

μPlant: Modellfabrik für vernetzte heterogene Anlagen

Automatisierungstechnische Konzeption und Realisierung

Modellfabriken werden mittlerweile häufig in Forschung und Lehre eingesetzt, aber über ihren Aufbau und ihre Funktionen ist wenig zu lesen. Im Beitrag wird eine Übersicht über in Deutschland vorhandene Modellfabriken gegeben. Zudem werden Details der selbst konzipierten und realisierten Modellfabrik μPlant vorgestellt. Diese besteht aus mehreren mit Transportrobotern verbundenen Produktionsinseln/-zellen, die jeweils lokal über angepasste Automatisierungssysteme verfügen. Alle Module sind stofflich und informationstechnisch integriert und die Modellfabrik kann voll automatisiert betrieben werden. Der Beitrag richtet sich an Personen mit Interesse an Aufbau, Beschaffung oder Nutzung von Modellfabriken.

SCHLAGWÖRTER Modellfabrik / Modularisierung / dezentrale Automation

μPlant: model factory for networked heterogeneous systems

Model factories are increasingly being used in research and teaching, but little is published about their design and their functions. This article provides an overview of model factories in Germany. In addition, details are presented of our model factory, μPlant. This consists of several production islands/cells connected by transport robots. Each module has a specific local automation system. All modules are integrated with regards to both materials and information, and the model factory operation can be fully automated.

KEYWORDS model factory / modularisation / decentral automation

ANDREAS KROLL, AXEL DÜRRBAUM, DAVID ARENGAS, HASSAN AL MAWLA, LARS KISTNER, ALEXANDER REHMER, Universität Kassel

Modellfabriken erlauben eine praxisnahe Ausbildung Studierender an industriellen Komponenten und Systemen. Fehler dürfen gemacht und Ideen ausprobiert werden, um daraus zu lernen, was in Produktionsanlagen in der Regel wegen möglicher Gefährdungen und wirtschaftlicher Schäden nicht erwünscht ist. Im Gegensatz zu thematisch eng fokussierten Experimentalaufbauten sind bei Modellfabriken Produktionskontext und Verkopplungen präsent. Für eine anwendungsorientierte Forschung im Bereich der datengetriebenen Modellbildung, Überwachung, Regelung und Optimierung ist es wichtig, dass Testumgebungen realitätsnah sind. Dies kann eine praxisnahe Größe und Komplexität des Testsystems bedeuten, wie auch realitätsnahe Kopplungen und Störungen. Bei datengetriebenen Verfahren sind realitätsnahe Signaleigenschaften bezüglich Rauschen oder fehlerhafter Zeitstempelung wichtig. Diese Anforderungen lassen sich ebenfalls durch Modellfabriken abdecken.

Um die hohen Kosten einer schlüsselfertig gelieferten Modellfabrik zu vermeiden und mehr Freiheitsgrade bei der Gestaltung zu haben, fiel in der Arbeitsgruppe der Autoren die Entscheidung auf eine Eigenentwicklung. Bei der Konzeptentwicklung wurde einerseits untersucht, wie andere Modellfabriken aufgebaut sind, siehe Abschnitt 1. Andererseits sollten aktuelle industrielle Trends berücksichtigt werden, wie die Flexibilisierung der Produktion und modularisierte Anlagen, beispielsweise zwecks wirtschaftlicher Herstellung attraktiver Spezialprodukte oder schnellem Anlaufbetrieb bei neuen Produktideen, siehe [4, 6, 8]. So wurde wegen der besonderen Anforderungen bei der Integration modular automatisierter Anlagen in Namur- und ZVEI-Arbeitskreisen an Standards wie dem Namur-Modul Type Package gearbeitet (MTP) [1, 5].

Im Ergebnis entstand das Konzept einer modularen Modellfabrik mit einfach variierbarem Prozessschema. Ihre Module sollten unterschiedliche Produktionsteilprozesse, wie Fließ- und Stückgutprozesse und Logistik, abbilden und der Materialfluss mit autonomen

Transportrobotern erfolgen. Zudem sollten bei den Modulen unterschiedliche Automatisierungssysteme und Rechnerplattformen zum Einsatz kommen, sodass von einem ‚System of Automation Systems‘ gesprochen werden kann. Es sollten Gegenwartstechnologien, wie moderne Prozessleitsysteme wie auch Zukunftstechnologien, wie autonome mobile Roboter, Einsatz finden und insgesamt ein Technologieschaufenster entstehen. Dieser Beitrag richtet sich an Personen, die mit Konzipierung oder Beschaffung von Modellfabriken für Lehr- und Forschungszwecke befasst sind sowie an



BILD 1: Standorte der ermittelten Modellfabriken

TABELLE 1: Ermittelte Modellfabriken (alphabetisch nach Ort geordnet, Stand der Referenzen: 28.8.2017)

Nr.	Modellfabrik	Ref.
1	Institut für Regelungstechnik (IRT), Prof. Abel, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen	[2]
2	Demonstrationsfabrik Aachen, Prof. Schuh, RWTH Aachen	[18]
3	M3PAC, Lehrstuhl für Prozessleittechnik, Prof. Eppe, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, RWTH Aachen	[19]
4	Lernfabrik für vernetzte Produktion, Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV), Augsburg	[16]
5	Mini-plant for OCM process, Fachgebiet Dynamik und Betrieb technischer Anlagen, Prof. Wozny, Fakultät für Prozesswissenschaften, TU Berlin	[35]
6	LPS Lernfabrik, Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS), Prof. Kuhlenkötter, Fakultät für Maschinenbau, Universität Bochum	[22]
7	VERA, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Prof. Lunze, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik, Universität Bochum	[23]
8	Die Lernfabrik, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Prof. Dröder, Prof. Herrmann, Fakultät für Maschinenbau, TU Braunschweig	[24]
9	Mechatronische Modellfabrik, Labor für Anlagen- und Leittechnik der Fertigungsautomation, Prof. Trittin, Hochschule Bremen	[36]
10	Experimentier- und Digitalfabrik (EDF), Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Prof. Müller, Fakultät für Maschinenbau, TU Chemnitz	[51]
11	E3-Forschungsfabrik, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz	[32]
12	Prozesslernfabrik – Center für industrielle Produktivität (CiP), Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Prof. Abele, Prof. Metternich, Fachbereich Maschinenbau, TU Darmstadt	[37]
13	ETA-Fabrik, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Prof. Abele, Prof. Metternich, Fachbereich Maschinenbau, TU Darmstadt (beinhaltet die Lernfabrik für Energieproduktivität (LEP) in Zusammenarbeit mit McKinsey)	[38]
14	Modellfabrik, Fachbereiche Elektro- und Informationstechnik, Mathematik und Naturwissenschaften, Hochschule Darmstadt	[10]
15	Industrie 4.0 Lab Center, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Dortmund	[54]
16	Engineering Lab, Professur für Prozessleittechnik, Prof. Urbas, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden	[39]
17	Modellfabrik „Industrial Internet of Things (IIoT) Test Bed“, Prof. Reichelt, HTW Dresden	[33]
18	Fab21, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Hochschule Düsseldorf	[52]
19	HTST Miniplant, Hochschule Esslingen	[45]
20	Modellfabrik, Institut für Automatisierungstechnik, Prof. Rehkopf, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, TU Bergakademie Freiberg	[40]
21	Modellfabrik, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen	[25]
22	Modulare fertigungstechnische Anlage, Professur für Automatisierungstechnik, Prof. Fay, Institut für Automatisierungstechnik, Fakultät für Maschinenbau, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg	[26]
23	Modulare verfahrenstechnische Anlage, ebido	[27]
24	Produktionsstraße, Institut für Mechatronische Systeme, Prof. Ortmaier, Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover	[41]
25	SmartFactory KL, Prof. Zühlke, Kaiserslautern	[42]
26	Modellfabrik, Studiengang Maschinenbau, Duale Hochschule Baden-Württemberg - Karlsruhe	[28]

