet oder die Beleuchtung angepasst werden. Mittels des Prozesserstellers (Bild 3 unten rechts) können dann die verschiedenen Services zu Bearbeitungsprozessen verknüpft werden.



Bild 3: Automatisierte Messzelle zur 3D-Vermessung von Pflanzen (o.l.: Stationsübersicht des Leitsystems; o.r.: Foto der Messzelle; u.l.: CAD-Modell der Messzelle; u.r.: Prozessersteller des Leitsystems)

Die Vorteile der entwickelten Messzelle liegen im modularen Aufbau der Hard- und Software, was nicht nur eine variable Implementierung von individuellen Messaufgaben, sondern außerdem eine aufwandsarme Instandsetzung ermöglicht. Die einzelnen Hardwarekomponenten können auf diese Weise unabhängig und parallel voneinander programmiert und getestet werden. Durch die modulare Gestaltung kann die Messzelle effizient um neue Messmittel und Sensoren erweitert werden. Dazu müssen lediglich die entsprechenden Software-Agenten erstellt werden. Die Anbindung an das Leitsystem erfolgt dann standardisiert über das Integration Framework. Die service-orientierte

Automatisierung ermöglicht somit durch ihre Flexibilität einen zukunftssicheren Betrieb der Anlage, indem es immense Hardwarekosten einspart und jederzeit auf neue Messprozesse angepasst werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Ansatz der service-orientierten Steuerung für flexible Produktionssysteme können adaptive und individuelle Prozesse aufwandsarm implementiert und ausgeführt werden. Die modulare Struktur ermöglicht eine Erweiterung oder einen Austausch von Ressourcen, um neue Prozesse realisieren zu können. Die Ressourcen stellen eigenständig ihre Services und Daten im Smart Manufacturing Network zur Verfügung und können optimal vom Leitsystem eingeplant werden. Zur Verbesserung des Konzeptes wird weiter an der effizienten Anbindung neuer Ressourcen und an dem intelligenten Scheduling durch KI geforscht.

Stichwörter Automatisierung, Messtechnik, Flexible Fertigungssysteme

6 Literatur

- [1] Schönemann, M.; Herrmann, C.; Greschke, P. et al.: Simulation of matrix-structured manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015), S. 104–112
- [2] Garrel, J. von; Schenk, M.; Seidel, H.: Flexibilisierung der Produktion – Maßnahmen und Status-Quo. In: Schlick, C. M.; Moser, K.; Schenk, M. (Hrsg.): *Flexible Produktionskapazität innovativ managen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014, S. 81–126
- [3] Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S. et al.: Frei verkettete Montagesysteme. *ZWF* 113 (2018) 3, S. 1–5
- [4] Joshi, R.; Didier, P.; Jimenez, J. et al.: *The Industrial Internet of Things Volume 5G: Connectivity Framework*. 2018
- [5] Brecher, C.; Weck, M.: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019
- [6] Göppert, A.; Lettmann, P.; Jung, S. et al.: Planung und Steuerung von frei verketteten Montagesystemen. Zuordnung von Aufträgen zu Montageressourcen in der Planung und im Betrieb. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 9, S. 1–4
- [7] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie: Vernetzte, adaptive Produktion im Smart Manufacturing Network. Internet: <https://www.vernetzte-adaptive-produktion.de/>
- [8] Mendes, J. M.; Leitão, P.; Restivo, F. et al.: Service-Oriented Agents for Collaborative Industrial Automation and Production Systems. In: Mařík, V.; Strasser, T.; Zoitl, A. (Hrsg.): *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009, S. 13–24

[9] Jung, S.; Grunert, D.; Schmitt, R.: Service-oriented Communication and Control System Architecture for Dynamically Interconnected Assembly Systems. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hrsg.): Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018, S. 223–229



Simon Hort, Bastian Nießing, Sven Jung, Prof. Robert Schmitt
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Telefon: +49 241 8904-251

E-Mail: simon.hort@ipt.fraunhofer.de

URL: <https://www.ipt.fraunhofer.de>

Bild 1: Beispielhafter Aufbau eines flexiblen Produktionssystems

Bild 2: Service-orientierte Architektur für die flexible, adaptive Prozesssteuerung im Smart Manufacturing Network

Bild 3: Automatisierte Messzelle zur 3D-Vermessung von Pflanzen (o.l.: Stationsübersicht des Leitsystems; o.r.: Foto der Messzelle; u.l.: CAD-Modell der Messzelle; u.r.: Prozessorsteller des Leitsystems)

(Anmerkung: Bild 1 und Bild 2 sind eigene Darstellungen)