

HAUPTBEITRÄGE:

- Roboterprogrammierung mithilfe von AutomationML
- Realisierung und Evaluation des Verwaltungsschalen-Metamodells
- Orchestration of modular plants
- Using domain knowledge to improve machine learning
- Industrielles Transfer-Lernen

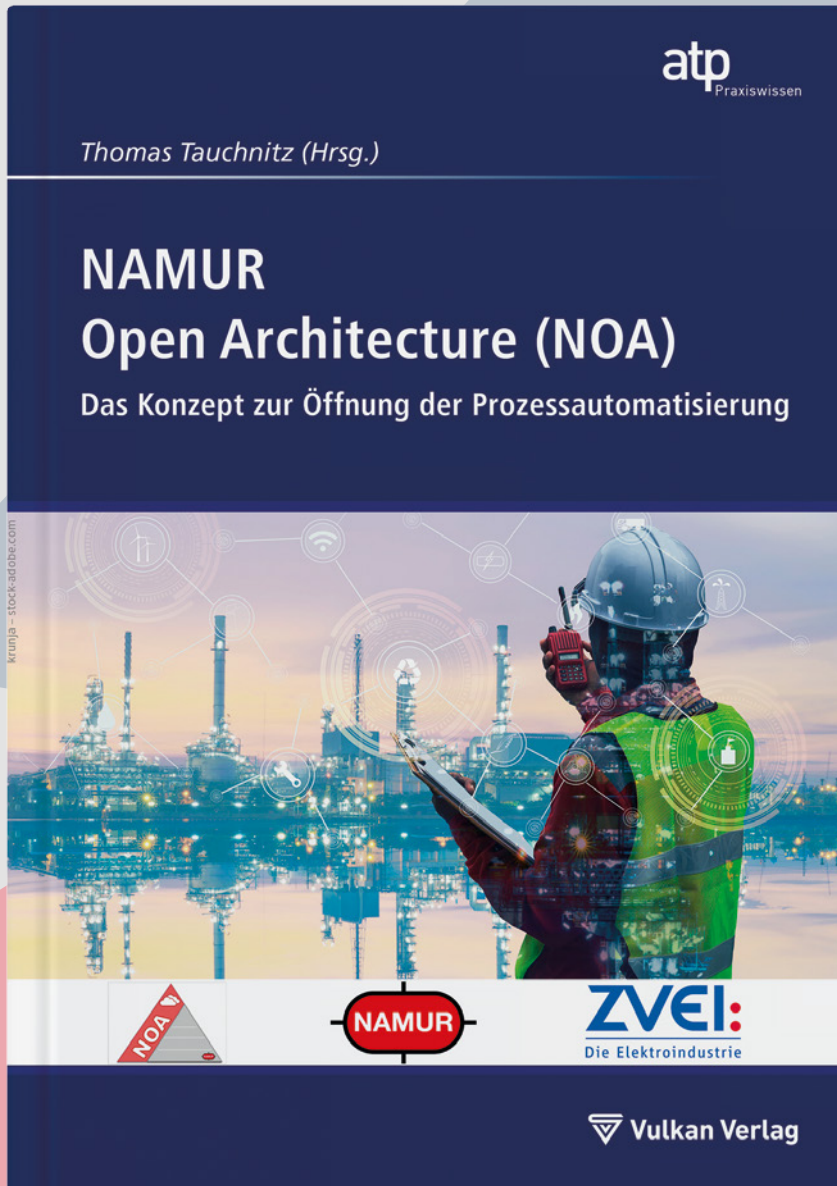
IM WANDEL LIEGT DIE KRAFT

Der Weg der Prozessindustrie zu mehr Effizienz



Das Konzept für die PROZESSAUTOMATISIERUNG

**BUCH
TIPP**



Ihr Mehrwert:

- NOA zielführend und gewinnbringend einsetzen
- Hoher Praxisbezug
- Mit allen NAMUR-Empfehlungen zum Thema NOA

Autor: Thomas Tauchnitz et al.

Angaben: 1. Auflage 2021 | Umfang: 270 Seiten

Broschur: ISBN: 978-3-8027-7451-6 | Artikel-Nr.: 74516

Preis: 79 €

Hier direkt bestellen:
www.vulkan-shop.de

 **Vulkan Verlag**

Endlich wieder ACHEMA!

Die ACHEMA 2022 steht wieder vor der Tür und es ist mir eine Ehre als Mitglied des Vorstandes der DECHEMA e.V. das Editorial für diese besondere Ausgabe des atp magazins zu schreiben.

Die ACHEMA gilt als die internationale Leitmesse für die Prozessindustrie und ist das Branchentreffen des Jahres. Wir werden vom 22. bis 26. August in den Hallen der Messe Frankfurt sicherlich mehr darüber erfahren, ob und wie weit die Prozessindustrie die Digitalisierung als Chance für Safety, Security & Sustainability begreift. Themen wie der *Advanced Physical Layer (APL)*, das *Module Type Package (MTP)* und das *Industrial Internet of Things (IIoT)*, aber auch die zukünftige Interaktion zwischen Mensch und Maschine und generell cyber-physische Systemwelten werden hoffentlich von viele Ausstellern aufgegriffen, um Prozesse effizienter und wettbewerbsfähiger zu gestalten.

Denn eins ist klar: Um die enormen Herausforderungen der Zukunft zu lösen braucht die Prozessindustrie eine schnelle Bereitstellung hochwertiger digitaler Technik.

Darüber hinaus hoffe ich, dass die ACHEMA dazu beiträgt, mehr technische Kompetenz in die allgemeine politische Diskussion zu bringen. Unsere Wirtschaft ist durch die Energiewende im radikalen Umbruch. Nachhaltigkeit in der industriellen Produktion und der globalen Mobilität wird es ohne Wasserstoff nicht geben. Der Übergang zu H₂ muss uns schnellstens gelingen und bietet fast grenzenlose Chancen für die deutsche Innovations- und Schaffenskraft. Zumal wir bereits mehr als 30 Jahre

substanzielle Erfahrung mit Wasserstoff gesammelt haben. Darauf gilt es endlich aufzubauen. Dazu muss nicht nur die Politik schnell und fachkundig entscheiden, sondern müssen auch Normen und Standards kurzfristig gesetzt bzw. nachgezogen werden.

Das atp magazin hat in dieser Ausgabe dementsprechend viele wichtige Zukunftsthemen für die Prozessindustrie und Verfahrenstechnik aufgegriffen. So werden sie von unseren Autorinnen und Autoren erfahren, welchen Einfluss Künstliche Intelligenz auf die Robotik hat, welche neuen Kollaborationsformen zwischen Mensch und Maschine daraus entstehen, welche nutzerorientierten Entwicklungswerkzeuge den Entstehungsprozess beschleunigen. Und nicht zuletzt, welche Rolle der Mensch mit all seinen haptischen, kognitiven und kreativen Fähigkeiten in den Anlagen der Zukunft spielen wird.

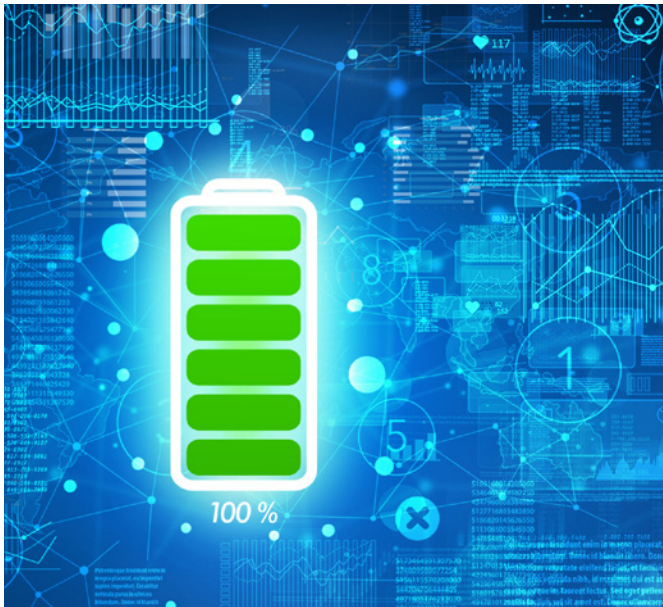
Im Jahr 1920 machte ein kluger Mitarbeiter von SAMSON folgende, für heute immer noch gültige Aussage: „Energien müssen gelenkt werden, wenn sie sinnvoll wirken sollen.“

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, daher eine inspirierende Lektüre und freue mich, Sie auf der ACHEMA endlich wieder persönlich zu sehen!

Dr. Andreas Widl

CEO der SAMSON AG &
Vorstandsmitglied der DECHEMA e.V.





Effizienz & Flexibilität

Nicht nur vor dem Hintergrund der steigenden Energiepreise und drohender Rohstoffengpässe ist eine anpassungsfähige und effiziente Produktion von Vorteil. Sie hilft auch unserem Klima. Lesen Sie, worauf es dabei besonders ankommt.

14 | 22 | 42 | 42 | 96

Hauptbeiträge

Wissenschaftlich hochwertig und unbedingt lesenswert: Die begutachteten Hauptbeiträge zu den Themen: Verwaltungsschale, AutomationML, Software Development, Python, Machine Learning, Neural Networks, Modular Automation, Module Type Package, Digital Twin

52 | 60 | 68 | 78 | 86



Digital Twin und Verwaltungsschale

Ein wesentlicher Hebel für eine wandlungsfähige und resiliente Produktion ist der Digital Twin und besonders die Asset Administration Shell (AAS). Erfahren Sie, was mithilfe der Technologie heute schon möglich ist.

25 | 28 | 32 | 36



INTERVIEWS

- 14 „Flexibilität schafft Systemeffizienz“**
Alexander Sauer
- 28 „Die Verwaltungsschale ist der Kern des Digital Twin“**
Christian Mosch, Meik Billmann
- 42 „Die Zeit der Roboter-Gärten ist vorbei“**
Jörg Rommelfanger

HAUPTBEITRÄGE

- 52 Roboterprogrammierung mithilfe von AutomationML**
Malte Jakschik, Alfred Hypki, Bernd Kuhlenkötter
- 60 Realisierung und Evaluation des Verwaltungsschalen-Metamodells**
Torben Miny, Michael Thies, Sebastian Heppner, Igor Garmaev, Leon Möller, Tobias Kleinert
- 68 Orchestration of modular plants**
Anselm Klose, Julius Lorenz, Lukas Bittorf, Katharina Stark, Mario Hoernicke, Andreas Stutz, Hannes Weinhold, Niclas Krink, Wolfgang Welscher, Manfred Eckert, Stefan Unland, Anna Menschner, Polyana da Silva Santos, Norbert Kockman, Leon Urbas
- 78 Using domain knowledge to improve machine learning**
Tim Rensmeyer, Samim Multaheb, Julian Putzke, Bernd Zimmering, Oliver Niggemann
- 86 Industrielles Transfer-Lernen**
Benjamin Maschler, Hannes Vietz, Hasan Tercan, Christian Bitter, Tobias Meisen, Michael Weyrich

TECHNOLOGIE + TRENDS

- 22 Digital Twin: Mehr Flexibilität für Produktionsprozesse**
- 25 Digitale Zwillinge und Agenten für die Produktion von morgen**
- 32 Verwaltungsschale: Production-as-a-Service mit der VWS**
- 36 Verwaltungsschale: Einsatz in wandelbaren Produktionsanlagen**
- 46 Automatisierte Qualitätskontrolle: Retrofit für Bestandsanlagen**

PRODUKTE + PROJEKTE

- 40 MTPlatform: Das Amazon für die modulare Automation**

STANDARDS

- 1 Editorial**
- 6 Aktuell**
- 18 Wussten Sie schon ...**
- 94 Inserentenverzeichnis + Impressum**
- 95 Automation Guide**
- 96 Zu guter Letzt**

MEORGA

MSR-Spezialmessen

Prozess- u. Fabrikautomation

Fachmesse für
Prozess- und Fabrikautomation

- Messtechnik
- Steuerungstechnik
- Regeltechnik
- Automatisierungstechnik
- Prozessleitsysteme

+ 36 begleitende Fachvorträge

Der Eintritt zur Messe
und die Teilnahme an den
Fachvorträgen ist für die
Besucher kostenlos.

Wirtschaftsregion Südwest

Ludwigshafen

14.09.2022

8.00 bis 16.00 Uhr

Friedrich-Ebert-Halle
Erzbergerstr. 89
67063 Ludwigshafen



BESUCHER- REGISTRIERUNG

erforderlich für Einlass-Code



Meorga Messen 2022:	Ludwigshafen Bochum	14.09.2022 26.10.2022
---------------------------	------------------------	--------------------------

www.meorga.de

MEORGA GmbH - Sportplatzstr. 27 - 66809 Nalbach
Telefon 06838 8960035 - info@meorga.de

#effizienz

[Gunther Kegel](#)

Pepperl+Fuchs SE, ZVEI

„Wir müssen unsere erneuerbaren Energien deutlich effizienter verwenden. Der Weg zur Energieeffizienz ist die konsequente Elektrifizierung und Digitalisierung aller Wirtschaftssektoren – die All Electric Society!“

[Mehr auf Seite 96](#)

#digitaltwin

[Chris Urban, Alexander Belyaev, Christian Diedrich](#)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

„Wir bauen ein erstes VWS-basiertes lauffähiges offenes digitales I4.0-Ökosystem auf und können die Potenziale der vernetzten dezentralen Produktion erkunden sowie daraus ergebende Chancen und neue Geschäftsmodelle ableiten.“

[Mehr auf Seite 32](#)

#digitaltwin

[Marius Krüger, Birgit Vogel-Heuser, Kathrin Land, Gunnar Grim, Josef Lorenzer, Markus Freiberg, Matthias Franzreb, Sonja Berensmeier](#)

TU München, Andritz Separations GmbH, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

„Eine konsequente Prozesstransformation hin zu cyber-physischen Produktionsprozessen mit höherem Automatisierungslevel ist unausweichlich, um eine stringente Optimierung und Flexibilisierung der Produktion zu erreichen.“

[Mehr auf Seite 22](#)

#robotik

[Jörg Rommelfanger](#)

ABB Robotics Deutschland

„Roboter-Gärten sind überholt. Auch Zäune und Rolltore werden obsolet. Wir sehen dramatische Veränderungen hin zu kleineren, anpassungsfähigeren Systemen und Prozessen.“

[Mehr auf Seite 42](#)



#effizienz

Alexander Sauer

Universität Stuttgart & Fraunhofer IPA

„Effizienz kann Emissionen vermeiden, aber eine gewisse Ineffizienz kann woanders zu einer CO₂-Einsparung führen. Wer bewusst nicht alles bis zum Äußersten optimiert und effizient gestaltet, bewahrt sich eine gewisse Flexibilität. Effizienz im System entsteht auch durch Flexibilität.“

Mehr auf Seite 14

#digitaltwin

Christian Mosch & Meik Billmann

Industrial Digital Twin Association (IDTA)

„Die Interoperabilität von Digital Twins steht im Fokus der IDTA, weshalb es im Kernmodell einen Standard braucht. Und dieser Kernstandard ist die AAS. Erst sie macht Applikationen des Digital Twin in der Praxis möglich. Deswegen ist die IDTA auch so stark auf die Standardisierung der AAS und ihrer Teilmodelle fokussiert. Im Zusammenspiel gelingt dadurch eine medienbruchfreie digitale Dokumentation der gesamten Wertschöpfungskette.“

Mehr auf Seite 28

#effizienz

**Bastian Schulte, Holger Flatt, Reinhold Schulte,
Chris Kleinhans**

Fraunhofer IOSB-INA; IWN GmbH

„Eine automatisierte Maßkontrolle während des Fertigungsprozesses verspricht nicht nur ein erhebliches Einsparpotenzial in den Bereichen Energie und Ressourcen, sondern auch eine Qualitäts- und Produktionssteigerung.“

Mehr auf Seite 46

#digitaltwin

**Eric Bayrhammer, Birgit Vogel-
Heuser, Haris Avgoustinos, Robin
Thrift, Felix Ocker**

TU München, EXOP21XX GmbH

„Ein Ökosystem, das Proaktive Digitale Zwillinge unterstützt, ermöglicht hochflexible Wertschöpfungsnetzwerke.“

Mehr auf Seite 25

NAMUR-Hauptsitzung 2022: Sustainable Lifecycle Risk Management



Nach zwei Jahren „sicherheitsrelevanter“ Pause findet am 10. und 11. November 2022 endlich wieder eine NAMUR-Hauptsitzung „live und in Farbe“ statt. Was die vielen Maßnahmen zum gesundheitlichen Schutz der Bevölkerung in den letzten beiden Jahren waren, das sind in der Industrie Sicherheitseinrichtungen an technischen Anlagen. Die Anzahl dieser Sicherheitseinrichtungen in der Prozessindustrie haben in der letzten Dekade deutlich zugenommen, ebenso die zu erfüllenden Anforderungen sowie deren technische und organisatorische Komplexität. Dies hat die NAMUR dazu bewogen, das Thema Funktionale Sicherheit für die diesjährige Hauptsitzung erneut als Thema auszuwählen. Sponsor der NAMUR-Hauptsitzung 2022 ist HIMA.