Nr.	Modellfabrik	Ref.
27	Living Lab smartAutomation, Forschungszentrum Informatik (FZI), Karlsruhe	[14]
28	WISARA Lab, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung sowie Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe	[30]
29	µPlant, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Prof. Kroll, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel	[3]
30	Hier! Energieeffizienzfabrik, Fachgebiet umweltgerechte Produkte und Prozesse, Prof. Hesselbach, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel	[46]
31	Modellfabrik, Institut für Produktion (IFP), Prof. Herbrüggen, Fakultät für Fahrzeugsysteme und Produktion, Technische Hochschule Köln	[43]
32	Modellfabrik, Automatisierungslabor, Rheinische Fachhochschule Köln	[44]
33	Smart FactoryOWL, Fraunhofer IOSB-INA und Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo	[29]
34	Experimentelle Fabrik Magdeburg (kurz ExFa), Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb (IAF), Prof. Kühnle, Prof. Schmicker, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg	[50]
35	„Living Lab“ - Virtuelle Fabrik, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Mosbach	[34]
36	Hybrides Prozessmodell, Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, Prof. Vogel-Heuser, Fakultät für Maschinenwesen, TU München	[13]
37	(Extended) Pick and Place Unit, ebido	[12]
38	Neutralisierungsanlage, ebido	[11]
39	Modellfabrik im Labor für Steuerungstechnik, Prof. Salewski, Fachbereich für Elektrotechnik und Informatik, Fachhochschule Münster	[31]
40	PS2 University/ATHENE, Siemens I&S, Nürnberg	[48]
41	AZI4.0 - Anwendungszentrum Industrie 4.0, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik insb. Prozesse und Systeme, Prof. Heine, Prof. Gronau, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Universität Potsdam	[47]
42	Lernfabrik, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart	[17]
43	Lernfabrik für advanced Industrial Engineering (aIE), Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Prof. Bauernhansl, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart	[15]
44	Applikationszentrum Industrie 4.0, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart in Kooperation mit dem Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Prof. Bauernhansl, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart	[53]
45	iCIM, Prof. Kretschmar, Fakultät für Maschinenwesen, Produktionstechnik/CAM, Hochschule Zittau	[49]

Personen, die sich für Modellfabriken als Testumgebungen interessieren.

1. EINSATZ VON MODELLFABRIKEN IN DEUTSCHLAND

Nach eigener Recherche in 2017 werden in Deutschland etwa 45 Modellfabriken an Universitäten, Hochschulen, Fraunhofer-Instituten oder in Firmen betrieben. Davon stehen 52 % in Universitäten, 29 % in Hochschulen und 19 % in anderen Einrichtungen. Bild 1 zeigt die Standorte der identifizierten Modellfabriken; Tabelle 1 listet Zuordnungen und Informationsquellen auf. Da die Betreiber selten über ihre

Modellfabriken publizieren, wurden unter anderem Webseiten, Zeitungsartikel wie auch Referenzlisten wichtiger Anbieter recherchiert und Betreiber zwecks Sachverhaltsklärung angeschrieben. Trotz intensiver Bemühungen ist leider davon auszugehen, dass einige Modellfabriken unerkannt blieben.

Zudem gibt es keine allgemein anerkannte Definition des Begriffs ‚Modellfabrik‘. Im Beitrag gilt als Kriterium eine ausreichende Größe (beispielsweise mindestens mehrere vernetzte Module bei vorkonfektionierten Festo-Didactic-Anlagen), industriennahe Umsetzung (keine Lego- oder Fischertechnik-Modelle), Hardwareaufbau (das heißt keine Fabrikensimulatoren

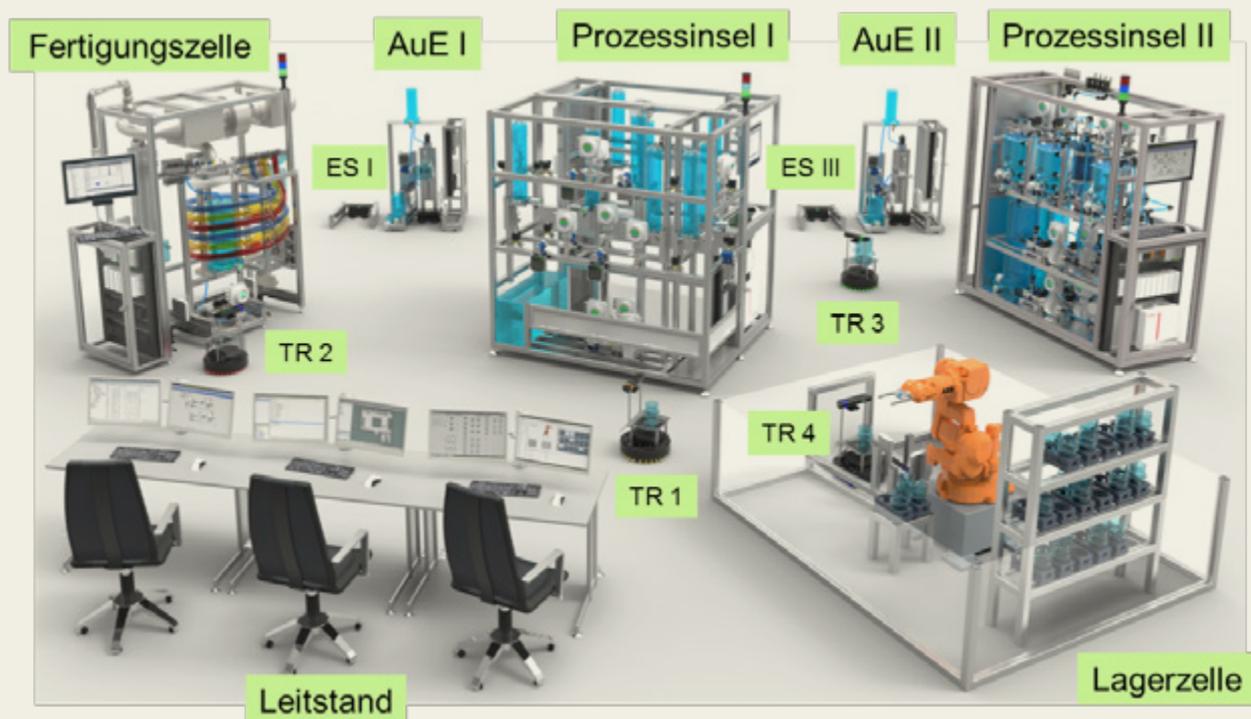


BILD 2: Übersicht der Modellfabrik μ Plant

oder Brett-/Planstudien). Die Anlagen gewerblicher Schulen wurden zwecks Fokussierung ausgespart, auch wenn diese durchaus eine signifikante Zahl vorkonfekzionierter Systeme betreiben. Zu beachten ist ferner, dass verschiedene weder klar definierte noch klar voneinander abgegrenzte Bezeichnungen üblich sind, wie: Modellfabrik, Lernfabrik, Konzeptfabrik, Experimentierfabrik, Effizienzfabrik oder Smart Factory – wobei Letztere den Fokus andeuten sollen.

Mit den recherchierten Anlagen werden sehr verschiedene Fragestellungen adressiert, wie Fabrikplanung, energieeffiziente Produktionstechniken oder automatisierungstechnische Konzepte. Entsprechend unterschiedlich sind sie konzipiert. Bei der Realisierung reicht die Spannweite von schlüsselfertigen Anlagen von Anbietern wie Festo Didactic bis zu Eigenbauten. Die Modellfabriken reichen von einem Satz von Bearbeitungszellen für Stückgüter über verfahrenstechnische Anlagen bis zu mehrere Prozesswelten einschließende Hybridfabriken. Sie unterscheiden sich ebenso in der Größe: Die Grundfläche reicht von einigen 10 m² bis um 2000 m². Automatisierungsorientierte Anlagen sind in der Regel vergleichsweise klein, aber komplex. Die größten Anlagen finden sich bei Fabrikplanern. Eine fragebogenbasierte Umfrage [9] sollte dazu dienen, ein detailliertes Bild zu zeichnen. Dazu wurde

unter anderem Information zu Produkten, Prozessen, Automatisierung, Typ und Größe der Anlagen abgefragt. Wegen unvollständiger Rückmeldungen wurde in Tabelle 1 allerdings auf Details verzichtet.

2. MODELLFABRIK μ PLANT

2.1 Ziel

Mit der Entscheidung zum Eigenbau entstand das Ziel, sich von anderen Modellfabriken abzuheben. Dazu sollte die Kreativität der eingebundenen Studierenden des Maschinenbaus, der Mechatronik und des Wirtschaftsingenieurwesens bestmöglich genutzt werden.

Bei der Konzipierung der Modellfabrik μ Plant wurde das Ziel verfolgt, einen ausgedehnten Teil der Wertschöpfungskette einer Produktionsanlage abzubilden. Die Modellfabrik sollte eine modulare, räumlich verteilte Produktionsanlage mit vernetzten Speichern, kontinuierlicher und ereignisdiskreter Dynamik, sowie fixen und mobilen Einrichtungen abbilden. Sie sollte schnell strukturell und parametrisch veränderbar und ebenso nur in Teilen betreibbar sein, um schnell auf neue Projekte und Anforderungen umgestellt werden zu können. Betriebsmodi sollten von kontinuierlich bis zur Charge mit Losgröße 1

reichen. μ Plant sollte es ermöglichen, gezielt reproduzierbare Experimente im bestimmungsgemäßen und im gestörten Betrieb durchzuführen. μ Plant sollte erlauben, verteilte Steuerungs-, Überwachungs- und Optimierungskonzepte zu testen sowie als Test- oder Evaluationsumgebung für Problemstellungen aus dem Bereich Smart Factory beziehungsweise Industrie 4.0 zu dienen.

2.2 Aufbau

Die Modellfabrik μ Plant besteht aus zwei Prozessinseln (PI I und PI II), einer Fertigungszelle (FZ), einer Lagerzelle (LZ), zwei Abfüll- und Entleerstationen (AuE I und AuE II), einem Transportrobotersystem (TR) mit vier mobilen autonomen Robotern sowie einem zentralen Leitstand (LS), siehe Bild 2. Durch die Abbildung verschiedener Produktionsschritte, der Intralogistik und der Lagerhaltung sowie einer simulierten Auslieferung werden wichtige Teile industrieller Wertschöpfungsketten abgedeckt. Durch die Verwendung von Transportrobotern statt einem „Backbone“ hebt sich μ Plant von den im Kontext der modularen Automation diskutierten Konzepten ab (Bild 2).

In PI I und PI II wird Flüssigkeit (gefärbtes Wasser) verarbeitet. Die PI II bildet ein typisches chemisches Prozessschema mit zwei Vorproduktsträngen inklusive Reaktoren und Wärmetauscherstrecken ab, die in einem Rührkesselreaktor zusammengeführt werden. Es gibt Materialrückführungen und Energieintegration. Das Wasser kann bis maximal 60°C erhitzt werden. Das lokale Automatisierungssystem (ABB Freelance) arbeitet klassisch mit Prozessflussgrafiken als Bedienbildern. Ein Vor-Ort-Bedienstand auf Basis eines IPC ist vorhanden.

Die PI I besteht aus einem vermaschten Tanknetzwerk, womit Produktionsnetzwerke und mehrstufige Mischprozesse nachgebildet werden können. Durch die Verwendung von steckbaren Schlauchverbindungen zwischen Tanks, Pumpen, Ventilen und Messgeräten kann das Produktionsschema ohne Werkzeug schnell geändert werden. Die Behälterhöhen lassen sich individuell verstellen, und so lässt sich ebenso ein gravitationsbedingter Materialfluss erreichen. Ein Vor-Ort-Bedienstand auf Basis eines IPC ist hier vorhanden.

Der Stoffaustausch mit PI I und PI II erfolgt über die mittels Fluidtrassen verbundenen AuE I und AuE II, wobei jede PI auf jede AuE zugreifen kann. Wegen der einfachen Funktionalität sind die AuE per Remote-IO mit dem Panel-PC der FZ verbunden. Auf ihm wird das jeweilige Steuerprogramm als eigenständige Task ausgeführt, sodass die AuE trotz physikalisch ausgelagerter Steuerung funktional unabhängig sind.

Mittels der FZ können in einer Abfüllstation dem Flüssigprodukt im Produktbehälter auf einem Transportroboter (TR) farbige Kugeln in auftragspezifischer

Kombination zugeführt werden. Andererseits kann ein Produktbehälter geleert, und die Kugeln können vom Flüssigprodukt getrennt, getrocknet und gelagert werden. Die FZ bildet einen Stückgutprozess ab, und die Sensorsignale sind überwiegend binär. Zudem wird eine Pyrometer-basierte, temperaturgeregelte Kugeltrocknung und eine RGB-Kamera-basierte Kugelseparation eingesetzt.

Der Materialtransport zwischen den Modulen erfolgt mittels mobiler Transportroboter mit Differenzialantrieb (Kobuki TurtleBot 2), die mit Mini-PC ausgerüstet sind, siehe Bild 7. Sie orientieren sich mittels Odometrie sowie Kinect-Infrarottiefenkameras und einer digitalen Karte in der Modellfabrik. Funktionen zur Wegplanung und Kollisionsvermeidung unterstützen die Zusammenarbeit mehrerer Roboter wie auch das Passieren von Robotern auf engstem Raum. Jede Dockingstation an den Modulen arbeitet mit Infrarot-Leitstrahlen und verfügt über ein RFID-R/W-System zum Auslesen/Beschreiben der Transponder auf den Bechern. Sie können als elektrische Ladestationen genutzt werden; es sind zudem drei weitere reine elektrische Ladestationen (ES) vorhanden.

Das Hochregallager in der LZ wird von einem Knickarmroboter (ABB IRB 140) mit industrieller Steuerung (ABB IRC 5) bedient. Seine Bewegungen wurden optimiert und passen beispielsweise die Beschleunigung des Tool Center-Points dem Füllzustand der Becher an. Das Lagerverwaltungssystem wurde selbst entwickelt. Es wird auf einem Standard-Windows-PC ausgeführt und kommuniziert direkt mit der Knickarmrobotersteuerung. Es gibt einen eigenen Bedienplatz.