Risikomanagement muss den gesamten Life Cycle einschließen

Funktionale Sicherheit muss dabei laut der Interessengemeinschaft neu gedacht werden. Die alleinige Betrachtung von Hard- und Software reicht nicht mehr aus, ein ganzheitlicher Ansatz ist notwendig. Risikomanagement muss noch stärker über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage etabliert werden. Dabei ist das Augenmerk auf Lösungen zu legen, die trotz des rasanten technologischen Wandels, einer komplexeren Arbeitswelt und der demografischen Veränderung Zukunftssicherheit bieten.

„Anlässlich der diesjährigen NAMUR-Hauptsitzung werden wir aufzeigen, wie wir Anlagenbetreiber bei der Digitalisierung der Funktionalen Sicherheit unterstützen können. Dabei betrachten wir Safety- und Security-Aspekte ganzheitlich und präsentieren Lösungen, die auf Betreiberbedürfnisse wie

Compliance, Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zugeschnitten sind“, erläutert Jörg de la Motte, CEO von HIMA.

Komplexität funktionaler Sicherheit handhabbar machen

HIMA wird laut einer Pressemitteilung im Eröffnungsvortrag der NAMUR-Hauptsitzung 2022 zeigen, wie Komplexität im Bereich der Funktionalen Sicherheit für Anlagenbetreiber leichter handhabbar wird und zugehörige Abläufe mit Mehrwert digitalisiert werden können. Das erlaubt Anlagenbetreibern, diese Komplexität zu erkennen, zu reduzieren und zu beherrschen.

Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung der digitalisierten Funktionalen Sicherheit kommt der Automation Security eine zentrale Bedeutung zu. Gemeinsamkeiten von Safety und Security und Unterschiede zwischen ihnen machen eine geänderte Betrachtung der Sicherheitsaspekte notwendig, da Digitalisierung nicht zu einer Erhöhung betrieblicher Risiken führen darf. Ein von den IEC-Grundsätzen zur Koordination von Safety und Security abgeleiteter Ansatz des Security Environments dient hierbei als Grundlage für das Konzept „Security Environment for Functional Safety“, das HIMA präsentieren wird.

Der Donnerstagvormittag wird vervollständigt durch drei Beiträge aus der NAMUR, die sich mit der Nutzung von Ethernet-APL in sicherheitsrelevanten Applikationen, der Verzahnung von Safety und Security sowie dem Einfluss von Funktionaler Sicherheit in verschiedenen Anwendungen und Lebenszyklusphasen aus Sicht von Anlagenbetreibern in der Prozessindustrie befassen werden.

MTP: Merck will Modularisierung weltweit in Laboren einsetzen

In den Forschungs- und Entwicklungs-Laboren des Electronics Technology Center in Darmstadt hat Merck bereits eine MTP-Automatisierungssoftware von COPA-DATA eingeführt. Diese wird nun auch weltweit in vielen weiteren Laboren implementiert. Durch die Nutzung des Module Type Package (MTP) sollen ein effizienteres Zusammenspiel von Produktion sowie Forschung und Entwicklung erzielt und die Zeit bis zur Markteinführung neuer Produkte um bis zu 50 % beschleunigt werden.

Bereits 2021 haben Merck und Siemens ein Projekt zur Modularisierung der Produktionsanlagen für die Herstellung von innovativen Materialien und Produkten in den drei Unternehmensbereichen Healthcare, Life Science und Electronics gestartet.

Automatisierung im Laborumfeld

In der Produktion sind Begriffe wie „Industrie 4.0“, „Smart Factory“ oder „Industrial Internet of Things“ bereits bewährt im Einsatz. Im Gegensatz zur Produktion ist der Alltag im

forschenden Labor aber vor allem davon geprägt, dass Anlagen regelmäßig umkonfiguriert und Arbeitsschritte laufend geändert werden müssen. Dadurch erschien das Labor bislang nur wenig Automatisierungspotenzial zu besitzen.

MTP-Lösungsansatz

Um dieses Problem zu lösen, setzt Merck auf das MTP (Module Type Package). Mit diesem Lösungsansatz können alle Anlagen in einem zentralen Leitsystem miteinander kommunizieren, unabhängig von der im Einsatz befindlichen Hard- und Softwarelandschaft. Einzelne Arbeitsschritte werden in abgeschlossenen Modulen gespeichert und lassen sich ohne Programmierkenntnisse von den Forschenden selbst mit wenigen Klicks zu neuen Anwendungen und Prozessen kombinieren.

Ein weiterer Vorteil der MTP-Module ist deren nahtlose Überführung aus dem Labor in die Produktion. Rezepte, die im Labor entstehen, können somit zeitnah in die Massenproduktion gehen, ohne manuell und aufwendig neu konfiguriert werden zu müssen.

VDI/VDE-GMA:

Nachhaltigkeit geht nicht ohne Automatisierung

Nachhaltigkeit und ein schonender Umgang mit Ressourcen bewegt die Prozessindustrie seit jeher. Angesichts der Erderwärmung und Rettung unseres Planeten erhalten Ingenieurinnen und Ingenieure in der Mess- und Automatisierungstechnik eine enorm tragende Bedeutung, wie die VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) in einer Pressemitteilung erklärte.

Automatisierung ist für Nachhaltigkeit unerlässlich

Vertrauenswürdige KI zur Überwachung der Klimaveränderung, Datenräume zur Nachverfolgung und digitale Technologien zur Vernetzung von Wertschöpfungsketten: Automatisierungstechnik ist unerlässlich, „um Nachhaltigkeit auf die Spur zu kommen“, wie Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Michael Weyrich auf der Pressekonferenz des VDI auf dem Kongress „AUTOMATION“ in Baden-Baden sagte. Der Vorsitzende der VDI/VDE Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (VDI-GMA) gab an, dass die Kreativität und das Engagement der Ingenieurinnen

und Ingenieure gefragt sind, um den Herausforderungen der Nachhaltigkeit in der Industrie zu begegnen. „Insbesondere junge Menschen müssen als Fachkräfte gewonnen werden“, bekräftigte Weyrich.

Grüner Wasserstoff als wichtige Chance, nicht nur für die Automatisierung

Auf die Wichtigkeit des Einsatzes von Wasserstoff wies auf der Pressekonferenz Dr.-Ing. (PhD USA) Christine Maul hin. „Die CO₂-neutrale Produktion funktioniert allerdings nur, wenn die grünen Technologien auch zeitnah entwickelt werden – insbesondere ‚grüner‘ Wasserstoff muss verfügbar sein“, erläuterte die Head of Advanced Process Control bei Covestro Deutschland AG. „In der chemischen Produktion haben wir – quasi schon immer – die bestehenden Möglichkeiten genutzt, Produktionsprozesse effizient zu führen. Im Sinne der Nachhaltigkeit bedeutet dies, mit minimalem Energieverbrauch und mit maximaler Ausbeute zu produzieren“, sagte Christine Maul.

SPS: Ausstellerbeirat mit neuem Vorsitz

Veränderungen im Ausstellerbeirat der SPS: Christian Wolf, Geschäftsführer der Hans Turck GmbH & Co. KG, übergibt den Vorsitz an Steffen Winkler, CSO der Business Unit Automation der Bosch Rexroth AG. Wolf hatte dem Gremium bereits seit 2017 vorgestanden.

Der Ausstellerbeirat berät die Mesago Messe Frankfurt GmbH, Organisator der Automatisierungsmesse, im Hinblick auf die Strategie und konzeptionelle Weiterentwicklung der SPS sowie deren operative Umsetzung.

Steffen Winkler übernimmt den Vorsitz

„Ich bin jetzt seit 26 Jahren Besucher, Aussteller und Fan der SPS – der wichtigsten Automatisierungsmesse weltweit. Es ist mir deshalb eine große Ehre, aber auch Verpflichtung, den Staffelfstab von Christian Wolf zu übernehmen“, so Steffen Winkler zu seiner neuen Funktion als Vorsitzender. Steffen Winkler ist CSO der Business Unit Automation der Bosch Rexroth AG. Nach dem Studium der Elektrotechnik arbeitete er zunächst als Entwicklungsingenieur, Produktmanager und später als Leiter des Produktmanagements, bevor er in den Vertrieb wechselte.

Discover our
HydroGene.

Mit Sensorik und Explosions-
schutz von Pepperl+Fuchs.

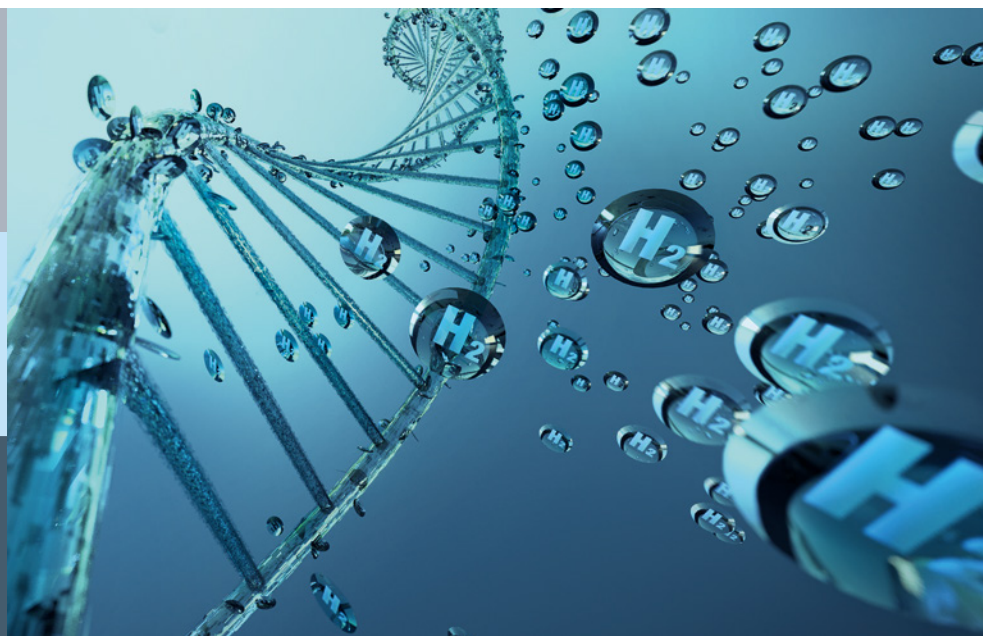
pepperl-fuchs.com/br-hydrogen

ACHEMA
2022

Halle 11.1 Stand A41
22.-26.August2022



Wasserstoff für die Zukunft von
Energie, Industrie und Mobilität.



AUTOMATION 2022: Nachhaltigkeit, KI und Verwaltungsschale

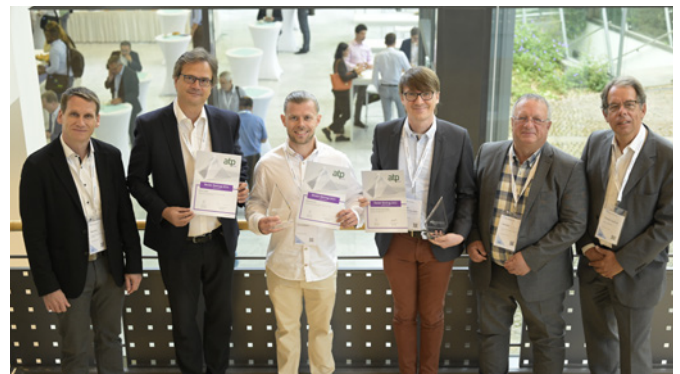
Erstmals seit 2019 konnte sich die deutschsprachige Automatisierungs-Community am 28. und 29. Juni wieder physisch in Baden-Baden zum Kongress AUTOMATION der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) treffen. In 2020 und 2021 hatte der Kongress aufgrund der Corona-Pandemie als Online-Veranstaltung stattgefunden.

Unter dem Motto „Automation creates Sustainability“ diskutierten rund 400 Teilnehmerinnen und Teilnehmer in insgesamt sieben verschiedenen Vortragsreihen, wie eine Verbindung zwischen wirtschaftlichem Erfolg und Nachhaltigkeit geschaffen werden kann. Parallel zum Kongress fand außerdem die 5. Fachkonferenz „Gebäudeautomation – intelligent und nachhaltig“ statt.

Nachhaltigkeit: Automatisierung ist entscheidend

Wie wichtig die Automation für die Klimaziele Deutschlands ist, stellte Anna Christmann, MdB, in ihrer Keynote „Quo vadis Nachhaltigkeit“ vor. Die Koordinatorin der Bundesregierung für die Deutsche Luft- und Raumfahrt und Beauftragte für die Digitale Wirtschaft und Start-ups machte deutlich, dass die AUTOMATION für die Zukunft der Nachhaltigkeit und die Zukunftsfähigkeit Deutschlands von enormer Bedeutung sei. In ihrem Vortrag stellt die Grünen-Politikerin vor, wie die Bundesregierung in den kommenden Jahren den Weg zur Klimaneutralität beschreiten möchte. Neben einer starken Start-up-Förderung und dem Aufbau von KI-Kompetenzzentren soll es mit der Deutschen Agentur für Transfer und Innovation (DATI) gelingen, theoretische Entwicklungen besser in die Praxis zu überführen. Ein wichtiger Faktor, den es zu außerdem adressieren gelte, sei der Fachkräftemangel.

Mehr Begeisterung für technische Studiengänge zu erzeugen, ist auch eine zentrale Aufgabe der VDI/VDE-GMA, wie der neue Vorsitzende Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich (Universität Stuttgart) in seinen Eröffnungsworten klarstellte. Es müsse deutlicher werden, dass Ingenieurinnen und Ingenieure entscheidend für die Rettung der Welt seien. Konzepte wie die Kreislaufwirtschaft würden ohne Automatisierung nicht Realität. Darüber hinaus gelte es, die Abbrecherquoten in den MINT-Studiengängen zu reduzieren, ohne an der Qualität der



Stellvertretend für Ihre Autorenteams nahmen Rainer Drath (2.v.l.), Andreas Berlet (3.v.l.), Thorben Wintermeyer-Kallen (3.v.r.) und Dirk Abel (2.v.r.) den atp award 2021 entgegen.

Ausbildung zu schrauben. Eine Mentalität des Ausbiebens sei der falsche Weg, machte der GMA-Vorsitzende deutlich.

Zentrale Themen: Nachhaltigkeit, KI und Verwaltungsschale

Dem Motto des Kongresses folgend zeigte das Vortragsprogramm der AUTOMATION eindrucksvoll, wie die gesamte Bandbreite der Automatisierungstechnik zur Nachhaltigkeit beitragen kann. Besonders im Fokus standen der Digitale Zwilling und die Verwaltungsschale, die in vielen verschiedenen Domänen bereits heute konkrete Mehrwerte liefern können. Im vorliegenden Heft werden einige der Projekte vorgestellt. Im Wesentlichen ließen sich im Programm drei Schwerpunkte feststellen:

- » **Nachhaltigkeit:** In den Plenarveranstaltungen ging es um die Aktivitäten der Politik zur Förderung von Nachhaltigkeit, um die Rolle von Wasserstoff und um die Klimaneutralität als Wettbewerbsvorteil. Fachbeiträge beschäftigten sich unter anderem mit der Berechnung von Treibhausgas-Emissionen und der Bewertung von Wasserstoff-Wertschöpfungsketten.
- » **Künstliche Intelligenz und Autonome Systeme:** In 18 Fachbeiträgen wurden die beiden Themen behandelt und stellten damit den größten Block dar. Erfreulicherweise ging es meist



Neu bei der AUTOMATION war die Future Zone, in der sich Start-ups den Teilnehmerinnen und Teilnehmern präsentieren konnten.



Die Abendveranstaltung im Kurhaus Baden-Baden war das Highlight des ersten Kongresstags.

um konkrete Anwendungen – das Thema scheint endlich in der Praxis angekommen zu sein. Die lebhafteste Podiumsdiskussion beschäftigte sich mit der Frage „Wie gelangt KI-Wissen in die Unternehmen?“ Dort wurde sehr deutlich darauf hingewiesen, dass Firmen nur dann gute Fachleute finden, wenn sie intensiv mit Universitäten zusammenarbeiten. Außerdem fehle es flächendeckend an einem KI-Grundverständnis und es werde immer noch zu stark auf zugekaufte KI gesetzt.

» **Digitaler Zwilling und Verwaltungsschale:** Der dritte Schwerpunkt war der Digitale Zwilling, implementiert durch die Verwaltungsschale. Hier gab es Einführungen in die Thematik, aber auch sehr konkrete Anwendungen bis hin zur Online-Ausschreibung und Vergabe von Fertigungsaufträgen. In praxisnahen Beiträgen wurde gezeigt, wie Komponentenhersteller ihre Daten automatisiert in Verwaltungsschalen schreiben und wie Betreiber sie nutzen können.

Weitere Themenblöcke waren Digitale Geschäftsmodelle, IT-Security, Modulare Anlagen, OPC UA, Advanced Process Control sowie Modellbildung und Simulation. Dieses breite Portfolio deckte die Automatisierungswelt gut ab.