Der zentrale Leitstand besteht aus einem Beobachtungs- und einem Bedienplatz mit Standard- und Großmonitoren, von dem aus die Gesamtanlage überwacht und Aufträge eingestellt werden können. Hinzu kommen mehrere Engineering-Arbeitsplätze mit Zugriff auf alle eingesetzten Automatisierungssysteme. Zudem ist ein Personen- und Maschinenschutzsystem (Not-Halt) umgesetzt. Weitere Information liefert [3].

2.3 Darstellbare Produktionsschemata

Die Modellfabrik wurde so konzipiert, dass sie als Ganzes und in Teilen betrieben werden kann. Beide Prozessinseln können einzeln betrieben werden. Ein Verbundbetrieb mit Materialtransport kann ferner mittels TR oder Fluidtrassen erfolgen. Das Flüssigprodukt lässt sich durch Hinzunahme der FZ um Feststoff erweitern, wobei dies mit oder ohne Einbeziehung der LZ erfolgen kann. Ebenso kann das Transportrobotersystem für intralogistische Aufgabenstellungen alleine oder zusammen mit der LZ betrieben werden. Das Prozessschema der PI I kann zudem schnell und einfach wegen der Verwendung von Schläuchen mit Schnellkupplungen umgestellt werden.

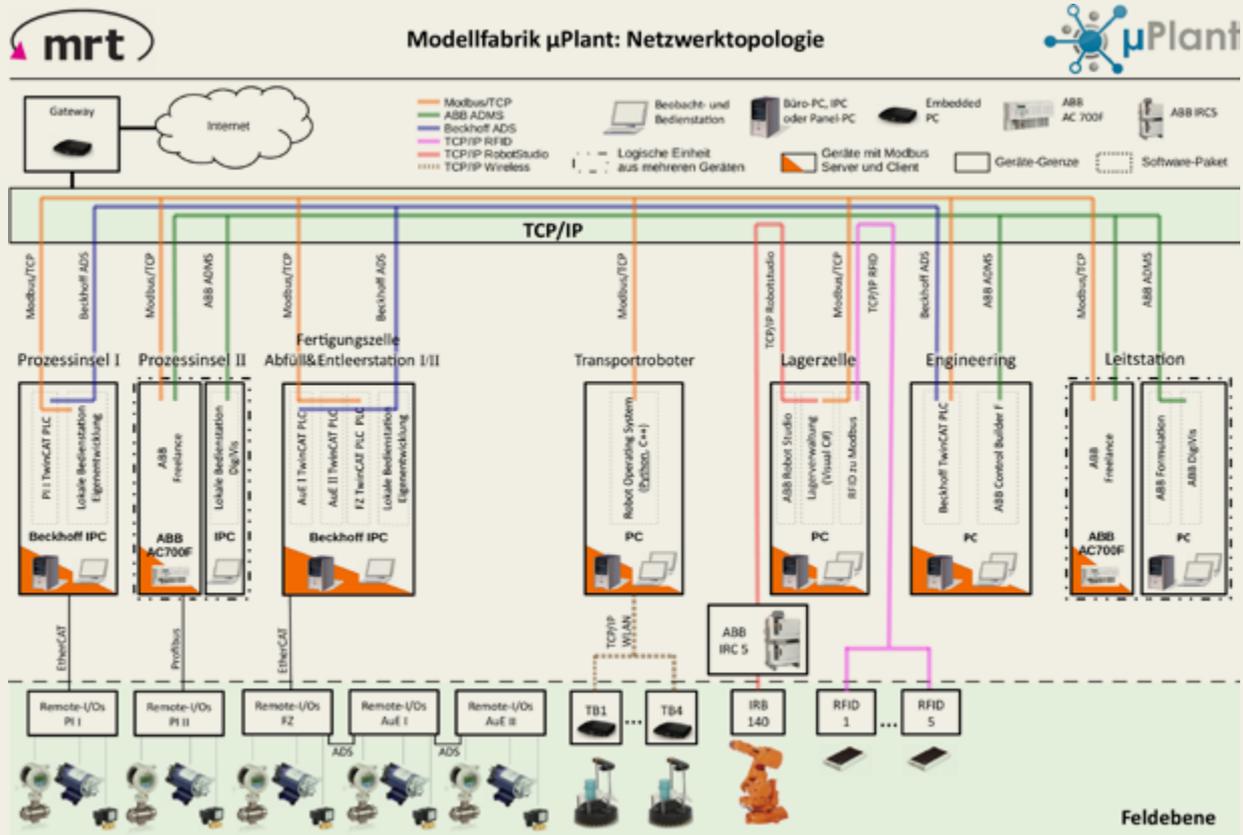


BILD 3: Kommunikation/Automatisierungsarchitektur

2.4 Automatisierungsarchitektur

In der heterogen automatisierten Modellfabrik galt es, kommerzielle, Open-Source- sowie selbst entwickelte Automatisierungs- und IT-Systeme zu integrieren. Die Herkunft aus verschiedenen Bereichen, wie Prozess- und Fertigungsautomatisierung, Industrierobotik, mobile Robotik und IT mit den auf die jeweiligen Domänen angepassten Lösungen, erschwerte die Integration. Zum einen waren Systeme mit unterschiedlichen externen Schnittstellen und Protokollen (Beckhoff ADS, ABB ADMS, Modbus/TCP, RFID via TCP/IP und RobotWare) zu integrieren, zum anderen Rechner mit verschiedenen Betriebssystemen (Linux/Ubuntu, Windows 7, ABB AC700 OS) sowie Hardwareplattformen (Controller, Industrie-, Panel-, Standard-, Mini-PC), siehe Bild 3.

In einer ersten Architektur [3] kommunizierten alle Steuerungen, basierend auf ihrer Schnittstelle und ihrem Protokoll, mit einem zentralen Kommunikationsserver, der auf Basis von Beckhoff ADS alle Protokolle konvertierte und die Daten allen Teilsystemen zur Verfügung stellte. Diese Lösung war einfach umsetzbar und erschien für die kleine Laboranlage als

ausreichend. Allerdings zeigte sich, dass beim Ausbau der Modellfabrik in Folge der steigenden Signalanzahl ein robuster Serverbetrieb zunehmend schwieriger zu gewährleisten war. Zudem mussten bei Problemen, die einen Neustart des Datenservers erforderten, teilweise die Steuerungen der Produktionsmodule ebenfalls neu gestartet werden.

Bei der zweiten Architektur fiel die Wahl auf eine verteilte Server/Client-Architektur. OPC Classic wurde bereits abgekündigt und nicht alle verwendeten Automatisierungssysteme unterstützen derzeit OPC UA. So fiel die Wahl beim Kommunikationsprotokoll auf das industriell weit verbreitete, für sehr viele Plattformen, inklusive aller in der Modellfabrik verwendeten, verfügbare und wenig Overhead aufweisende Modbus/TCP-Protokoll. Jedes ‚intelligente‘ Modul besitzt einen eigenen Modbus-Server. Dieser Aufbau unterstützt eine schnelle Änderung des Produktionsschemas. Zudem beeinträchtigt die Inaktivierung eines Moduls nicht den übrigen Betrieb, es sei denn, ein anderes Modul wartet beispielsweise auf eine Meldung von ihm, und neu aktivierte Module integrieren sich nahtlos in die Kommunikation.

TABELLE 2: Automatisierungstechnisches Mengengerüst der Module (*: Maximalausbau, T: Temperatur, P: Druck, L: Füllstand, F: Durchfluss, Pos: Position, G: Gas, PV: Proportionalventil, BV: Binärventil, LinAntr: Linearantrieb, HE: Wärmetauscher, IPC: Industrie-PC).

Modul	AO	AI	DO	DI	RFID	Controller	Regelkreise
PI I*	13 Pump 20 PV 1 P-G 2 F-G	17 F 10 L 1 P-G 2 F-G	10 BV 4 BV-G 4 Lampe		-	1 IPC Beckhoff	9 L 1 P-G 2 F-G
PI II	6 PV 8 Pumpe 1 Rührer 5 Heiz 1 HE	7 T 11 F 10 L 5 P	25 BV 4 Lampe	8 L	-	1 AC 700 Controller	4 T 4 L 1 V
AuE I	2 Pumpe	2	2 LinAntr 2 BV	4 Pos	1	Remote-IO	1 L
AuE II	2 Pumpe	2	2 LinAntr 2 BV 2 3-2WV	4 Pos	1	Remote-IO	1 L
FZ	1 Pumpe 2 Motor 1 T	1 F 1 T	11 Weichen 2 LinAntr 2 BV 4 Lampe	5 LichtS 3 RGB 4 Pos	2	1 Panel-PC	(1 T eingebettet)
LZ	-	-	1 Greifer 4 Lampe	2 Pos	1	1 IPC 1 Standard-PC	-
TR	-	-		-	-	4 Embedded 1 Standard-PC	(mehrere eingebettete)
S	65	69	81	30	5		23 (28)

Mittels Modbus/TCP kann ein Wert in etwa 1 ms versandt werden, mit Handshakes dauert die Kommunikation insgesamt zirka 3 ms. Da die lokalen Controller mit Zykluszeiten von ungefähr 100 ms arbeiten, spielen die kommunikationsbedingten Latenzen eine untergeordnete Rolle. Durch die geringe Latenz bei Modbus/TCP hängt die Unsicherheit hauptsächlich von der Zykluszeit der Steuerung ab. Während für verfahrenstechnische Messwerte Zykluszeiten von etwa 1 min üblich sind, ist eine Subsekundenauflösung für die ereignisdiskreten Variablen wichtig, um beispielsweise Kausalitäten korrekt in den aufgezeichneten Daten abzubilden.

Nachteilig am Modbus-Protokoll ist seine Low-Level-Implementierung, die wenig Komfort bietet und den Einsatz von Namensabbildungstabellen erforderlich

macht. In Letzteren wird jedem Modul ein spezifischer Adressbereich reserviert. Im Unterbereich eines jeden Moduls gibt es einen einheitlichen Bereich mit zirka 75 Adressen für die Kommunikation. Er wird modulspezifisch um einen Bereich für Sensor- und Aktorgrößen ergänzt. Der modulspezifische Bereich ist nur zur Datenaufzeichnung und Visualisierung gedacht. Deshalb brauchen die einzelnen Anlagen diesen nicht zu kennen, sie kommunizieren ausschließlich über die einheitlichen 75 Kommunikationsregister. Eine Veränderung der Variablen (Anzahl, Benennung, Reihenfolge, Datentyp) erkennt ROS mittels der Prüfsumme über die Variablendeklaration. Dadurch kann eine Veränderung der Deklaration erkannt und eine Fehlermeldung ausgegeben werden. Bild 3 skizziert die zweite Architektur; Tabelle 2 das automatisierungstechnische Mengengerüst.



BILD 4: Injektion von Luftblasen vor einem MID (mittels T-Stück links des Messgerätes)

2.5 Automatisierungsfunktionen

In der Modellfabrik wurde der Betrieb vollständig automatisiert, um den Aufwand für die Durchführung von Testkampagnen zu reduzieren. Es können Auftragsgrößen von der Losgröße 1, wie sie bei einer personalisierten Produktion auftritt, bis zu einer kontinuierlichen Fließproduktion bearbeitet werden, wie sie in petrochemischen Anlagen zu finden ist.

Am Leitstand werden hierzu die Produktionsaufträge in die Auftragsverwaltung (Eigenentwicklung) eingegeben. Diese werden automatisch in Teilaufträge zerlegt, an die Module verteilt und von diesen ausgeführt. Die benötigten Steuer- und Regelalgorithmen werden lokal in den Automatisierungssystemen der Module vorgehalten. Dazu gehören einfache Schrittketten und Regelungsaufgaben wie Wegplanung und Kollisionsvermeidung bei den Transportrobotern. Die Teilauftragserledigung wird rückgemeldet, sodass der Produktionsablauf fortschreiten kann. In der ersten Umsetzung [3] wurde eine Rezeptsteuerung (ABB Formulation) eingesetzt. In der zweiten wird eine Eigenentwicklung mit vereinfachter Rezeptverwaltung aber Auftragslistenfähigkeit genutzt.

Das Engineering erfolgt modulweise an Standard-PC in der Zentraleitwarte. Die Bedienbilder der zentralen Beobacht- und Bedienstation wurden eigenständig entworfen, um einen angemessenen Übersichtsgrad zu erreichen, siehe [7]. An den lokalen Bedienstationen sind detaillierte Bedienbilder umgesetzt, die auch im Leitstand aufgerufen werden können.

Die Überwachung der Auftragsausführung wird von der Auftragsverwaltung durchgeführt. Diese teilt ROS mit, welche Fahraufträge es gibt und wo ein Roboter benötigt wird. In regelmäßigen Abständen fragt die Auftragsverwaltung nach, ob ROS den Auftrag abgeschlossen hat. ROS wiederum teilt einem Roboter die Anfahrstation mit. Der Roboter meldet zurück, ob er die Position erreicht hat oder der Auftrag abgebrochen wurde. Gleichzeitig überwacht ROS die Bewegungen der Roboter selbst. Bei erfolgreicher Rückmeldung überprüft ROS noch einmal, ob die erreichte Position des Roboters mit der Anfahrstation übereinstimmt. Die Aufträge an die Module werden von der Auftragsverwaltung in gleicher Weise verteilt und durch Abfragen überprüft.