Besonderes Highlight: Die Dinner Speech der Abendveranstaltung

Ein besonderes Highlight war die Dinner Speech von Dr. Sierk Poetting, COO von BioNTec, der am Abend des 1. Kongresstags nicht nur über die Entwicklung und Herstellung des Covid-19-Impfstoffs berichtete, sondern auch andere Anwendungen der Immuntherapie sowie über modulare Konzepte, um weltweit Produktionsstätten errichten zu können. Er betonte wiederholt, wie wichtig einerseits die eigene technologische Kompetenz von BioNTec war, andererseits aber auch die hervorragende Zusammenarbeit mit Lieferanten und Partnern.

atp award 2021: Feierliche Preisverleihung zu Beginn des Kongresses

Am Morgen des ersten Kongresstags konnte die atp-Chefredaktion gemeinsam mit dem Vulkan Verlag in altbewährter Tradition die besten wissenschaftlichen Beiträge des atp magazins

von jungen Autor:innen mit dem atp award 2021 auszeichnen.

Die Entscheidung in den Kategorien Industrie und Hochschule fiel zugunsten der Beiträge von Sebastian Dickler, Thorben Wintermeyer-Kallen, Thomas Konrad und Andreas Berlet, die damit die besten Nachwuchswissenschaftler unter 35 Jahren sind, die im vergangenen Jahr im atp magazin veröffentlicht wurden. Zusammen mit ihren Co-Autoren wurden sie für ihre herausragenden wissenschaftlichen Beiträge des Jahres 2021 mit dem atp award 2021 ausgezeichnet.

Kategorie Industrie

In der Kategorie Industrie entschied sich die Jury für den Beitrag „Effiziente Navigation durch die Topologie industrieller Prozessanlagen“ von Andreas Berlet, Julius Rückert, Heiko Koziolk, Rainer Drath und Mike Barth. Der Beitrag aus dem atp magazin 10/2021 beschreibt die TopNav-Methode für eine effiziente Navigation durch Anlagentopologiemodelle sowie deren Analyse.

Die Methode unterstützt die systematische Suche nach Elementen und Pfaden in Topologiemodellen und die Einspeisung der Ergebnisse in Analysewerkzeuge. In einer Anwenderstudie wurde eine bis zu 90%-Zeitersparnis gegenüber der manuellen R&I-Analyse bei gleichzeitig deutlicher Fehlerreduzierung festgestellt.

Kategorie Hochschule

Der beste Hochschulbeitrag stammt in diesem Jahr von Sebastian Dickler, Thorben Wintermeyer-Kallen, Thomas Konrad und Dirk Abel. In ihrem Beitrag „Windenergieanlagen-Regelung – Ein Modell für die Zukunft“ im atp magazin 5/2021 diskutiert die grundlegenden Herausforderungen der Windenergieanlagen-Regelung sowie die dazu genutzten Konzepte konventioneller und modellbasierter prädiktiver Regelungen. Potenziale zur systematischen Umsetzung modellbasierter Regelungsverfahren und deren Stärken für die regelungstechnische Praxis von Windenergieanlagen runden diese Übersicht ab.

Die atp-Redaktion gratuliert allen Gewinnern des atp award 2021 und wünscht Ihnen für Ihre berufliche Zukunft weiterhin viel Erfolg.



FACHMESSE FÜR INDUSTRIE AUTOMATION

Messe Chemnitz
28. + 29. Sept 2022



Gratisticket sichern:

Code 1717

automation-chemnitz.de

MEHR ALL ABOUT AUTOMATION:

Hamburg

25. + 26. Jan 2023

Friedrichshafen

7. + 8. März 2023

VDI-Umfrage klärt Nutzung von KI-Methoden im Alltag

KI erweitert technische Systeme um die Fähigkeit, Aufgaben selbstständig und effizient zu bearbeiten. In den Jahren 2018 und 2019 hat sie einen Hype erfahren. Was ist seitdem passiert und haben KI-Methoden Einzug in den Ingenieuralltag gehalten? Dazu startete der VDI im März 2022 eine Umfrage unter seinen Mitgliedern. Die Ergebnisse wurden mit einer Umfrage aus 2018 verglichen und im Statusreport "Künstliche Intelligenz im Ingenieuralltag – Erwartungen und Realität" festgehalten. Dieter Westerkamp, VDI-Bereichsleiter Technik und Gesellschaft, fasst das Ergebnis zusammen:

„Die Prognosen aus der letzten Umfrage aus dem Jahr 2018 erfüllen sich nicht. Die seinerzeit geäußerten Erwartungen im Hinblick auf die Nutzung von KI-Methoden werden deutlich nicht erreicht.“

KMU hinken Großunternehmen weiter hinterher

Die größte Nutzung von KI-Methoden ergibt sich laut den VDI-Mitgliedern bei der Datenanalyse. Es folgen der Einsatz bei der vorausschauenden Instandhaltung, im Qualitätsmanagement sowie im Rahmen von Assistenzsystemen. Der überwiegende Teil der Befragten gibt an, dass das eigene Unternehmen noch keine KI-basierten Produkte oder Dienstleistungen anbietet. KMUs hinken Großunternehmen weiter hinterher.

Die geäußerten Erwartungen aus dem Jahr 2018 im Hinblick auf die Nutzung von KI-Methoden werden im Vergleich zur neuen Umfrage signifikant nicht erreicht. Ein möglicher Grund

kann die Corona-Pandemie sein, die neue und andere Herausforderungen vor allem in den Jahren 2020 und 2021 mit sich brachte.

Sehr pessimistisch ist die Einschätzung der VDI-Mitglieder im Hinblick auf eine führende Rolle Deutschlands in der Künstlichen Intelligenz. So sagten etwa 76 % der Befragte, dass Deutschland keine führende Rolle einnimmt, nur etwa 24 % geben an, Deutschland mindestens eine führende Rolle in einigen Bereichen zuzuschreiben.

KI-Kenntnisse werden häufiger schon im Studium vermittelt

Dafür steigt die Quote derer, die sich KI-Kenntnisse bereits im Studium aneignen. Aus Sicht der Befragten können Ingenieurwesen und Informatik die anstehenden Herausforderungen bei der Anwendung von KI nur gemeinsam lösen. Der Stellenwert von KI im Alltag der Ingenieurinnen und Ingenieure ist Stand heute jedoch gering.



INFORMATION



KI-Umfrage: Der Statusreport inklusive der Ergebnisse ist kostenfrei verfügbar. (www.vdi.de)

KI in Deutschland:

Neue Monitoring-Plattform zeigt deutschen Forschungsstand

Wie steht es um die Forschung zu Künstlicher Intelligenz (KI) in Deutschland? Inwieweit gelingt der Transfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft? Wo werden Kompetenzen zu KI vermittelt und wie verbreitet sind sie bei Beschäftigten? Kennzahlen dazu liefert das neue KI-Monitoring der Plattform Lernende Systeme unter www.kimonitoring.de – und zeigt damit den Status Quo sowie Entwicklungspotenziale bei Forschung und Transfer von KI in Deutschland auf.

KI-Monitoring: Überblick über den Einsatz von KI

Künstliche Intelligenz (KI) gilt als Schlüsseltechnologie. Technologische Entwicklungen, praktische Anwendungen und der Einfluss von KI auf Leben und Arbeitswelt stehen sowohl in der Wissenschaft als auch in Wirtschaft und Gesellschaft zunehmend im Fokus. Das KI-Monitoring der Plattform Lernende Systeme bietet einen Überblick über Entwicklung und Einsatz von KI in verschiedenen Bereichen. Im Sinne einer Standortbeschreibung weist es anhand von zwölf Indikatoren knapp und anschaulich wichtige Zahlen und Fakten zu den Aspekten Forschung, Kompetenzen und Transfer in die Anwendung aus.

Für ihr KI-Monitoring zieht die Plattform Lernende Systeme neben eigenen Recherchen aussagekräftige Zahlen heran, die von renommierten Forschungsinstituten, fachlichen oder staatlichen Einrichtungen erhoben werden. Wo dies möglich und sinnvoll ist, werden Daten aus anderen Ländern gegenübergestellt, um eine internationale Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

Deutschland ist in der KI-Forschung gut aufgestellt

Das KI-Monitoring zeigt, dass Deutschland in der KI-Forschung gut aufgestellt ist. Neben einer Vielzahl von (außer-)universitären Forschungseinrichtungen bildet das von Bund und Ländern geförderte Netzwerk aus sechs KI-Kompetenzzentren einen zentralen Strang der Spitzenforschung. Zur nachhaltigen Stärkung der KI-Forschung richtete der Bund im Zuge der nationalen KI-Strategie in den vergangenen Jahren 100 zusätzliche Professuren sowie zahlreiche Nachwuchsforschungsgruppen ein. Im internationalen Vergleich rangiert Deutschland aktuell auf Platz sechs bei wissenschaftlichen KI-Publikationen.

Das KI-Monitoring wird künftig regelmäßig aktualisiert und ist abrufbar unter www.kimonitoring.de.

IT-Tools im operativen Management



Die NAMUR ist die führende Interessengemeinschaft der Prozessindustrie im deutschsprachigen Raum und das atp magazin ihr offizielles Organ. Die über 40 NAMUR-Arbeitskreise stellen mit den von ihnen erarbeiteten NAMUR-Empfehlungen (NE) und NAMUR-Arbeitsblättern (NA) die Weichen für die gesamte Prozessindustrie. Auf dieser Seite stellen wir Ihnen in jedem Heft ein Arbeitsfeld oder Arbeitskreis im Detail vor. In dieser Ausgabe erfahren Sie alles Wichtige zum Arbeitskreis 2.4.

Arbeitskreis 2.4: Manufacturing Operations Management

Arbeitskreisleiter: Dr.-Ing. Udo Enste (LeiKon GmbH)

Gründung: März 2000

Anzahl der Mitglieder: 20 (zusätzlich 15 im Sub-AK 2.4.2)

Beschreibung: Der Arbeitskreis „Manufacturing Operations Management“ behandelt Themen zur Planung und zum effizienten Betrieb von IT-Lösungen im operativen Unternehmens- und Betriebsmanagement. Wir pflegen einen kollegialen Erfahrungsaustausch über aktuelle Technologien und organisatorische Herausforderungen zum Aufbau und zur nachhaltigen Pflege der verteilten Systemlandschaft von MES-Infrastrukturen (MES: *Manufacturing Execution Systems*), erarbeiten Anforderungen an zukünftige Systemlösungen und entwickeln neue Konzepte der Digitalisierung der Produktion. Spezifische Themen zur modularen Automation werden in gesonderten Sub-AKs behandelt.

Aktuelle Herausforderungen und Themen:

- » IT/OT-Konvergenz – systemtechnische aber auch organisatorische Synergien und Abgrenzungen von IT und OT
- » Vermehrt funktional vernetzte Systemlandschaften
- » Produktionsdaten- und Wissensmanagement – Bedarf zur Kontextualisierung von Daten
- » Flexible, modulare Automation

Aktuelle Projekte und Entwicklungen:

- » Weiterentwicklung des MES Leitfadens – typische Fragestellungen für Projektierung, Implementierung und die anschließende Systembetreuung von MES-Lösungen
- » Gib den Daten einen Kontext – Formulierung neuer Anforderungen und Konzepte zum Produktionsdatenmanagement
- » Sub-AK 2.4.2: Erarbeitung einer standardisierten Schnittstelle zwischen MES und unterlagerten Batchsystemen bzw. modularen Anlagen

Veröffentlichte und geplante NE und NA:

- » NA 110 „Nutzen, Planung und Einsatz von MES“
- » NA 128 „Planung von MES – Dargestellt anhand einer fiktiven Getränke-Produktion“
- » NE 141 „Schnittstelle zwischen Batch- und MES-Systemen“; geplant: Überarbeitung mit Berücksichtigung der Ansätze der Modularen Automation
- » NE 162 „Ressourceneffizienzindikatoren für das Monitoring und die Verbesserung der Ressourceneffizienz in Prozesanlagen“
- » NAMUR Positionspapier „Process Orchestration – Harmonising the Integration of Modular Equipment“
- » Elektronischer MES-Leitfaden: <https://www.namur.net/de/tools/glossar/wiki.html>

Kontakt:

Dr.-Ing. Udo Enste
LeiKon GmbH
51369 Leverkusen
+49 2407 9517-331
udo.enste@leikon.de



Mehr zum AK 2.4 finden Sie auf der Webseite der NAMUR.

Im Wandel liegt die Kraft

Mehr Effizienz und Flexibilität sind nicht erst durch die aktuellen weltpolitischen Verwerfungen Eigenschaften, die für die industrielle Produktion zunehmend wichtiger werden. Auch vor dem Hintergrund der Klimaverträglichkeit und Nachhaltigkeit ist gerade die Reduzierung des Energieverbrauchs ein enormer Hebel.

Blicken wir in diesem Kontext auf das Digitalisierungstempo der Prozess- und Verfahrenstechnik könnten wir von einem gelinde ausgedrückt mäßigen Tempo ausgehen. Doch gerade in der Chemie- und Pharmaindustrie wird bereits seit mehr als 50 Jahren an der Effizienz und Flexibilität geschraubt, wie Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Leiter des Fraunhofer IPA, im Interview deutlich macht.

Und das mit Erfolg, denn während dieser halben Dekade ist bereits einiges passiert. Die Prozessindustrie hat wie ein Chamäleon ihr Erscheinungsbild mehrmals verändert und agiert dabei nicht so behäbig wie gedacht.

Mit Technologien wie KI, dem Digital Twin, der Modularisierung und der NOA-Architektur kann die Branche ihr Antlitz nun noch schneller transformieren und weitere große Schritte in Richtung Klimafreundlichkeit gehen. Das atp magazin 8/2022 zeigt, wie die Prozess- und Verfahrenstechnik diese Enabler wertstiftend einsetzen kann.







Die grüne Transformation der produzierenden Industrie hin zu mehr Klimafreundlichkeit ist die große Aufgabe der kommenden Jahre, die von allen Branchen gelöst werden muss. Wie Unternehmen den Weg hin zur Klimaneutralität am besten bewältigen und warum sie ihre Produktion dafür vielleicht nach der Sonne ausrichten sollten, erklärt Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer, Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion EEP der Universität Stuttgart, im Interview.

Herr Prof. Sauer, womit genau befassen Sie sich an Ihrem Institut in Stuttgart?

Unser Fokus liegt auf Energiesystemen, die im industriellen Kontext eingesetzt werden. Dabei beschäftigen wir uns mit Lösungen, wie die produzierende Industrie insbesondere in Deutschland mit volatilen und erneuerbaren Energien gespeist werden kann und dabei weiterhin zuverlässig, sicher und wettbewerbsfähig produzieren kann. Die Idee dazu kam 2010 auf, als die Energiewende sich so langsam abzeichnete und klar wurde, wir müssen nicht nur schauen, wie wir erneuerbare Energie erzeugen, sondern auch, wie wir effizient mit ihr umgehen.

Ihr Institut gibt auch einen Energieeffizienzindex heraus. Was verbirgt sich dahinter?

Im Prinzip ist er ähnlich wie der ifo Geschäftsklimaindex ein makroökonomischer Frühindikator. Darin fragen wir die allgemeine Bedeutung der Energieeffizienz, die Investitionsbereitschaft in Energieeffizienz und die Steigerung der Energieproduktivität von 700 bis 1.000 Unternehmen ab. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Handlungsempfehlungen an die Politik zu richten. Dieser Benchmark erfolgt immer rückblickend auf die letzten und vorausschauend auf die nächsten zwölf Monate. Wir versuchen daraus branchenspezifisch abzuleiten, wie die Stimmungslage in der Industrie hinsichtlich Energieeffizienz insgesamt ist, was die Unternehmen wirklich tun und was am Ende dabei herauskommt.

Welche Industriesektoren würden Sie bezogen auf die Energieeffizienz als führend betrachten?

Einen richtigen Spitzenreiter gibt es da nicht. Aber es ist so, dass z. B. die energieintensiven Sektoren wie etwa die Prozessindustrie, für die Energiekosten immer schon ein Thema waren, bereits vor 50 Jahren angefangen haben, Einsparpotenziale zu suchen und zu heben. In der diskreten Fertigung kam der Strom bis vor zehn Jahren immer noch aus der Steckdose und das Gas aus der Leitung. Und zwar in den Mengen, die man brauchte. Nichtsdestotrotz steht die Prozessindustrie weiterhin vor viel größeren Herausforderungen als die Stückgutfertigung.

Ist denn der effiziente Einsatz erneuerbarer Energie ihr zentraler Forschungsgegenstand?

Nicht mehr ausschließlich. Wir haben uns weiterentwickelt und unser Blick richtet sich jetzt nicht mehr nur auf die Effizienz von Produktionsprozessen oder energetische

Verschwendungen, sondern eben verstärkt auch auf Systemfragestellungen. Da geht es dann darum, wie lokal vor Ort erneuerbare Energie erzeugt werden kann und welche unterschiedlichen Technologien individuell am besten kombiniert werden können. Zu guter Letzt stellt sich die Frage, wie wir die Produktionsprozesse an die volatile Energieerzeugung anpassen können.