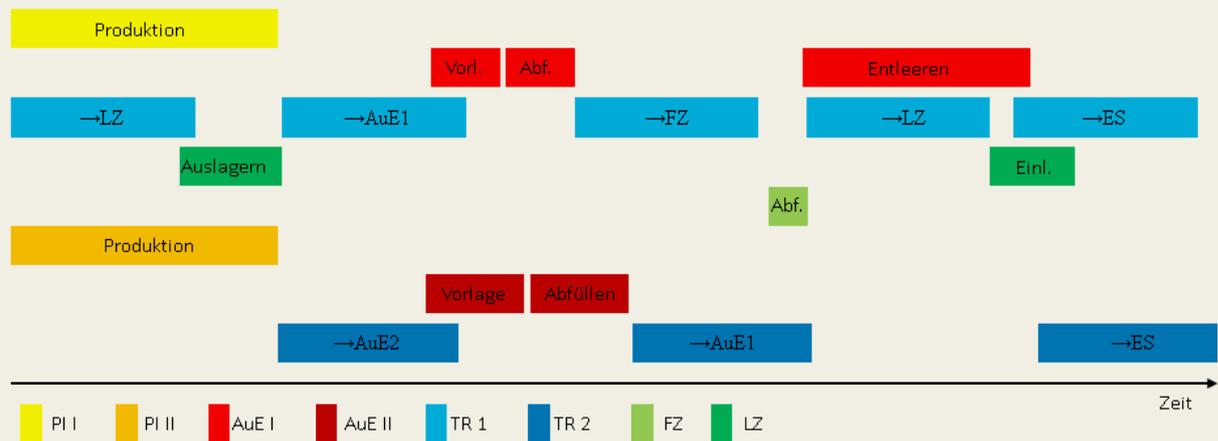


BILD 5: Zeitlicher Ablauf der Herstellung eines Bechers Limonade

2.6 Simulation von Störungen

Neben dem normalen Betrieb können verschiedene typische Instrumentierungs- und Prozessfehler rechnergesteuert im Ausprägungsgrad eingestellt und aktiviert werden. Umgesetzt wurden unter anderem Störungen des atmosphärischen Referenzdrucks bei der hydrostatischen Füllstandsmessung, Injektion von Luftblasen ins Messmedium bei magnetisch-induktiven Durchflussmessern (MID), Wirkungsgradverluste bei Kreiselpumpen, Leckagen und Kabelbrüche. Bild 4 zeigt ein Beispiel.

2.7 Betriebsszenario – Beispiel

Als exemplarisches Produktionsszenario wird ein Herstellungsprozess für individualisierte Erfrischungsgetränke beschrieben, bei dem alle Module und zwei TR eingesetzt werden. Dabei wird in der PI II Sirup hergestellt und in der PI I Wasser aufbereitet und mit dem Sirup vermischt. Der Sirup wird mittels der AuE II in große Becher abgefüllt, mit einem Transportroboter zur AuE I transportiert, dort geleert und zur PI I gepumpt. In der PI I wird der Sirup mit aufbereitetem Wasser im produktspezifischen Verhältnis zur Basislimonade gemischt. Diese wird zur AuE I gepumpt, in kleine Produktbehälter abgefüllt und mittels TR zur FZ transportiert. In dieser wird dem Produktbehälter eine auftragsspezifische Kombination von Aromakugeln zugeführt, was den Produktionsauftrag abschließt. Mittels TR wird das fertige Getränk zur LZ gebracht und bis zur Auslieferung eingelagert. Zwecks Erreichens einer Kreislaufproduktion wurde die Auslieferung und Konsumierung durch einen Transport mittels TR zur FZ ersetzt. Dort

wird der Produktbehälter entleert. Die Aromakugeln werden von der Flüssigkeit getrennt, getrocknet und farbgerecht magaziniert. Die Flüssigkeit wird gesammelt und zyklisch zur Aufbereitung zur PI I gepumpt. Bild 5 illustriert den zeitlichen Ablauf der Produktion eines Bechers Limonade, also einer Charge mit Losgröße 1. Ein Videoclip zum Beispielbetrieb findet sich bei YouTube, siehe [57].

2.8 Virtueller Produktionsverbund mit TU Dresden

Als Erweiterung des Betriebs einer einzelnen Modellfabrik wurde ein virtueller Verbundbetrieb der Modellfabriken am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik der Universität Kassel und an der Professur für Prozessleittechnik der TU Dresden realisiert. Dabei tauschen die beiden Leitsysteme Auftragsdaten und Messwerte über Modbus/TCP aus. Die Bediener haben zudem die Möglichkeit von Live-Video-Chats. Ferner konnte die Produktion in Kassel aus Dresden über mehrere Webcams überwacht werden. Bild 6 zeigt die für eine Fallstudie umgesetzte Kommunikationsarchitektur.

2.9 Einsatz in Forschung und Lehre

Die Modellfabrik μ Plant wurde großteils über Studienleistungen von Studierenden des Maschinenbaus, der Mechatronik und des Wirtschaftsingenieurwesens konzipiert und realisiert. Deshalb wurde großer Wert auf die maschinenbauliche Konstruktion gelegt, was gut in Bild 2 zu sehen ist. Bild 7 zeigt exemplarisch eine Abfüll- und Entleerstation mit mobilen Robotern. Im Bereich Elektro/Elektronik wurde auf Einfachheit geachtet und deshalb im Feld analoge Kommunikation

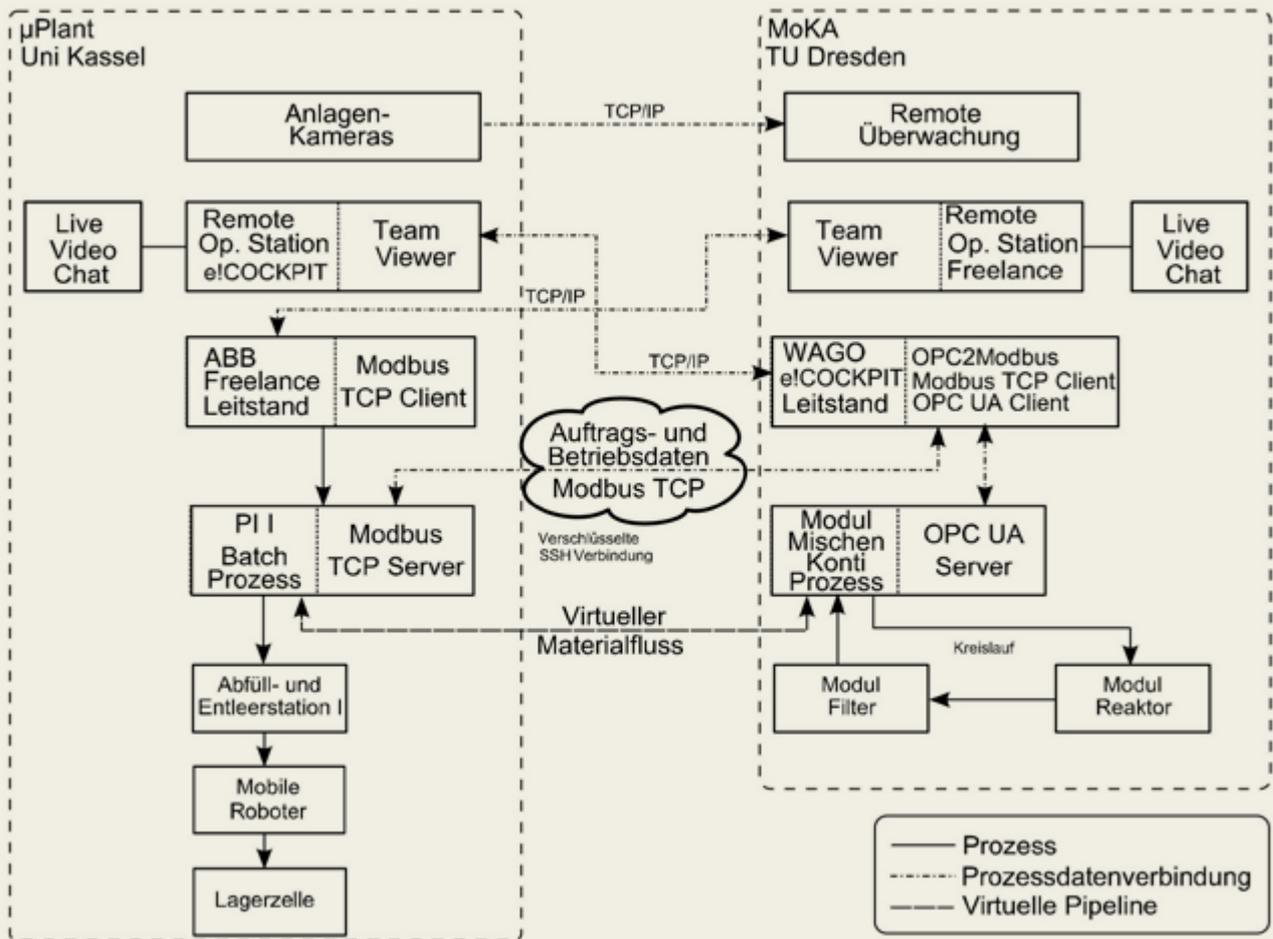


BILD 6: Architektur für virtuellen Verbundbetrieb der Modellfabriken Moka (Dresden) und µPlant (Kassel)

verwendet. Insgesamt flossen bis Mitte 2017 etwa 50 Studienleistungen in die Modellfabrik ein, zuzüglich etwa 12 000 bezahlter studentischer Arbeitsstunden. Hinzu kommen die Aufwände der beteiligten wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter. Wegen des kompletten Eigenbaus waren die Sachkosten mit etwa 300 000 EUR sehr gering im Vergleich zum Kauf einer schlüsselfertigen Anlage. Dafür dauerte der Aufbau von der Konzeptfindung Mitte 2011 bis zur offiziellen Inbetriebnahme der Gesamtanlage bis Anfang 2017. In der Lehre wird die Modellfabrik zudem in Praktika in den Bereichen Prozessautomation und Industrierobotik eingesetzt.

Der Einsatz in der Forschung begann direkt mit der Nutzung der zuerst fertiggestellten PI I als Testanlage für graphenbasierte Methoden zur Analyse großer verteilter Systeme [55]. Nach Fertigstellung der gesamten

Modellfabrik dient sie zunächst für Tests von Methoden zur Modellbildung und Anomalie-Detektion. Künftig soll die Nutzung auf weitere Aufgabenfelder, wie verteilte Steuerungs- und Regelungskonzepte, erweitert werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Modellfabriken werden in Deutschland in signifikanter Anzahl eingesetzt, um in Forschung und Lehre industriennahe Bedingungen abzubilden. Die Industrie-4.0-Debatte hat dabei Vorschub geleistet. Die selber entworfene und aufgebaute Modellfabrik µPlant umfasst Fließprozesse, Stückgutprozesse, Industrieroboter und mobile Roboter mit den jeweils zugehörigen Automatisierungssystemen. Diese Kombination, wie die große Anzahl der integrierten

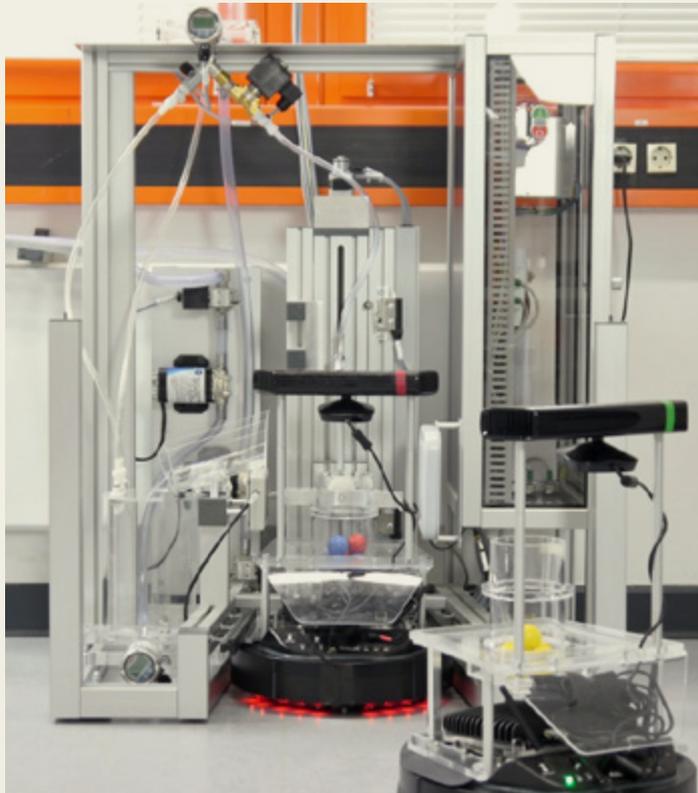


BILD 7: Abfüll- und Entleerstation AuE II mit RFID-R/W-Doppelantennensystem, Hub-Kippvorrichtung zum Entleeren und Vorlagebehälter zum Abfüllen von Bechern sowie mobile Transportroboter mit Becherhalterung, Mini-PC und Kinect-Infrarottiefenkamera.

DANKSAGUNGEN

Die Autoren danken ABB herzlich für die zur Verfügung gestellten Messgeräte und den Knickarmroboter. Weiterhin danken die Autoren dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Unterstützung des Ausbaus der beiden Prozessinseln (Förderkennzeichen 01IS14006D). Unserem Techniker Herrn Johann Pankratz gebührt großer Dank für seine engagierte Aufbauarbeit. Herrn Faek sei für die Mitarbeit bei der Modellfabrik-Recherche und der Professur für Prozessleittechnik für die Zusammenarbeit beim virtuellen Produktionsverbund gedankt. Ein Dankeschön geht auch an die anonymen Gutachter für die konstruktiven Verbesserungshinweise.

unterschiedlichen Automatisierungs- und IT-Systeme, hebt die Modellfabrik von anderen ab. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme Anfang 2017 werden dort Methoden zur Modellbildung und Anomaliedetektion im Rahmen des Projekts FEE [56] getestet. Zudem ist die Nutzung als I4.0-Testbed geplant.