...also z. B. welche Prozesse wann idealerweise ablaufen oder ob auf alternative Quellen zurückgegriffen wird?

In etwa. Wir sprechen dabei z. B. von bivalenten Produktionsprozessen. Ein gutes Beispiel dafür ist das Kochen. Stellen Sie sich vor, Sie hätten eine integrierte Gas-Elektroherdplatte und je nachdem, was gerade verfügbar und kosteneffizient ist, könnten Sie den Betrieb umstellen. So etwas wird auch bei industriellen Produktionsanlagen immer realer. Es gibt viele Prozesse, gerade in der Metallverarbeitung z. B., die früher auf Gas liefen und mittlerweile auf elektrische Energie umgestellt wurden. Aber hybride Varianten, die beides können, gibt es noch nicht.

Aber alles was Sie tun, hilft doch am Ende der Industrie dabei, klimaschädliche Emissionen zu verhindern?

Letztendlich sind die Effizienz und auch die CO₂-Vermeidung die wesentlichen Schwerpunkte. Natürlich ergeben sich daraus auch gewisse Widersprüche, denn Effizienz kann Emissionen vermeiden, aber eine gewisse Ineffizienz an einer Stelle kann an anderer Stelle zu einer großen CO₂-Einsparung führen.

Maximale Effizienz ist also nicht immer das Mittel der Wahl?

Nein, denn wer bewusst nicht alles bis zum äußersten optimiert und effizient gestaltet, bewahrt sich eine gewisse Flexibilität. Besonders wenn wir von einer volatilen Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen sprechen, ergeben sich daraus oft Vorteile, weil Produktionen reagieren können. Und das betrifft alle möglichen Energieträger, von Strom über Wärme bis hin zu Druckluft. Effizienz im System entsteht auch durch Flexibilität.

Hilft Digitalisierung hier nicht bereits enorm weiter?

Absolut. Zu Beginn von Industrie 4.0 und bis vor wenigen Jahren ging es bei Flexibilität allerdings hauptsächlich um das Reagieren auf veränderte Produktvolumina bzw. Individualisierungen. Erst jetzt werden die Emissionsvermeidung und das Thema Energie im Kontext der Flexibilität zunehmend wichtiger.

„Wer bewusst nicht alles bis zum Äußersten optimiert und effizient gestaltet, bewahrt sich eine gewisse Flexibilität. Effizienz im System entsteht auch durch Flexibilität.“

Welche Konsequenzen hat das für die produzierende Industrie?

Wir befassen uns schon seit 2016 in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekt mit der Energieflexibilisierung. Damals hat das nur ganz wenige Unternehmen interessiert. Eine atypische Netznutzung war damals das höchste der Gefühle. Flexibilität wurde damals nur gebraucht, um Netzentgeltreduzierungen zu bekommen. Heute fragen Firmen aktiv bei uns nach, was sie tun können, um ihre Nachfrage zu flexibilisieren. Es wird vielen Unternehmen zunehmend klarer, dass ein konstanter Verbrauch langfristig nicht mehr belohnt wird. Deswegen nimmt auch der Widerstand gegen eine Flexibilisierung der Energiepreise drastisch ab. Auch Wirtschaftsminister Robert Habeck hat das Anfang des Jahres in sein erstes Papier hineingeschrieben.

Ist damit diese Flexibilisierung die größte Herausforderung derzeit?

Ja, denn die Industrie versucht natürlich immer, auf dem optimalen Betriebspunkt zu arbeiten. Wird davon abgewichen, muss ich mit Effizienzverlusten rechnen. Deshalb hat sich das Engagement der Firmen, eigene erneuerbare Energie zu erzeugen und diese dann auch selbst zu nutzen, auch deutlich erhöht. Die gängige Lösung dafür ist die Photovoltaik und darum überlegen viele Unternehmen derzeit, wie sie ihre Produktion so flexibilisieren können, dass sie in der Mittagszeit möglichst viel Energie verbrauchen und in den sonnenschwachen Stunden entsprechend weniger. Es gibt heute schon Firmen, die ihre Produktion nach der Sonne planen.

Muss dafür dann nicht erst einmal die Produktion an sich flexibel sein?

Das muss sie in jedem Fall! Es braucht also z. B. Materialpuffer, die bestimmte Prozesse eben vom Rest der Produktion entkoppeln.

Was in der diskreten Fertigung sicherlich einfacher funktioniert als z. B. in der Chemie- oder Verfahrenstechnik.

Richtig. In der Prozessindustrie liegt ein großer Hebel in der Bivalenz, bei der die Prozessenergie mit Hilfe unterschiedlicher Energieträger bereitgestellt wird. Eine weitere Möglichkeit sind neue Verfahrenskombinationen oder Ver-

fahrensrouten, sodass flexibler auf aktuelle Energieverfügbarkeiten reagiert werden kann, ohne die Produktion stoppen zu müssen. Zuletzt können die Unterstützungs- und Vorproduktionsprozesse um den eigentlichen chemischen Kernprozess herum variabel gesteuert werden. Der Durchsatz von Luftzerlegungsanlagen etwa ist ein gutes Beispiel, an dem wir aktuell arbeiten.

Trotzdem müssen dabei doch etablierte Prozesse neu gedacht werden, oder?

Manchmal schon, aber es verlangt vor allem ein hohes Maß an Prozess-Know-how. Eine andere Möglichkeit, die jetzt mit dem Wasserstoff-Hype nochmal einen Push bekommt, sind Speichertechnologien. Überschussstrom könnte eben über Wasserstoff, andere synthetische Gase oder ein Halbzeug, das ich in der Produktion sowieso benötige, gespeichert werden. Seit Ende 2019 bemerken wir hier eine deutliche Veränderung sowohl im Mindset der Firmen als auch in der Berichterstattung über die deutsche Industrie.

Inwiefern?

Bis dahin wurde gerade die produzierende Industrie öffentlich vor allem als Bremse der Energiewende dargestellt. Plötzlich tauchen Ende 2019 ganz viele unterschiedliche positive Beispiele auf, vor allem in Zusammenhang mit Klimazielen, die sich die Firmen auferlegen. Und in diesem Kontext wurde dann die Effizienzbetrachtung quasi neu entdeckt, um eben jetzt die eigenen Betriebe auch energetisch zu optimieren. Heute wird fast keine Fabrikhalle mehr neu gebaut, die sich nicht selbst möglichst CO₂-neutral mit Energie versorgt. Auch bei Bestandsanlagen wird zunehmend geschaut, welche Ausbaustufen zukünftig möglich sind und wie man sich darauf vorbereiten kann.

Nun gibt es dabei eine technische Ebene, bei der man wirklich CO₂-neutral ist, und den Weg über Emissionszertifikate. Besteht da für Sie ein Unterschied?

Absolut. Ich unterstelle den Unternehmen, die Zertifikate kaufen, auch gar keine böse Absicht. Schließlich kann niemand von heute auf morgen alle seine Emissionen vermeiden. Für mich ist das eine Übergangslösung, weil die Unternehmen wissen, dass solche Zertifikate dauerhaft Geld kosten, während der Aufbau einer eigenen grünen Energieversorgung nach dem Aufbau dauerhaft Energie liefert. Außerdem kann diese Anlage abgeschrieben werden was eine gewisse Investitionssicherheit garantiert. Hinzu kommt die Unsicherheit bei Zertifikaten, vielleicht irgend-

„Generell wird durch die sich verändernden wirtschaftlichen Randbedingungen das Sparen von CO₂-behafteter Energie immer lukrativer.“

wo auf der Welt einen Quadratmeter aufgeforstet zu haben, der zwei Jahre später wieder abgebrannt ist.

Deshalb setzen viele Firmen auf regionale Projekte und Initiativen.

Richtig. Technisch klimaneutral in Scope 1 und 2 sind heute daher immer noch nur wenige Unternehmen. Und selbst dabei müssen wir etwas bedenken: Unternehmen können technisch klimaneutral sein, indem sie lokal mehr erneuerbare Energie erzeugen als sie brauchen, aber dennoch bei Produktionsspitzen konventionelle Energie aus dem Netz beziehen, weil sie ihren Spitzenbedarf nicht decken können. Das Unternehmen ist damit bilanziell zwar klimaneutral oder sogar CO₂-negativ, obwohl es Strom aus dem Netz bezieht. Selbst wenn diese zugekaufte Energie nicht grün erzeugt wird.

Trotzdem bleibt eine Investition in die Nachhaltigkeit eine Investition, die Wettbewerbsnachteile mit sich bringen kann, oder?

Das kommt tatsächlich auf die individuelle Situation des Unternehmens an. Es gibt auch organisationale Einsparungsmaßnahmen, bei denen durch viele kleine Optimierungen, die nichts oder nur wenig kosten, der Energieverbrauch reduziert werden kann. Eine Umstrukturierung von Produktionsprozessen oder der Energiesysteme hingegen, also die großen Würfe, sind letztlich Infrastrukturinvestitionen, die entsprechend längere Amortisationszeiten haben. Und da solche Projekte eben nicht direkt von einem Kunden bezahlt werden, gibt es immer noch einen firmeninternen Wettbewerb um die knappen Mittel.

Wirkt die CO₂-Steuer hier als zusätzlicher Motivator, dann diese knappen Mittel doch in die Klimaneutralität zu investieren?

Es ist schon sicherlich so, dass selbst die Unternehmensleitungen, die bislang damit noch nicht viel am Hut hatten, über solche Maßnahmen motiviert werden können. Aktuelle Verwerfungen wie etwa die Entwicklung der Gaspreise sind zusätzliche Anreize. Generell wird durch die wirtschaftlichen Randbedingungen das Sparen von CO₂-behafteter Energie immer lukrativer. Viele Unternehmen stehen heute vor der Wahl, entweder größere Effizienzinvestitionen zu machen oder weiterhin langfristig Zertifikate zu kaufen. Vielen fällt diese Entscheidung hier inzwischen deutlich leichter.

Auch weil im schlimmsten Fall aufgrund von Energieengpässen Produktionsausfälle drohen, wie wir auch aktuell merken. Werden wir in Zukunft das Jahr 2022 als einen Wendepunkt in Sachen Nachhaltigkeit betrachten?

In der Tat wurde das Thema Energieeffizienz noch nie so häufig in den 20-Uhr-Nachrichten thematisiert oder vom Wirtschaftsministerium angesprochen und mit neuen Mitteln gepusht wie jetzt. Es ging immer um Solarparks, Windräder und Stromtrassen. Wir merken jetzt, dass je weniger wir etwas brauchen, desto unabhängiger werden wir auch von der Bepreisung dieses Faktors. Ich persönlich erwarte da einen Riesenschub, denn Energieeffizienz hilft einfach dabei, unabhängiger von Preisschocks und energiebasiereten Standortentscheidungen zu werden.

ZUR PERSON

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Seit 2015 leitet Alexander Sauer das Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart sowie seit 2020 das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Er studierte Maschinenbau und Betriebswirtschaftslehre an der RWTH Aachen und promovierte 2005. Von 2002 bis 2006 war er dort wissenschaftlicher Mitarbeiter. Anschließend verantwortete er bei HOERBIGER für den Geschäftsbereich Automotive Komfortsysteme weltweit die Operations. Von 2011 bis zu seinem Ruf an die Universität Stuttgart hatte er eine Professur an der HAW München inne und leitete dort als Labor für angewandte Fertigungstechnik.

WUSSTEN SIE SCHON ...

... wie sich die Stromversorgung in Deutschland entwickelt?

Auf dem Weg zu mehr Flexibilität und Anpassungsfähigkeit in der industriellen Produktion spielt die Energieversorgung eine entscheidende Rolle. Vor allem bei der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen bestehen große Versorgungsschwankungen. Logisch, denn je nachdem wie stark der Wind weht oder die Sonne scheint, werden unterschiedliche Mengen Energie produziert.

Schon heute macht der Anteil der Erneuerbaren Energien anteilig den überwiegenden Großteil der Stromproduktion aus. Es wird daher zunehmend zum Vorteil, wenn flexibel auf die Energieverfügbarkeit reagiert werden kann. Ein Blick auf die Strompreise ist außerdem ein großer Motivator für die eigene Stromerzeugung. So haben sich die Preise für Haushalts- und Industriestrom seit 2000 um mehr als 20 Cent erhöht. Wie es um die deutsche Stromversorgung steht, zeigen wir Ihnen hier.



557 Terawattstunden

Strom wurden in Deutschland 2021 nach Abzug des Verbrauchs der Kraftwerke erzeugt.
Der niedrigste Wert seit 2008.



508 Terawattstunden

Strom wurden **2021** in Deutschland verbraucht.



52,4 Terawattstunden

Strom wurde **im vergangenen Jahr importiert**. 71,6 Terawattstunden wurden von Deutschland exportiert.



238 Terawattstunden

Strom wurden **2021** in Deutschland mit **Erneuerbaren Energien** erzeugt. Das entspricht 44 % der Bruttostromerzeugung.



44 %

des Stromverbrauchs Deutschlands entfielen **2021 auf die Industrie.**



26,6 Cent

kostet eine Kilowattstunde Industriestrom 2022 in Deutschland inkl. Steuern. Im Jahr **2000** waren es noch **6,1 Cent**.

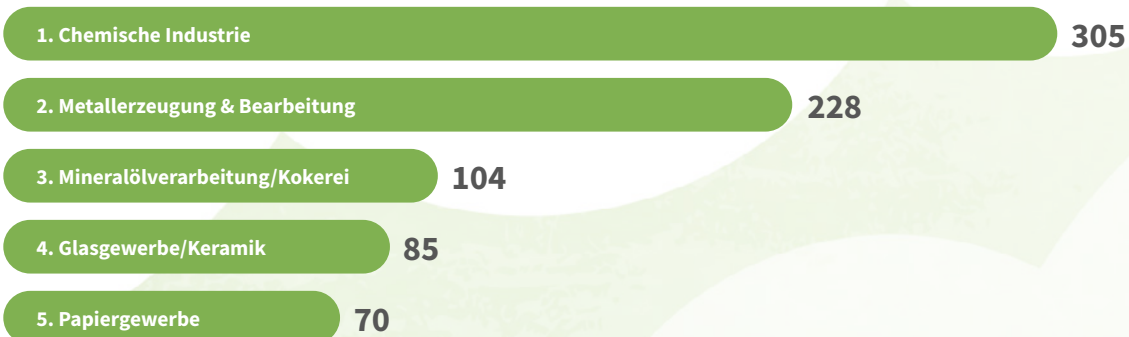


37,1 Cent

kostet eine Kilowattstunde Haushaltsstrom 2022 in Deutschland inkl. Steuern. Im Jahr **2000** waren es noch **rund 14 Cent**.

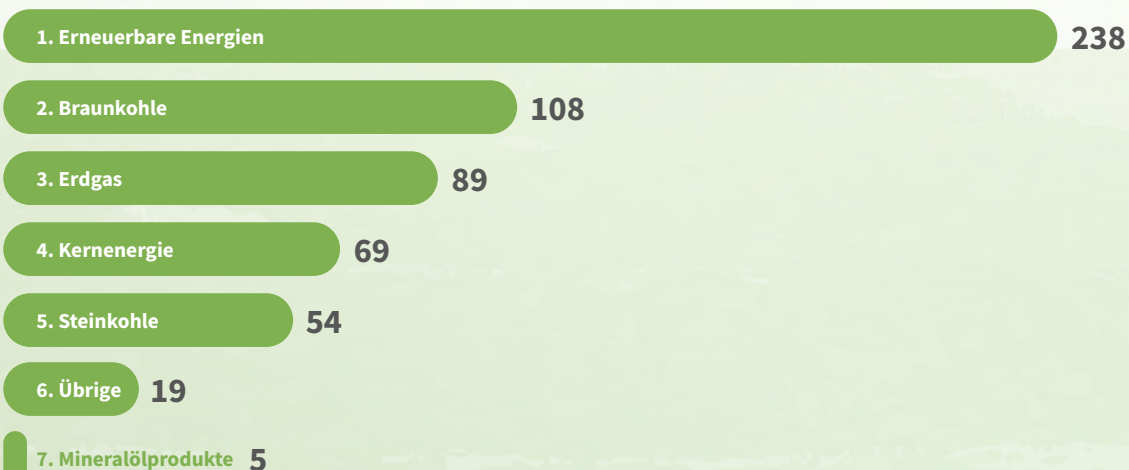
Die Chemische Industrie hat den größten Energiehunger

Energieverbrauch nach ausgewählten Sektoren **im Jahr 2020** in Terawattstunden.



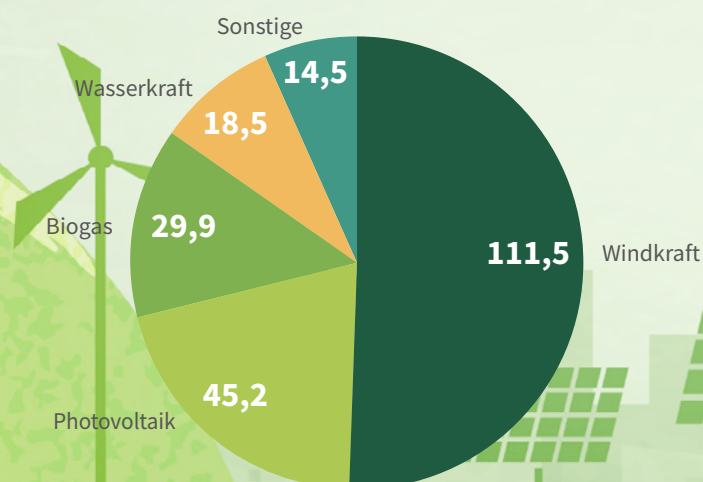
Wo kommt unser Strom-Mix her?

Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträger **im Jahr 2021** in Terawattstunden.



Der Wind weht am stärksten

Stromeinspeisung erneuerbarer Energieträger **im Jahre 2021** in Terawattstunden.



Here comes the sun!

Das sangen die Beatles schon im September 1969 in ihrem weltberühmten Hit des Albums *Abbey Road*. Doch auch 2022 wird die Sonne wieder wichtiger: Im März 2022 waren auf deutschen Dächern und Grundstücken 2,2 Millionen Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von insgesamt 58.400 Megawatt installiert. Seit 2018 hat sich die Zahl der Solaranlagen um 34 % und die installierte Leistung um 38,3 % erhöht.



Digital Twin: Mehr Flexibilität für Produktionsprozesse

Marius Krüger, Birgit Vogel-Heuser, Kathrin Land, Gunnar Grim, Josef Lorenzer, Markus Freiberg, Matthias Franzreb, Sonja Berensmeier

Getrieben von der Industrie-4.0-Bewegung befindet sich die Prozessindustrie am Standort Deutschland in einem Wandel [1]. Die Produktionsprozesse müssen flexibler, effektiver hinsichtlich der Produktausbeute, Produktqualität und Produktionszeit sowie effizienter im Einsatz der zur Verfügung stehenden Ressourcen gestaltet werden, um trotz steigendem Wettbewerbsdruck den Technologie- und Wirtschaftsstandort Deutschland nachhaltig zu sichern. Eine konsequente Prozessumgestaltung hin zu cyber-physischen Produktionsprozessen mit höherem Automatisierungslevel ist unausweichlich, um eine stringente Optimierung und Flexibilisierung der Produktion zu erreichen.

Die Prozessdigitalisierung wurde bereits in den vergangenen Jahren vorangetrieben, indem zahlreiche Produktionsanlagen mit zusätzlichen Sensoren ausgerüstet und an eine IoT-Plattform angebunden wurden. Durch diese Maßnahmen stehen zahlreiche historische Produktionsdatensätze zur Verfügung, deren immenser Informationsgehalt allerdings nicht vollumfänglich erschlossen wird [2]. Eine Nutzbarmachung dieser Daten durch Data Mining verspricht, Ursache-Wirk-Zusammenhänge aufstellen und daraus Optimierungspotenziale für den zugrundeliegenden Prozess ableiten zu können.

Digitale Zwillinge in der Separationstechnik

Der vorliegende Beitrag entstand im Rahmen des BMEL-Projekts InSeLDiP (Intensivierung von Separationsprozessen in der Lebensmittelindustrie durch Digitale Zwillinge und intelligente Prozesskontrolle), in dem der Einsatz hybrider Digitaler Zwillinge erforscht wird. Durch die Verknüpfung von modellbasierten und datengetriebenen Verfahren sollen Separationsprozesse in der Lebensmittelindustrie basierend auf einer auf Prozessverständnis aufbauenden Prozessführung optimiert werden. Als exemplarisches Separationsverfahren wird nachfolgend die *Dynamische Crossflow-Filtration* (DCF) betrachtet, die aufgrund der physikalischen Wirkprinzipien und der manuellen Prozessführung besondere Herausforderungen an eine optimale Prozessführung stellt.

Die Dynamische Crossflow-Filtration im Detail

Die DCF eignet sich zur Abtrennung von hochviskosen Suspensionen und wird beispielsweise zur Herstellung von Proteinpulver aus proteinhaltigen Suspensionen verwendet. Eine Suspension (*Feed*) umströmt dabei turbulent mehrere rotierende Filterscheiben und spaltet sich auf in *Retentat* (wird an Filterscheiben zurückgehalten) und *Permeat* (durchquert Filterscheiben). Mit fortlaufender Filtrationszeit verblocken die Membranen der Filterscheiben durch die an den Filterscheiben zurückgehaltenen Bestandteile der Suspension. Ein Filterkuchen wächst an, sodass die Filtrationseigenschaften der DCF-Anlage mit fortlaufender Filtrationszeit nachlassen [3]. In Abbildung 1 werden schematisch die Verblockung der Membran an den Filterscheiben sowie der vereinfachte Aufbau einer DCF-Anlage als R&I-Fließbild mit Prozessmessstellen skizziert.

Eine regelmäßige Reinigung der Filterscheiben ist infolge der Membranverblockung notwendig. Im industriellen DCF-Anlagenbetrieb laufen Filtrations- und Reinigungsprozesse zyklisch als separate Batchprozesse ab. In Abhängigkeit von der zu erwartenden Verschmutzung der Anlage werden verschiedene Reinigungsmodi gewählt, die sich u. a. in der Menge und Konzentration an Reinigungsflüssigkeit, -intensität und -dauer unterscheiden. Die Güte der zuvor durchgeführten Reinigung beeinflusst folglich die anfängliche Verblockung der Membran zu

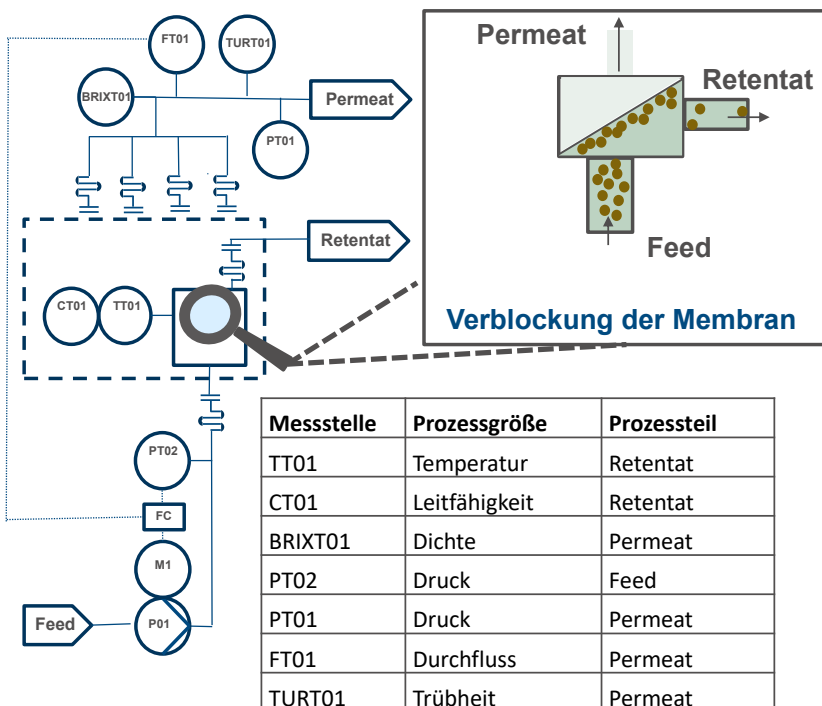


Abbildung 1: Vereinfachtes R&I-Fließbild von Dynamischen Crossflow-Filtrationsanlagen und Veranschaulichung der Verblockung einer Filtermembran.

Filtrationsbeginn und bestimmt damit die resultierende Produktqualität, den Ertrag sowie die Filtrationsdauer während des gesamten Filtrationsbatchprozesses.

Die Kosten, der Energieaufwand und der Ressourceneinsatz einer vorangegangenen Reinigung müssen gegen den Nutzen für den darauffolgenden Produktionsprozess in einem multi-kriteriellen Optimierungsproblem abgewogen werden. Die Lösung einer multi-kriteriellen Optimierungsaufgabe erfordert ein formales Prozessmodell für die verkoppelten Reinigungs- und Filtrationsprozesse sowie Kenntnis über die zeitlich veränderlichen Ursache-Wirk-Prinzipien während der Filtration.

Datengetriebene Prozessmodellierung

Laut aktuellem Stand der Forschung existiert kein rigoroses Prozessmodell für DCF-Anlagen. Vielmehr ist eine rein physikalische Modellierung der DCF aufgrund der Vielzahl an zeitlich veränderlichen und verkoppelten Prozessvariablen herausfordernd. Eine datengetriebene Prozessmodellierung verspricht, Korrelationen zwischen Variablen im Prozessabbild erkennen und durch Anreicherung mit Expertenwissen zu Ursache-Wirk-Diagrammen erweitern zu können. Die Möglichkeiten, Prozessinformationen aus historischen Datensätzen zu extrahieren, werden maßgeblich von der zugrundeliegenden Qualität der zeitlich aufgelösten Daten bestimmt.

Prozessführungskonzept

Die Hürden einer datengetriebenen Prozessbeschreibung werden bei Betrachtung des vorherrschenden DCF-Prozessführungskonzeptes deutlich, das in den historischen Prozessdaten erfasst und abgebildet ist. Um möglichst lange bei hohem Permeatertrag und gering anwachsender Filterverblockung produzieren zu können, wird die Drehzahl der Pumpe P01 (vgl. Abbildung 1, befördert Feed an den Filterscheiben entlang) zweistufig geregelt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird zunächst auf einen konstanten Permeatvolumenstrom (FT01) geregelt, ehe eine Regelung auf den an der Filtermembran abfallenden Druck (PT02 - PT01) erfolgt. Die Sollwerte für die Regelgrößen werden auf Basis von Erfahrungswissen gewählt und über das Human-Machine-Interface (HMI) an der Maschine vorgegeben. Neben einer Anpassung der Sollwerte für die Regelung während der Filtrationszeiten kann es zu manuellen, nicht über das HMI dokumentierten Eingriffen in den Prozess kommen. Die Anlage steht temporär still und der Filtrationsprozess wird unterbrochen.

Als Folge der Anlagenstillstandzeiten sind die Verläufe der Prozessvariablen innerhalb der Batchprozesse nicht mehr unmittelbar zeitlich zusammenhängend. Eine Anpassung der Sollwerte im Betrieb führt zudem zu verschiedenen Arbeitspunkten der Regler und kann Sprünge in den zeitlichen Prozessvariablen hervorrufen. Diese auf die Maschinenführer:innen zugeschnittene Prozessführung

mit zwei verschiedenen Regelkreisen erfordert daher eine aufwendige Datenvorverarbeitung, bei welcher die Zeitreihen unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Effekte segmentiert werden müssen, um zeitlich zusammenhängende Verläufe der Prozessdaten zu erzeugen. Prozesssprünge müssen anhand der Sollwertänderungen der Regelgrößen kontextualisiert werden, um prozesskritische Ursachen (z. B. gebrochene Filterscheiben) von manuellen Prozesseingriffen (z. B. Änderung der Sollwerte für die Regelgrößen) unterscheiden zu können.

Auswertung der Zeitreihen

Für die Datenvorverarbeitung werden die historischen Daten als csv-Dateien ausgetauscht und zunächst ins performante *Hierarchical Data Format* (HDF5) überführt. Jeder Messwert wird dabei einem eindeutigen Zeitstempel, gemessen im Unix-Zeitsystem nach POSIX-Standard, zugeordnet. Die Messwerte können so bezüglich doppelter Einträge sowie anhand einfacher Entscheidungsregeln hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft und vorverarbeitet werden. Die zeitlich veränderlichen Prozessvariablen sind nicht zeitsynchron zugeordnet. Es entstehen darüber hinaus einzelne Lücken in der Messdatenaufnahme, sodass die Messpunkte nicht mehr mit äquidistanter Zeitschritterfassung vorliegen. Aufgrund der fehlenden äquidistanten Abtastung der Messdaten wird in einem ersten Schritt das Trendverhalten in segmentierten Zeitreihen untersucht.

Die Zeitreihensegmentierung wird in zwei Vorgängen durchgeführt. Basierend auf der Annahme, dass Reinigungsdurchläufe oder hardwaretechnische Modifikationen an der DCF-Anlage die Filtrationseigenschaften signifikant beeinflussen, erfolgt zunächst eine Trennung der Zeitreihen nach Reinigungs- und

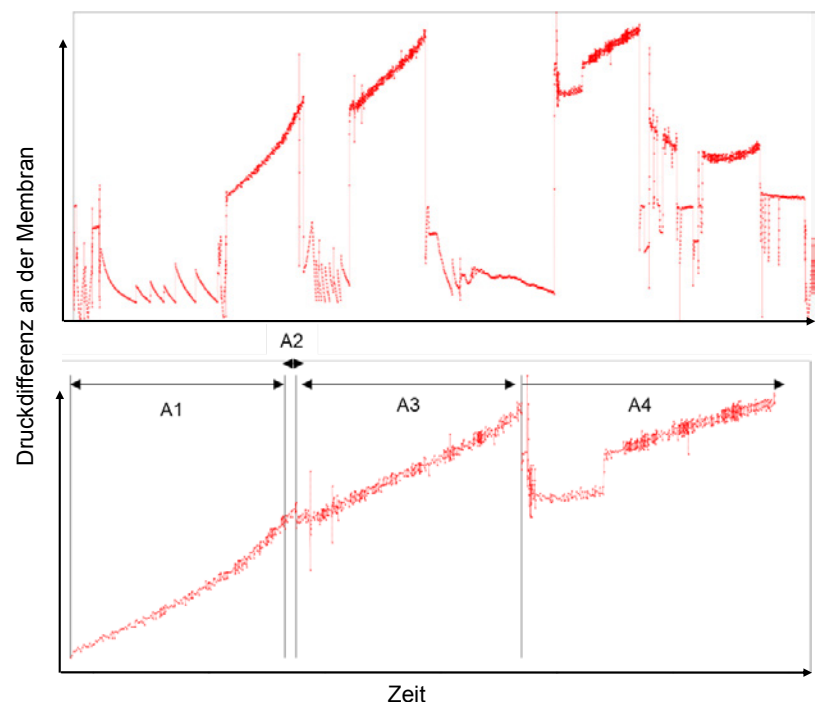


Abbildung 2: (Oben): Zeitreihe vor der Segmentierung, (unten): Zeitreihe nach der Segmentierung und Unterteilung in Prozessabschnitte (A).

Wartungszuständen. Innerhalb dieser entstehenden Zeitreihensegmenten wird nach Filtrationszyklen unterteilt, in welchen eine stabile Regelung mit eingeschwungenem Regler stattfindet. Auf diese Art und Weise können unter anderem Anlagenstillstände sowie regelungsbedingte Schwankungen in den Messdaten entfernt werden. In Abbildung 2 ist exemplarisch eine Zeitreihe für die an den Filterscheiben abfallende Druckdifferenz vor der Segmentierung (s. Abbildung 2, oben) und nach der beschriebenen Segmentierung (s. Abbildung 2, unten) dargestellt.

Durch das beschriebene Segmentierungsverfahren können folglich zeitlich zusammenhängende Prozessverläufe erzeugt werden. Anhand der Ablaufsteuerung der DCF-Anlage können vier einzelne Prozessabschnitte (A1-A4) identifiziert werden. Zu Beginn von A1, A3, A4 wurden jeweils neue Vorlagenbehälter mit Suspensionen an die Anlage angeschlossen. Obwohl für den Wechsel der Vorlagenbehälter die Filtration innerhalb des Batchprozesses unterbrochen wird, entstehen durch die Zeitreihensegmentierungen zusammenhängende Prozessverläufe ohne Sprünge zu den Stillstandzeiten. Diese Beobachtung ist vor dem Hintergrund einer kontinuierlichen Verblockung der Filterscheiben ohne Reinigungsintervalle während des Filtrationsbatches zu erwarten und plausibilisiert die Methodik zur Segmentierung.

Der Prozesssprung in A4 kann unter Betrachtung der Pumpendrehzahl auf eine Änderung des Sollwertes für die Volumenstromregelung im Permeat zurückgeführt werden. Eine Trendanalyse der einzelnen Prozessdaten zur Identifikation von korrelativen Wirkzusammenhängen wird damit möglich. Die Zeitreihensegmentierung und die Trendanalyse werden ausführlich in [4] diskutiert. Durch das beschriebene Datenvorverarbeitungsverfahren werden die Prozessdaten für die weitere Extraktion von Informationen nutzbar.

Data Mining als Enabler für intelligente Digitale Zwillinge:

Das beschriebene Verfahren zur Segmentierung und Kontextualisierung von Zeitreihen stellt einen fundamentalen Schritt dar, historische Zeitreihen analysieren und Prozesswissen aus diesen extrahieren zu können. Erst durch eine Zeitreihensegmentierung, Kontextualisierung von Prozesssprüngen sowie eine Trendanalyse können zeitlich aufgelöste Prozessdaten von DCF-Anlagen für eine Strategie zur Optimierung der Prozessführung erschlossen werden. Prozesse können derart modelliert und Ursache-Wirk-Prinzipien qualitativ im Rahmen einer Trendanalyse aufgestellt werden. Durch die Erkenntnisse entsteht ein vollständiges, datenbasiertes Prozessmodell, das mit einem mechanistischen Modell zu einem Digitalen Zwilling kombiniert wird. Auf dieser Basis wird ein Algorithmus entwickelt, der eine intelligente Steuerung für verschiedene Suspensionen und Maschinenkonfigurationen darstellt.