MANUSKRIPTEINGANG
17.03.2017

Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

REFERENZEN

- [1] Bernshausen, J., Haller, A., Holm, T., Hoernicke, M., Obst, M., & Ladiges, J. (2016). Namur Modul Type Package – Definition. *atp edition*, 58(01-02), 72 - 81. doi:10.17560/atp.v58i01-02.554
- [2] Gall, J., Enning, M., & Abel, D. (2008). Modellfabrik im Zeichen der Automatisierungstechnik. In: *Tagungsband AUTOMATION*. VDI
- [3] Kroll, A., Dürrbaum, A., Arengas, D., Jäschke, B., Al Mawla, H. A. & Geiger, A. (2016). µPlant: Model factory for the automatization of networked, heterogeneous and flexibly changeable multi-product plants. In: *Tagungsband AUTOMATION*. VDI
- [4] NE 148: Anforderungen an die Automatisierungstechnik durch die Modularisierung verfahrenstechnischer Anlagen. 2013. NAMUR-Empfehlung
- [5] Obst, M., Holm, T., Urbas, L., Fay, A., Kreft, S., Hempten, U., & Albers, T. (2015). Beschreibung von Prozessmodulen. *atp edition*, 57(01-02), 48 - 59. doi:10.17560/atp.v57i01-02.473
- [6] Urbas, L., Bleuel, S., Jäger, T., Schmitz, S., Evertz, L., & Nekolla, T. (2012). Automatisierung von Prozessmodulen. *atp edition*, 54(01-02), 44-53. doi:10.17560/atp.v54i01-02.203
- [7] ZVEI – Fachverband Automation. (2015). Modulbasierte Produktion in der Prozessindustrie – Auswirkungen auf die Automation im Umfeld von Industrie 4.0. White Paper.
- [8] Buchholz, S. (2014). Flexible, Fast and Future Production Processes, Final Report. Project No: 228867.
- [9] Faek, I. (2016). Zum Einsatz automatisierungstechnisch orientierter Modellfabriken in Forschung und Lehre, Seminararbeit, Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Universität Kassel
- [10] <https://www.h-da.de/hochschule/videos/automatisierte-montagehalle-einweihung/>
- [11] <https://www.ais.mw.tum.de/forschung/demonstratoren/neutralisierungsanlage/>
- [12] <https://www.ais.mw.tum.de/forschung/demonstratoren/ppu/>
- [13] <https://www.ais.mw.tum.de/forschung/demonstratoren/hybrides-prozessmodell/>
- [14] <http://www.fzi.de/forschung/fzi-house-of-living-labs/fzi-living-lab-smartautomation/>
- [15] <http://lf.iff.uni-stuttgart.de/>
- [16] <http://www.lvp-bayern.de/>
- [17] <http://www.produktionsmanagement.iao.fraunhofer.de/de/modellfabrik.html>
- [18] <http://demofabrik-aachen.rwth-campus.com/>
- [19] <https://www.plt.rwth-aachen.de/cms/PLT/Forschung/Anlagen/~finw/M3P-AC/>
- [20] <http://www.festo-didactic.com/de-de/service/referenzen/deutschland/lernsysteme/cim-fms,lernfabrik/hochschule-fuer-technik-zittau.htm>
- [21] <http://www.festo-didactic.com/de-de/service/referenzen/deutschland/lernsysteme/cim-fms.lernfabrik/hochschule-fuer-technik-und-wirtschaft-des-saarlandes.htm>
- [22] <http://www.lps.ruhr-uni-bochum.de/lernfabrik/index.html>
- [23] <https://www.ei.rub.de/forschung/automatisierungstechnik/vera/>
- [24] <https://www.tu-braunschweig.de/iwf/die-lernfabrik>
- [25] <https://www.thm.de/ei/studium1/81-labore/161-steuerungstechnik-und-robotik>
- [26] http://www.hsu-hh.de/aut/index_GQhKcbYoFm72CXQo.html
- [27] http://www.hsu-hh.de/aut/index_Frn4Op6YJ08Q4sZV.html
- [28] <https://www.dhbw-karlsruhe.de/modellfabrik/>
- [29] <http://smartfactory-owl.de/index.php/de/smartfactory>
- [30] <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/4905/>
- [31] https://www.fh-muenster.de/fb2/labore_forschung/st/modellfabrik-startseite.php
- [32] <http://www.e3-fabrik.de/>
- [33] <https://www.htw-dresden.de/fakultaet-informatikmathematik/forschung/arbeitsgruppen/smart-production-systems/industrie-40-modellfabrik.html>
- [34] <http://forschung.mosbach.dhbw.de/laborinfrastruktur/elektrische-labore/living-lab-virtuelle-fabrik.html>
- [35] <https://www.unicat.tu-berlin.de/index.php?id=870>
- [36] <http://www.informatik.hs-bremen.de/LaborLT/projekt.htm>
- [37] <http://www.prozesslernfabrik.tu-darmstadt.de/>
- [38] <http://www.eta-fabrik.de/index.php/component/content/article/16-forschungsprojekte/laufende-forschungsprojekte/32-eta-fabrik-energieeffizienz-weitergedacht?Itemid=101>
- [39] <https://tu-dresden.de/ing/elektrotechnik/ifa/plt/die-professur/labore/engineering-labor>
- [40] <http://tu-freiberg.de/fakult4/aut/lehre/ausstattung>
- [41] <https://www.imes.uni-hannover.de/ausstattung.html>
- [42] <http://www.smartfactory.de/>
- [43] <https://www.f08.th-koeln.de/fakultaet/ifp/forschung/laboratorien/00671/index.html>
- [44] http://www.rfh-koeln.de/studium/ausstattung/ingenieurlabore/automatisierung/index_ger.html

- [45] <http://www.adiro.com/en/content/2017-06-18-HTST-Miniplant-Learning-System-MPS-PA.php>
- [46] <http://upp-kassel.de/labor/technische-gebaeudeausruestung/>
- [47] <http://industrie40-live.de/>
- [48] <http://www.festo-didactic.com/de-de/service/referenzen/deutschland/lernsysteme/prozesstechnik/ausbildungsanlage-fuer-siemens,ps2-university-athene.htm>
- [49] <https://f-m.hs zg.de/de/labore/produktionstechnikcam.html>
- [50] <http://www.iaf.ovgu.de/>
- [51] <https://www.tu-chemnitz.de/mb/FabrPlan/edf.php>
- [52] <https://www.fab21.de/>
- [53] <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/zusammenarbeit/industry-on-campus/applikationszentrum-industrie-4-0.html>
- [54] <https://www.industrie40.Impl.fraunhofer.de/de/labs/open-id-center.html>
- [55] Geiger, A.: Dynamische Analyse großer, verkoppelter Systeme mit Methoden der Komplexen Netzwerke am Beispiel des Inverse-Response-Verhaltens, Dissertation, Universität Kassel, 2015.
- [56] Atzmueller, M., Klöpfer, B., Mawla, H., Jäschke, B., Hollender, M., Graube, M., Arnu, D., Schmidt, A., Heinze, S., Schorer, L., Kroll, A., Stumme, G., & Urbas, L. (2016). Big data analytics for proactive industrial decision support. *atp edition*, 58(09), 62 - 74. doi:10.17560/atp.v58i09.580
- [57] Fachgebiet MRT Universität Kassel: Modellfabrik µPlant. Video, <https://www.youtube.com/channel/UCK9g2Esv01juJ4nLq1pwjzA>

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **ANDREAS KROLL** (geb. 1967) leitet das Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik an der Universität Kassel. Seine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen der nichtlinearen Systemidentifikation und Regelung, der Computational Intelligence, komplexer Systeme sowie bei Fernmessverfahren und Sensordatenfusion.

Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik, Institute for Systems Analytics and Control, Fachbereich Maschinenbau, Universität Kassel, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel,
Tel.: +49 (0) 561 804 32 48,
E-Mail: andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de

Dipl.-Ing. **AXEL DÜRRBAUM** (geb. 1961) ist Labor-Ingenieur im Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik an der Universität Kassel.

DAVID ARENGAS, M.Eng., (1982) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik an der Universität Kassel. Seine

Forschungsinteressen liegen in Such- und Selektionsverfahren, um aus Massendaten geeignete Daten für die Systemidentifikation zu extrahieren.

HASSAN AL MAWLA, M.Sc., (geb. 1986) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik an der Universität Kassel. Zu seinen Forschungsinteressen zählen die nichtlineare Systemidentifikation und die Anomaliedetektion in industriellen Prozessen.

LARS KISTNER, B.Sc., (geb. 1987) ist studentischer Mitarbeiter am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik an der Universität Kassel. Seine Interessen liegen im Bereich Robotik und Automation.

ALEXANDER REHMER, M.Sc., (geb. 1990) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik der Universität Kassel. Zu seinen Forschungsinteressen zählen Anomaliedetektion und Diagnose bei großen industriellen Prozessen.