Danksagung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt (bzw. erfolgte) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen

Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt (bzw. erfolgte) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung. Wir bedanken uns beim BMEL sowie allen Konsortialpartnern.

Referenzen

- [1] Vogel-Heuser, B., & Hess, D. (2016). Guest editorial Industry 4.0–prerequisites and visions. *IEEE Transactions on automation Science and Engineering*, 13(2), 411-413. doi: 10.1109/TASE.2016.2523639.
- [2] Folmer, J., Kirchen, I., Trunzer, E., Vogel-Heuser, B., Pötter, T., Graube, M., Arnu, D. (2017). Big und Smart Data: Herausforderungen in der Prozessindustrie. *atp magazin*, 59(01-02), 58-69. doi: 10.17560/atp.v59i01-02.623.
- [3] Bott, R., Langeloh, T. H., & Ehrfeld, E. (2000). Dynamic cross flow filtration. *Chemical Engineering Journal*, 80(1-3), 245-249. doi: 10.1016/S1383-5866(00)00097-6.
- [4] Krüger, M., Vogel-Heuser, B., Land, K., Grim, G., Lorenzer, J., Hanf, M. (2022). Data Mining in der Prozesstechnik als Key-Enabler intelligenter Digitaler Zwillinge für eine datengetriebene Optimierung der Prozessführung“ in VDI-Kongress AUTOMATION (VDI KA).

Marius Krüger, M. Sc. RWTH

Technische Universität München
85748 Garching bei München
maris.krueger@tum.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Technische Universität München
85748 Garching bei München
vogel-heuser@tum.de

Kathrin Land, M. Sc.

Technische Universität München
85748 Garching bei München
kathrin.land@tum.de

Gunnar Grim

Andritz Separation GmbH
85256 Vierkirchen
gunnar.grim@andritz.com

Josef Lorenzer

Andritz Separation GmbH
85256 Vierkirchen
josef.lorenzer@andritz.com

Markus Freiberg

Andritz Separation GmbH
85256 Vierkirchen
markus.freiberg@andritz.com

apl.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Franzreb

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
matthias.franzreb@kit.edu

Prof. Dr. Sonja Berensmeier

Technische Universität München
85748 Garching bei München
s.berensmeier@tum.de

Digitale Zwillinge und Agenten für die Produktion von morgen

Eric Bayrhammer, Birgit Vogel-Heuser, Haris Avgoustinos, Robin Thrift, Felix Ocker

Herausforderungen wie Produktindividualisierung, kleine Losgrößen und stark umkämpfte Märkte erfordern schon länger eine Digitalisierung, beispielsweise im Sinne von Simulation, virtueller Inbetriebnahme und digitalen Assistenzsystemen. Heute kommen globale Krisen und der Wunsch nach entsprechender Resilienz und Flexibilität, sowie spezielle Anforderungen wie Null-Toleranz und die Nachvollziehbarkeit von Lieferketten oder dem CO₂-Fußabdruck dazu. Technologien wie Digitale Zwillinge und Agentensysteme können hierfür wesentliche Beiträge leisten, doch wie werden diese Bausteine zusammengefügt und wie können diese, abseits von akademischen Prototypen, genutzt werden?

Der Weg von Daten zu Digitalen Zwillingen

Die Basis für Digitale Zwillinge im Produktionskontext sind Daten der Anlagen, ihrer Komponenten und der Produkte. Der Wert dieser Daten hängt davon ab, ob sie durchgängig bereitgestellt und genutzt werden können. Durchgängigkeit bezeichnet hier sowohl die Verknüpfung von der Akteur- und Sensorebene, über die Steuerungsebene, die Produktionsleistungsebene, bis in die Unternehmensplanungsebene [1] und andererseits über den jeweiligen Lebenszyklus der Assets hinweg, d. h. über Organisations- und Firmengrenzen hinaus zwischen verschiedenen Stakeholdern, vom Engineering über die Inbetriebnahme bis zum Betrieb, Service, Wartung und Recycling. In beide Richtungen wird bei vorhandener Durchgängigkeit ein Wertschöpfungsnetzwerk aufgespannt. Der Informationsgehalt kann darin nach dem Add- und Reuse-Prinzip [2] wachsen und so zahlreiche Anwendungsfälle ermöglichen.

All diese Daten können in einem, gegebenenfalls verteilten, Digitalen Zwilling gekapselt werden. Das heißt die Eigenschaften eines Assets werden in der digitalen Welt abgebildet und zum realen Asset aktuell gehalten. So wird eine Verbindung zwischen Informations- und Operationstechnologie hergestellt. Aufgrund des Marktdruckes sind Komponentenhersteller gezwungen, ihre Produkte zunehmend mit Digitalen Zwillingen auszustatten. Anlagenbauer können diese zu Digitalen Zwillingen der Gesamtanlagen orchestrieren, um eine intelligente Fabrik zu realisieren. Durch die Vernetzung und Weiterverwendung der Digitalen Zwillinge werden die Erhebung notwendiger Daten beim Anlagenengineering oder deren Neuerfassung aus Datenblättern obsolet, was ein enormes Einsparungspotenzial bietet.

Flexibilität durch Agenten

Um die Flexibilität und Adaptivität von Produktionssystemen zu steigern, sind Multiagentensysteme geeignet. Agenten sind gekapselte Hardware- und Softwareentitäten mit definierten

Zielen hinsichtlich der Steuerung eines technischen Systems [3]. Dabei wird im Produktionskontext typischerweise zwischen Ressourcen-, Produkt-, Prozess- und Kommunikationsagenten unterschieden. Während *Ressourcenagenten* die Produktionsressourcen, d. h. Komponenten, Anlagen oder auch ganze Fabriken repräsentieren, steuern *Prozessagenten* den Prozess. *Kommunikationsagenten* können genutzt werden, um Bestandssysteme anzubinden und mit Produktagenten können intelligente Produkte realisiert werden [4].

Bisher scheiterte die breite industrielle Nutzung agentenbasierter Ansätze jedoch unter anderem am Aufwand für die Erstellung von Wissensbasen für die einzelnen Agenten, der Initialisierung des Agentensystems sowie der Kopplung der Agentenebene mit der physischen Ebene der Produktionssysteme. Die Informationen für die Wissensbasen sind zum Teil in Form von Entwicklungsdokumenten und Kundenbestellungen implizit vorhanden, eine automatisierte Nutzung ist aber aufgrund der Heterogenität der Dokumente und Schwierigkeiten bei der Interpretation problematisch. Digitale Zwillinge haben das Potenzial, diese Wissensbasis bereitzustellen.

Plattformen und Ökosysteme

Damit Agenten und Digitale Zwillinge sich ergänzen können, muss es eine gemeinsame Plattform geben. Derzeit sind Hunderte verschiedene IoT-Plattformen verfügbar. Allerdings sind diese sehr heterogen aufgestellt. Nur ein Teil davon arbeitet mit dem Konzept des Digitalen Zwillinges, und dies auch noch in verschiedenen Formen und für konkrete Anwendungsfälle. Teilweise werden die Begriffe *Things* und *Things Modeling* verwendet, wodurch zumindest eine plattformweit einheitliche Umsetzung erfolgt. Eine standardisierte technologische Umsetzung über die Plattformen hinweg, etwa durch die Verwendung der Verwaltungsschale, ist jedoch in der Regel nicht gegeben.

Im Kontext dieser Plattformen wird der Begriff „Agent“ größtenteils dazu genutzt, Softwaremodule zu beschreiben, welche die Funktionalität der Plattform an sich bereitstellen, z. B. mit der *Crypto Extension* für *PTC-ThingWorx* [5]. *Cumulocity IoT* nutzt Agenten, um Kommunikationsprotokolle und Modelle in die eigene, plattformweit einheitliche Form zu transformieren und eine sichere Kommunikation herzustellen [6]. Eine Verwendung von Agenten im Sinne der Repräsentation von Produkten, Prozessen oder Ressourcen, die miteinander interagieren und entsprechende Entscheidungen treffen, liegt bei diesen Plattformen nicht vor. Die Nutzung von Synergien zwischen solchen Hardware-Agenten und Digitalen Zwillingen wird bisher primär in akademischen Veröffentlichungen diskutiert [7, 8].

Proaktiver Zwilling

Damit ein Agent die im Digitalen Zwilling enthaltenen Informationen nutzen kann, müssen diese in einer eindeutig interpretierbaren Form vorliegen. Einen Vorschlag zeigt Tabelle 1. Ein *Ressourcenagent* (RA) muss Produktionsfähigkeiten anbieten können und dabei den aktuellen Status der Ressource berücksichtigen. *Produktagenten* (PA) fordern die Fähigkeiten, entsprechend der notwendigen Prozesse zur Herstellung des Produktes, bei den Ressourcenagenten an und orientieren sich dabei u. a. am Produktionsstatus.

Laufzeitumgebung

Basierend auf diesen Konzepten wurde im Projekt DAVID an einer Laufzeitumgebung geforscht, mit der Agenten und Digitale Zwillinge gemeinsam betrieben werden können [9]. Um ein Wertschöpfungsnetzwerk, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, technisch umzusetzen und für die Industrie nutzbar zu machen, muss darüber hinaus eine Vernetzung von Komponenten, Anlagen, IT-Systemen und -Applikationen erfolgen. Das Deployment des gesamten Software-Stacks der Laufzeitumgebung wurde als *Infrastructure-as-Code* (IaC) deklarativ

Tabelle 1: Übersicht der von Agenten benötigten Informationen und Abbildung in der Verwaltungsschale [7].

Agententyp	Information	VWS-Klasse
Ressourcenagent	Fähigkeit der Ressource	Capability
	Zielfunktion	SubmodelElement
	Parameter: Kosten, Status, Information	Property / Range
Produktagent	Menge der benötigten Prozesse	SubmodelElementCollection
	Teilprozess zur Produktherstellung	SubmodelElement
	Parameter: Priorität, Variablen, Status	Property / Range

Um der Problematik der aufwendigen Initialisierung von Agenten gerecht zu werden, können die Agenten, in Anlehnung an die Struktur von Produktionssystemen, hierarchisch strukturiert werden. Das bedeutet, ein RA kann aus einer beliebigen Anzahl von untergeordneten RAs bestehen. Beispielsweise fasst der RA einer ganzen Fabrik die RAs der einzelnen Maschinen zusammen, eine Maschine wiederum ihre Komponenten. Basierend auf der im Digitalen Zwilling hinterlegten Struktur, veranlasst der RA der Fabrik die Initialisierung der ihm untergeordneten RAs und dient gleichzeitig als Verzeichnis ihrer Fähigkeiten (*Directory Facilitator*). Ein PA fordert Dienste vom Fabrik-RA an, welcher die Adressen der untergeordneten RA liefert. Alle Agenten innerhalb des MAS sind über ihren jeweiligen DZ mit der physischen Anlage verbunden und verfügen über eine Wissensbasis, die aus dem Digital Twin generiert wird. Agenten und DZ bilden zusammen einen Proaktiven Digitalen Zwilling.

definiert und basiert auf Cloud-native-Technologien. Um dem Agenten-Paradigma zu folgen, erhält jeder einzelne Proaktive Zwilling einen eigenen Container und wird als *BaSys 4.2 Node* aufgesetzt. Die Container werden durch *Kubernetes* orchestriert. Die Laufzeitumgebung stellt jedem dieser Proaktiven Zwillinge eine eigene NoSQL-Datenbank zur Aufnahme der Daten sowie diverse Industrie 4.0 APIs bereit und hostet die Applikationsschicht bzw. den Agenten.

Konkret werden Ressourcenagenten, die physikalische Assets wie Maschinen und Anlagen repräsentieren, als Cyber-Physische Systeme (CPS) aufgebaut (s. Abbildung 2). Hier laufen die Agenten also auf der eigenen Maschinenhardware. Produktagenten und Prozessagenten sind gleichermaßen aufgebaut, werden jedoch ohne eigene Hardware in einer Cloud oder Shopfloor-Edge-Cloud betrieben.

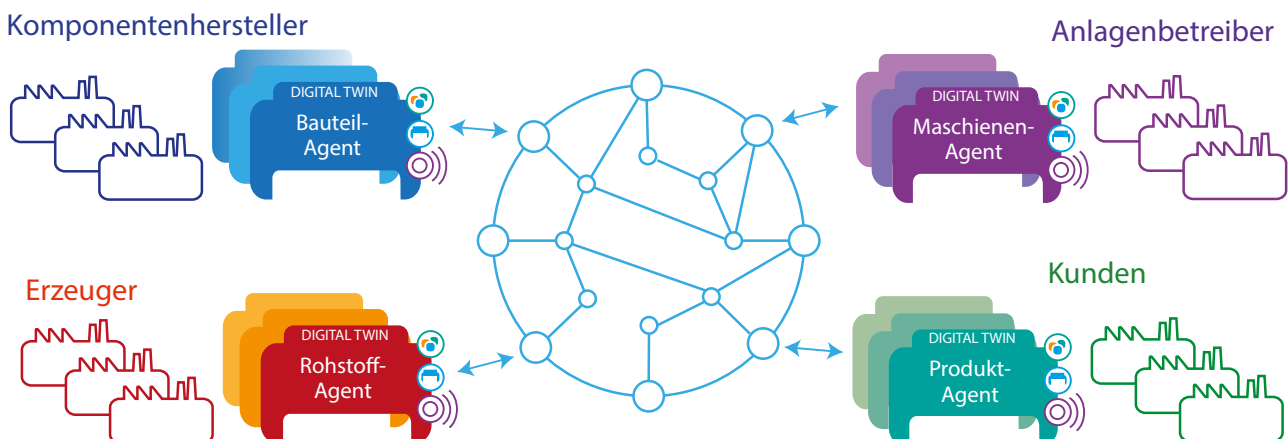


Abbildung 1: Agenten werden über Domänengrenzen hinweg vernetzt.

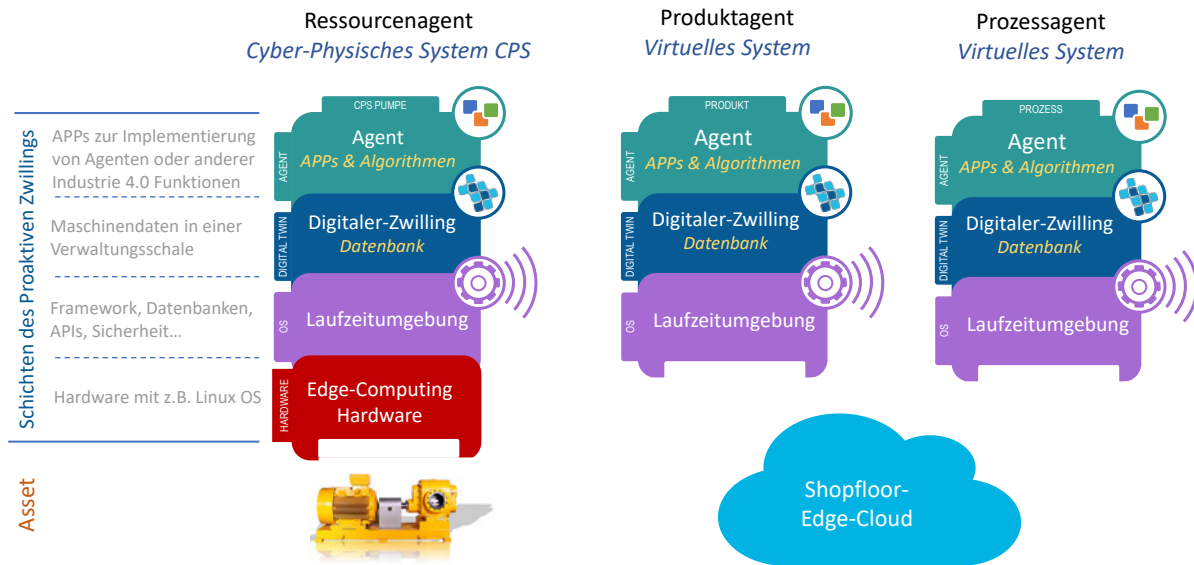


Abbildung 2: Aufbau und Schichten des Proaktiven Zwillings.

Hochflexible Wertschöpfungsnetzwerke

Mittels diverser SDKs der Laufzeitumgebung, ist es möglich schnell und einfach Apps zu entwickeln, ähnlich wie bei Smartphones. Die Apps können mit den Digitalen Zwillingen arbeiten und bieten so neue, effiziente Möglichkeiten, um intelligente Maschinen zu entwickeln und Industrie-4.0-Szenarien schnell und nachhaltig umzusetzen. So wurden z. B. eine Dashboard-App, eine Simulations-App, eine Inbetriebnahme-App, eine Shopping-App für die automatische Bestellung von Ersatzteilen, eine Linker-App um Digitale Zwillinge miteinander zu vernetzen sowie eine App, die den Datenaustausch mit anderen Systemen wie dem SAP-AIN unterstützt, umgesetzt.

Insgesamt wird so ein Ökosystem gebildet, das einen Betrieb von Proaktiven Digitalen Zwillingen unterstützt, so hochflexible Wertschöpfungsnetzwerke ermöglicht und der Industrie deren Nutzung leicht zugänglich macht.

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2016). Ergebnispapier: Forschungsagenda Industrie 4.0 - Aktualisierung des Forschungsbedarfs. Abgerufen von: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/forschungsagenda-i40.pdf>
- [2] Himstedt, S. (2019). Offene Systemgrenzen für das digitale Abbild. Abgerufen von: <https://www.it-production.com/fertigungsnahe-it/werksnahe-it-und-der-digitale-zwilling/>
- [3] VDI/VDE 2653 Blatt 1. (2018). Multi-agent systems in industrial automation - Fundamentals. VDI: www.vdi.de
- [4] Kovalenko, I., Tilbury, D., & Barton, K. (2019). The model-based product agent: A control oriented architecture for intelligent products in multi-agent manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, 86, 105-117. doi: 10.1016/j.conengprac.2019.03.009.
- [5] Device Authority Ltd. (2021). IoT Security Platform | Our IoT Security Features | Device Authority. Abgerufen von: <https://www.deviceauthority.com/platform/>
- [6] Software AG. (2022). Interfacing devices - Cumulocity IoT Guides. Abgerufen von: <https://cumulocity.com/guides/concepts/interfacing-devices/>
- [7] Vogel-Heuser, B., Ocker, F., Scheuer, T. (2021). An approach for leveraging Digital Twins in agent-based production systems. *at-Automatisierungstechn*

nik, 69(12), 1026-1039. doi: 10.1515/auto-2021-0081.

- [8] Sakurada, L., Leitão, P., de la Prieta, F., & Rodríguez, J. M. C. (2021). Multi-agent systems to realize intelligent asset administration shells. In *Proceedings of the III Workshop on disruptive information and communication technologies for innovation and digital transformation* (pp. 43-58). Ediciones Universidad de Salamanca. doi: 10.14201/OAQ03114358.
- [9] Bayrhammer, E., Vogel-Heuser, B., Avgoustinos, H., Thrift, R., Ocker, F. (2022). Digitale Zwillinge als Enabler für Agentensysteme zur Realisierung autonomer Wertschöpfungsnetzwerke mit erhöhter Produktivität. Vortrag gehalten auf der VDI-Automation 2022.

Dipl.-Ing. Eric Bayrhammer

Fraunhofer IFF
39106 Magdeburg
eric.bayrhammer@iff.fraunhofer.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

TU München
85748 Garching bei München
vogel-heuser@tum.de

Dipl.-Ing. Haris Avgoustinos

EXPO21XX GmbH
30159 Hannover
haris@expo21xx.com

Robin Thrift

EXPO21XX GmbH
30159 Hannover
info@expo21xx.com

Felix Ocker

TU München
85748 Garching bei München
felix.ocker@tum.de



**„Die Verwaltungsschale ist
der Kern des Digital Twin“**

Die Industrial Digital Twin Association (IDTA) treibt seit März 2021 die Weiterentwicklung der Verwaltungsschale voran und koordiniert die Bemühungen rund um die Teilmodelle. Im Interview geben die beiden Geschäftsführer Meik Billmann und Dr. Christian Mosch Einblick in die Roadmap der IDTA und verraten, wie die Organisation zur weltweiten Single Source of Truth für die Asset Administration Shell (AAS) werden möchte.

Herr Billmann und Herr Mosch, die IDTA ist jetzt seit fast eineinhalb Jahren aktiv und hat bereits 74 Mitgliedsfirmen überzeugen können. Vor welchen Herausforderungen stehen Sie aktuell?

Christian Mosch: Im Moment sind wir darauf fokussiert, den Nutzen der AAS aufzuzeigen und den Erfahrungsaustausch anzuregen. Wichtig dafür ist auch der Aufbau einer Open Source Community. Und wenn wir weiter wachsen wollen müssen wir uns als Technologieverein auch mit der Verifikation und Zertifizierung unserer Entwicklungen befassen. Daher arbeiten wir aktuell an einem Zertifizierungsprozess.

Hat sich die IDTA damit vollkommen vom VDMA und ZVEI, die ihre Gründung massiv vorangetrieben haben, abgenabelt?

Meik Billmann: Wir haben uns sicherlich ein Stück weit freigeschwommen, arbeiten natürlich aber weiterhin mit beiden Verbänden eng zusammen, schließlich gehören sie zu unseren Gründungsmitgliedern und sind beide im IDTA-Vorstand vertreten. Aber die enge Zusammenarbeit beschränkt sich nicht nur auf die Organe der IDTA, es gibt ganz konkrete Projekte, bei denen wir eng kooperieren, wie etwa den *Product Carbon Footprint*, *Fluidtechnik 4.0*, *Antrieb 4.0* oder *Sensorik 4.0*. Das läuft in den Communities der Fachverbände, wo dann zusammen mit der IDTA auch die Teilmodelle entstehen. Neben dem VDMA und dem ZVEI dürfen wir den Bitkom und die Plattform Industrie 4.0 nicht vergessen. Der Bitkom ist Gründungsmitglied und die Plattform Industrie 4.0 hat ebenfalls große Anteile an der Entstehung der IDTA. Zu beiden Organisationen bestehen kurze Wege.

Mosch: Auf der anderen Seite wollen wir uns natürlich auch nicht zu weit von diesen Verbänden und Organisationen entfernen. Eine gewisse Distanz ist, gerade wenn es um die internationale Sichtbarkeit und Akzeptanz geht, sicherlich wichtig, aber wir brauchen die Komponentenhersteller aus der Elektrotechnik genauso wie die Integratoren und Anwender aus dem Maschinen- und Anlagenbau. Gerne vergessen werden an dieser Stelle die Software-Anbieter, die für uns sehr wichtig sind, weil sie dabei helfen, die Asset Administration Shell zu skalieren und in die KMU zu bringen. Erst dadurch wird es möglich, die Technologie über Software einzukaufen und in bestehende Infrastrukturen einzubetten.

Dennoch sprechen alle genannten Verbände Deutsch. Reicht das aus, um die AAS auch international zu etablieren?

Mosch: Am Ende des Tages vertreten die genannten Organisationen internationale agierende Konzerne und KMU. Dennoch ist es für uns ebenso wichtig, an internationale Initiativen anzudocken, wie etwa die *Alliance Industrie du Futur*, das *Digital Twin Consortium* oder die *Open Industry 4.0 Alliance*. Gleichwohl ist es auch so, dass die IDTA mittlerweile auf europäischer Ebene agiert. Und auch wenn viele Mitgliedsfirmen aus dem DACH-Raum stammen, gibt es inzwischen kaum ein Gremium mehr, das nicht auf Englisch kommuniziert. Neben Europa wird vor allem Südkorea zu einer internationalen Säule der IDTA, wir sind inzwischen auch mit dem *Korea Smart Manufacturing Office (KOSMO)* vernetzt. Auch aus Japan bekommen wir zunehmend konkrete Anfragen.

Billmann: Die Internationalisierung schreitet nach wie voran. Fast jedes dritte neue Mitglied kam 2022 zwar aus Europa, aber nicht aus dem deutschsprachigen Raum. Darüber hinaus stehen wir am Anfang einer Kooperation mit der NAMUR, wo ja ebenfalls auch internationale Unternehmen unterwegs sind.

Treten gerade die internationalen Firmen aufgrund der AAS bei oder geht es eher um die Meta-Ebene, also den Digital Twin?

Mosch: Eine gute Frage. Letztendlich ist der Digital Twin das große Ziel, das alle verfolgen und auf das sich eben auch alle einigen können. Es hat sich auch bereits im Verständnis durchgesetzt, dass es verschiedene Formen des Digital Twins entlang der Wertschöpfungskette gibt und sogar branchenspezifische Interpretationen davon. Die Interoperabilität ist daher im besonderen Fokus, weshalb es im Kernmodell einen Standard braucht. Und dieser Kernstandard ist die Asset Administration Shell.

Den die IDTA dann über die standardisierten Teilmodelle nutzbar macht?

Mosch: So ist es. Die Teilmodelle der AAS sind elementar wichtig dafür. Erst sie machen Applikationen des Digital Twin in der Praxis möglich. Deswegen ist die IDTA auch so stark auf die Standardisierung der AAS und ihrer Teilmodelle fokussiert. Im Zusammenspiel gelingt dadurch eine medienbruchfreie digitale Dokumentation der gesamten Wertschöpfungskette. Vor zehn Jahren zu Beginn von Indus-

trie 4.0 wurde über Cyber-physical Systems geredet. Heute ist das der Digital Twin und die AAS der entsprechende Standard.

Für die es inzwischen 27 Teilmodelle gibt. Wie stellen Sie sicher, dass sich die bestehenden und neu hinzukommenden Modelle zukünftig nicht überschneiden?

Mosch: Die aktuell 27 Modelle werden sicherlich auch ein Stück weit parallel entwickelt, aber gerade in Zukunft wird es so sein, dass klar ist, was in welchen Teilmodellen schon vorgedacht und festgelegt worden ist und was noch fehlt. In diesem Zusammenhang wichtig ist vor allem Transparenz. Wir haben bereits ein Dashboard implementiert, auf dem alle aktuellen Entwicklungen zu finden sind. Diese AAS-Landkarte ist auch verschlagwortet und durchsuchbar.

Aber es werden ja nicht alle Teilmodelle ausschließlich von der IDTA entwickelt werden, oder?

Billmann: Das ist ein wichtiger Punkt, denn natürlich werden Teilmodelle erstellt, die nicht von uns koordiniert werden. Um hier Transparenz zu schaffen, wird es in Zukunft einen Partner-Hub geben, der die externen AAS-Projekte listet. Zusätzlich haben wir, wie andere Nutzerorganisationen und Vereine auch, Harmonisierungsgruppen gebildet, wo die Entwicklungen aufeinander abgestimmt werden. Nicht vergessen dürfen wir auch unsere Mitglieder, die eine Art Radarfunktion einnehmen. Aber das sind alles keine neue Erfindungen, sondern Erfahrungen aus den Verbänden, die wir hier aufgreifen.

Werden denn z. B. US-amerikanische oder chinesische Firmen eine deutsche Organisation, bei der sie ihre Teilmodelle registrieren müssen, überhaupt akzeptieren?

Billmann: Wir versuchen durch eine starke Internationalisierung dem Anschein einer rein deutschen Organisation entgegenzuwirken. Letztendlich bieten wir allen Unternehmen die Dienstleistung, darauf zu achten, dass Teilmodelle kompatibel mit dem AAS-Metamodell sind und dass sie untereinander konsistent und interoperabel sind. Dafür liefern wir einen Rahmen. Dabei versuchen wir maximal transparente Prozesse zur Verfügung zu stellen. Auch US-amerikanische oder chinesische Firmen brauchen eine *Single Source of Truth* für die Verwaltungsschale, die ihren Entwicklungen Investitionssicherheit gibt.

Steht das nicht in starkem Kontrast zu vernetzten Ökosystemen, die heute allorts aufgebaut werden?

Mosch: Ja, das tut es in gewisser Weise schon. Ein föderales und vernetztes Ökosystem ist sicherlich für die Entwicklung von Teilmodellen gut. Es braucht aber am Ende dieser Entwicklungen diesen einen Ort, an dem alles zusammenläuft. Die Qualität dieser Entwicklungen muss über die Mechanismen Registrierung, Standardisierung und Zertifizierung sichergestellt werden. Das ist unser Auftrag. Ein föderales und vernetztes Ökosystem wäre hier nicht zielführend.

Billmann: Wir müssen in diesem Fall einen Unterschied machen zwischen dem Entwickeln und Registrieren von Teilmodellen. Es wird sicherlich welche geben, die in einer internationalen Norm verankert werden, genauso aber auch Teilmodelle, die lediglich bei uns registriert sind und den dritten Fall von firmenspezifischen Teilmodellen, die nur innerhalb eines Unternehmens oder festgelegten Partnern genutzt werden. Es können also auch Nichtmitglieder Teilmodelle den IDTA-Strukturen folgend erstellen und offiziell registrieren. Wir sind ein gemeinnütziger Verein, der keine kommerziellen Interessen verfolgt und alles frei zur Verfügung stellt.

Warum taucht die AAS dann im Namen der IDTA nicht auf, sondern nur der Digital Twin?

Billmann: Der Ausgangspunkt der Gründung der IDTA war, dass eine Nutzerorganisation für die Verwaltungsschale gesucht wurde. Wir hatten gar nicht den Anspruch, den Grundstein für den Digitalen Zwilling setzen zu wollen, haben dann aber recht schnell gemerkt, dass wir mit dieser engen Fokussierung international nicht weit kommen werden. Deswegen heißt die IDTA heute eben nicht „Nutzerorganisation Verwaltungsschale“. Wir haben den Digital Twin im Namen, da die Industrie auf die AAS als Grundlage für den Digitalen Zwilling setzt.

Dennoch zeigt ja z. B. der Beitritt von Microsoft kurz vor der HANNOVER MESSE, dass auch internationale Software-Konzerne die AAS beim Digital Twin für das Mittel der Wahl halten. Was bedeutet das für das Potenzial der Verwaltungsschale?

Mosch: In unseren Augen ist dies erstmal eine Bestätigung unserer Einschätzung, dass die AAS riesiges Potenzial hat.

Kooperation zwischen der IDTA und dem atp magazin

Neben vielen weiteren Industrieverbänden ist die IDTA seit August 2022 auch offiziell Kooperationspartner des atp magazin. In loser Reihenfolge wer-

den Sie daher in Zukunft in unseren Heften immer wieder exklusive Berichte, Use Cases oder Fachbeiträge der IDTA und ihrer Gremien lesen können.

„Die Interoperabilität von Digital Twins steht im Fokus, weshalb es im Kernmodell einen Standard braucht. Und dieser Kernstandard ist die AAS.“

Auch wenn es aktuell teilweise noch schwierig ist, den exakten Mehrwert zu beziffern. Fakt ist allerdings, dass die AAS immer breitere Anwendungsszenarien findet und extrem hohe Flexibilität in diesen Szenarien mit sich bringt. Diese Fähigkeit macht sie aus Sicht vieler IT-Firmen zu dem reifsten Modell bezogen auf den Digitalen Zwilling. Und gerade diese Software-Unternehmen, die wir verstärkt als Mitglieder gewinnen können, helfen uns natürlich enorm dabei, die VWS in viele Branchen und Industrien zu bringen und ganze Wertschöpfungsnetze abzubilden.

Kann die AAS damit zu einem neuen „Made in Germany“-Gütesiegel beitragen, das eben nicht hardwaregetrieben ist?

Mosch: Aus Sicht der IDTA wird auf die Herkunft der VWS kein besonderer Wert gelegt. Unsere Argumentation basiert auf der Technik, dem Nutzen und dem Potenzial. Sobald wir das mit einer bestimmten Nation verbinden, und zwar egal welcher, kommt eine politische Komponente ins Spiel. Das würde uns bei der eben angesprochenen Internationalisierung der AAS auf die Füße fallen. Unser Ziel ist es, die europäische Industrie zu befähigen, softwaregetriebene Entwicklungen voranzutreiben. Das beinhaltet auch z. B. einen freien Datenfluss über den Shopfloor, aber auch über Unternehmens- und Landesgrenzen hinaus.

Billmann: Das Label „Made in Europe“ würde daher aus unserer Sicht besser passen, besonders wenn es um die Regulatorik des gesamten Kontinents geht. Da helfen wir auch gerne mit, weil wir mit der Verwaltungsschale über

Use Cases wie etwa den *Product Carbon Footprint* und den *Digital Product Passport* auch für die EU Vorteile bieten können, die sich interkontinental exportieren lassen.

Ist das auch ein langfristiges Ziel der IDTA oder wie sieht ihre Roadmap für die kommenden Jahre aus?

Billmann: Wir sind derzeit auf Wachstumskurs und die aktuellen Rahmenbedingungen dafür sind, trotz aller geopolitischen Unsicherheiten, aktuell sehr gut. Die AAS ist gesetzt als Datencontainer für Catena-X, in zahlreichen Umsetzungsprojekten der Kopa 35c spielt die AAS eine zentrale Rolle und wir arbeiten daran, dass sie die technische Lösung für wichtige europäischen Richtlinien sein wird. Wir planen derzeit, gemeinsam mit der Plattform Industrie 4.0 den „Datenraum für Jedermann“, einen professionell betriebenen Datenraum, in dem jede Organisation ihre Digitalen Zwillinge unter realen Bedingungen testen und marktreif machen kann. Darüber hinaus werden wir mit großen End-Usern aus unserer Mitgliedschaft Projekte starten, in denen die AAS im realen Produktionsumfeld zum Einsatz kommt. Da kommen spannende Projekte auf uns zu, von denen wir gerne hier berichten.

Mosch: Zudem werden wir unsere Zertifizierungsmöglichkeiten für die AAS anbieten, Forschungsprojekte in unserem Partner-Hub anbinden und hunderte neue Teilmodelle veröffentlichen. Dies wird hoffentlich weitere Mitglieder anziehen, europäische und internationale gleichermaßen. Ich denke in drei Jahren werden wir uns als Nutzerorganisation für den Digitalen Zwilling fest etabliert haben.

ZUR PERSON

Meik Billmann

Der studierte Diplom-Elektrotechniker Meik Billmann stieg nach fast sechs Jahren bei der MTS Sensor Technologie GmbH 2014 beim ZVEI als Project Engineer Industrie 4.0 ein und verantwortete im Fachverband Automation die Themen Industrie 4.0, Industriesteuerungen und Sensorik. Seit April 2021 ist er offizieller Geschäftsführer der IDTA.

Dr. Christian Mosch

Nach seiner Promotion an der TU Darmstadt arbeitete Christian Mosch dort zunächst als Wissenschaftlicher Mitarbeiter, bevor er im Mai 2014 zum VDMA wechselte. Dort übernahm er verschiedene Funktionen und war zuletzt als Projektmanager „Interoperabilität und OPC UA“ beschäftigt. Seit April 2021 ist er offizieller Geschäftsführer der IDTA.

Verwaltungsschale: Production-as-a-Service mit der VWS

Chris Urban, Alexander Belyaev, Christian Diedrich

Kundenindividuelle Produkte der Losgröße 1, stärkere Flexibilisierung von Fertigungs- und Planungsprozessen, geringere Volatilität von Supply Chains und gleichzeitig faire Wettbewerbsbedingungen zwischen den Akteuren – das sind typische Anforderungen an die moderne Produktion im Sinne von Industrie 4.0. Ein interessanter Anwendungsfall, der scheinbar all diese Anforderungen berücksichtigt, ist Production-as-a-Service (PaaS), auch Manufacturing-as-a-Service oder Shared Production genannt. Darunter versteht man im Kern die automatisierte Ausschreibung von Produktionsaufträgen über Unternehmensgrenzen hinweg unter autonomen I4.0-Komponenten in einem digitalen I4.0-Ökosystem.

Welche Vorteile ergeben sich aus PaaS? Wenn eine Maschine ausfällt und kein lokaler Ersatz verfügbar ist oder eine benötigte Produktionsfähigkeit im eigenen Maschinenpark grundsätzlich nicht vorhanden ist, muss in einem aufwändigen bürokratischen Prozess kurzfristig häufig auf externe Lohnfertiger zurückgegriffen werden. Ausschreibung aufsetzen, Details klären, auf Angebote warten. Zeit- und kostenintensive Interaktionen per Mail und Telefon zwischen Mitarbeiter:innen sind hierfür notwendig und könnten durch PaaS hinfällig werden. Im umgekehrten Fall, wenn freie Fertigungskapazitäten verfügbar sind, können diese agil zur Verfügung gestellt werden, um eine hohe Auslastung der eigenen Produktion zu erreichen.

Abstrakt betrachtet gibt es zwei Rollen zwischen den Interaktionspartnern in diesem Anwendungsfall: der *Service Requester* (SR), der eine Dienstleistung benötigt und anfragt (der Akteur, dem eine Fertigungskapazität fehlt), sowie der *Service Provider* (SP), der eine Dienstleistung anbietet (der Akteur, der freie Kapazitäten hat). Diese Rollen ordnen sich in der Automatisierungspyramide z. B. in die MES-Ebene ein.

Aber auch smarte Produkte und Maschinen, im Sinne der Plattform Industrie 4.0 als I4.0-Komponenten bekannt, sind dazu in der Lage, wenn diese mit einem Digitalen Zwilling ausgestattet sind. Eine standardisierte Umsetzung des Digitalen Zwillings ist die Verwaltungsschale [1]. Mittels Interaktionsprotokollen und Agententechnologien kann eine Erweiterung zur proaktiven Verwaltungsschale, die aus PaaS abgeleitete Anforderung nach Autonomie erfüllen [2–4].

Um Interaktionen im Sinne der PaaS zu ermöglichen, ist eine hohe Interoperabilität zwischen den Interaktionspartnern in Bezug auf verschiedene Aspekte mittels folgender Vereinbarungen sicherzustellen (s. Abbildung 1):

- » Gemeinsame Sprache
- » Gemeinsames semantisches Verständnis für die Beschreibung der Dienstleistung aus Anforderungs- und Zusicherungssicht
- » Gemeinsame Infrastruktur für den Austausch der Informationen

Eine gemeinsame Sprache

Als gemeinsame Sprache bietet sich die sogenannte I4.0-Sprache an. Die VDI-Richtlinie 2193 definiert einen dreiteiligen Regelsatz für die I4.0-Sprache, bestehend aus Nachrichtenstruktur, Interaktionsprotokollen und Vokabular [5]. Die Struktur der Nachrichten ist in VDI 2193-1 beschrieben. Jede Nachricht besteht aus einem Frame und einem Interaktionselement. Der Frame enthält Attribute, die zum einen der Identifizierung (z. B. Sender, Empfänger) und zum anderen der Kontextualisierung dienen (z. B. Nachrichtentyp, ConversationID). Das Interaktionselement enthält die Informationsdetails, die mit der Nachricht ausgetauscht werden sollen. Sie sind syntaktisch und teilweise semantisch standardisiert, da sie auf dem Metamodell der Verwaltungsschale beruhen. Sie enthalten z. B. *Submodels* und *SubmodelElements*. Die Interaktionsprotokolle definieren den Ablauf eines Dialogs in Form von Nachrichtensequenzen zwischen zwei oder mehreren I4.0-Komponenten. Ein bereits definiertes Interaktionsprotokoll ist das Ausschreibungsverfahren nach VDI 2193-2. Dieses legt die einzuhaltende Nachrichtensequenz fest, die notwendig ist, um eine Dienstleistung zwischen einem SR und einem SP zu verhandeln.

Das Konzept der I4.0-Sprache ermöglicht es zur Realisierung weiterer Anwendungsfälle neben PaaS, beliebige Interaktionsprotokolle zu definieren und umzusetzen. Das Vokabular der Sprache wird durch Datenstandards wie ECLASS oder IEC CDD, durch Submodel Templates und OPC UA Companion Specifications oder auch herstellerepezifisch festgelegt.

Beschreibung der Dienstleistung

Eine Grundlage für PaaS ist die Annahme, dass es möglich ist, die Verwendung von Produktionsressourcen (einzelnen Maschinen oder gar Smarten Fabriken) als ihre „Fähigkeit“ (eng.: *Capability*) zu beschreiben. Eine Capability beschreibt die von einem Asset zu erfüllende Funktion und klärt, wozu ein Asset geeignet ist und definiert seine Verwendung. In einer Arbeitsgruppe der IDTA wird zurzeit ein von Fachexpert:innen konsolidiertes Submodel Template für die semantisch eindeutige Beschreibung von Capabilities definiert.

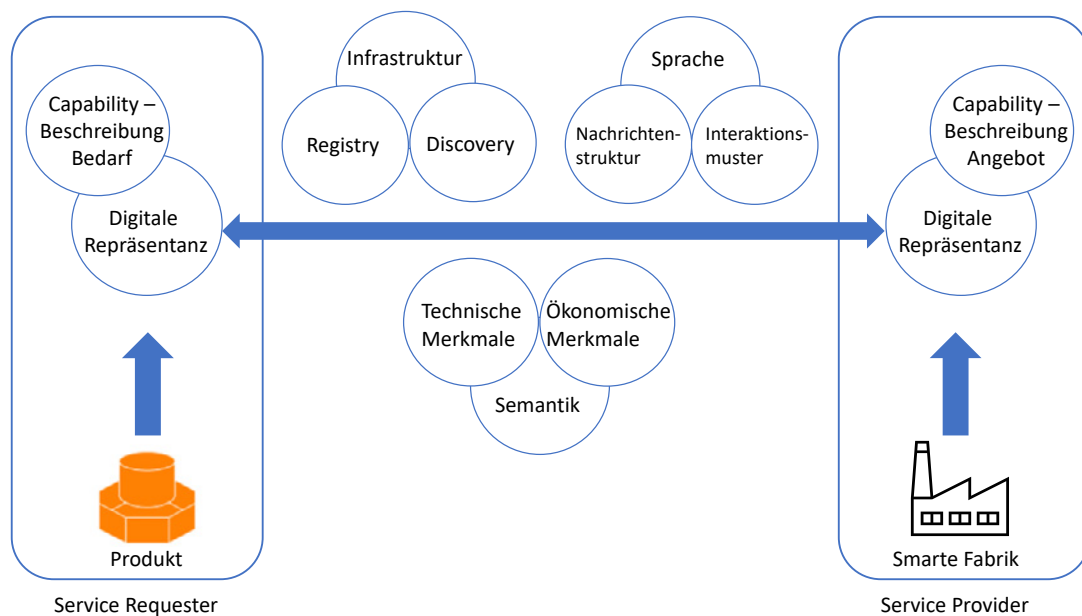


Abbildung 1: Bausteine, die für die Umsetzung von PaaS notwendig sind.

Da PaaS eine Art der automatisierten Geschäftsprozesse darstellen, sind zusätzlich zu den technischen Capabilities auch kommerzielle Merkmale und Aspekte maßgeblich. Dazu zählen etwa die Angabe des Ortes und der Zeit der Erbringung der Fähigkeiten, fachliche Zertifizierungen, Arbeitsbewertungen durch bisherige Geschäftspartner etc. Die um die kommerziellen Aspekte ergänzte Capability bildet die Beschreibung einer Dienstleistung (s. Abbildung 2).

Für das Gelingen der PaaS empfiehlt es sich, eine einheitliche und möglichst Capability-unabhängige Beschreibung von kommerziellen Aspekten von Dienstleistungen zu definieren und darauf aufbauend ein konsolidiertes Submodel Template zu verabschieden.

Die gemeinsame Infrastruktur

Die I4.0-Sprache sowie die Verwaltungsschale sind wichtige Konstrukte, um die Vision der PaaS zu ermöglichen, reichen jedoch dafür allein nicht aus. Der andere wichtige Baustein ist die gemeinsame Infrastruktur, damit sich die SR und SP, bzw. ihre Verwaltungsschalen im Netzwerk finden und firmenübergreifend Nachrichten austauschen können.

Die entsprechenden Konzepte der Plattform Industrie 4.0 befinden sich noch in der Entwicklung und werden oft auf eine Diskussion rund um Registry und Authentifizierung reduziert. Die diskutierten Konzepte basieren auf klassischen zentralisierten Ansätzen, die die unabhängigen Akteure zusammenbringen und die Registrierung, das Identitätsmanagement, die Discovery- und Marktplatzfunktionalitäten übernehmen [6].

Der zentralisierte Ansatz ist ein valider erster Schritt zur kurzfristigen Realisierung von Industrie-4.0-Anwendungsszenarien. Jedoch gehen die langfristigen Visionen der Industrie 4.0 vom dezentralen Charakter zukünftiger digitaler Ökosysteme aus. Diese sollen keine Komponenten beinhalten, die eine zentrale Monopolstellung gegenüber anderer Ökosystem-

Teilnehmer einnehmen können, d. h. zentrale Vermittlerkomponenten, die als Datenkraken agieren können, sind zu vermeiden.

Die von den Autoren dieses Artikels durchgeführte Literaturrecherche und die in den relevanten Fachgremien geführten Diskussionen zeigen, dass es in der Community kein einheitliches Konzept gibt, wie die angestrebte „Dezentralität“ der I4.0-Infrastruktur zu gestalten ist. Es lassen sich völlig entgegengesetzte Ansätze für die Gestaltung der dezentralen Infrastruktur identifizieren. Diese reichen von der Weiterentwicklung der zentralisierten Ansätze, nämlich der Annahme, dass die Unternehmen ihre eigenen unabhängigen firmenspezifischen Plattformen (z. B. für Registry, Discovery, Authentifizierung etc.) aufbauen bis zu Ansätzen, die für den Aufbau von hochdynamischen ad hoc Kooperationsbeziehungen in P2P-Netzwerken ausgelegt sind und gänzlich ohne separate Instanzen auskommen, die Registry- und Discovery-Funktionalitäten bereitstellen. Aus Sicht der Autoren bietet diese Tatsache ausreichend Motivation, um in weiteren Forschungsaktivitäten Taxonomie und Gestaltungsprinzipien von dezentralen Infrastrukturen herauszuarbeiten und einzelne Typen auf die auftretenden Ausprägungen und Wechselwirkungen im Kontext von PaaS zu diskutieren [7].

Deutschlandweiter Demonstrator

Für die Überführung der PaaS in die industrielle Praxis wird im Projekt „VWS vernetzt“ ein deutschlandweiter Demonstrator aufgebaut, mit dem Ziel ein VWS-basiertes I4.0-Ökosystem zu etablieren. Die Produktionsanlagen der Projektpartner, meist typische Demonstratoren, erhalten proaktive Verwaltungsschalen, die diese Anlagen in einem deutschlandweiten I4.0-System als autonome Dienstleister repräsentieren (s. Abbildung 3).

Im I4.0-System gibt es genau einen *Service Requester* – ein Smartes Produkt. Das Produkt ist fiktiv, hat keine spezifische Verwendung und dient als Projektionsfläche für die Fähigkeiten

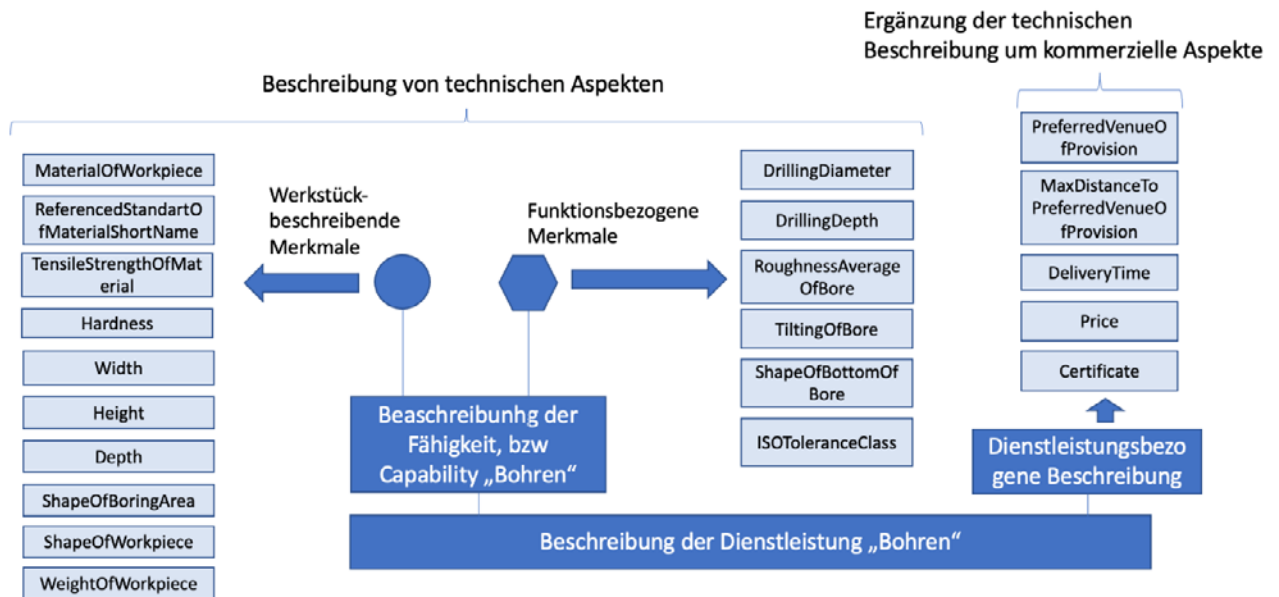


Abbildung 2: Beispielhafte Beschreibung der Dienstleistung „Bohren“.

der Demonstratoren der Projektpartner. Das hat den Vorteil, dass weitere Teilnehmer:innen mit anderen Fähigkeiten sich dem Projekt anschließen können, da das Produkt einfach und flexibel adaptiert werden kann. Um dieses zu produzieren ist eine Menge verschiedener Produktionsfähigkeiten notwendig, z. B. „Bohren“, „Honieren“, „Stempeln“ bis hin zu unterstützenden Fähigkeiten wie „Transportieren“ und „Verpacken“. Der SR kennt die Reihenfolge dieser Fähigkeiten und die Anforderungen, die an diese bestehen. Über eine Webapplikation lässt sich der SR konfigurieren und der Prozess initiieren.

Im I4.0-System gibt es weitere autonome I4.0-Komponenten in der Rolle als *Service Provider*, die durch die Demonstratoren der Projektpartner realisiert werden. Die Verwaltungsschalen der SP kennen die Produktionsfähigkeiten der Demonstratoren, wie z. B. „Bohren“, „Honieren“, „Laserschneiden“, „3D-Drucken“, „Schrauben“, „Verpacken“ usw. und bieten diese den anderen Teilnehmern des digitalen I4.0-Ökosystems als Dienstleistungen an.

Eine getroffene Vereinfachung ist, dass der Produktionsablauf starr im SR des Produkts implementiert ist. Im Sinne einer flexiblen PaaS gibt es noch Forschungsbedarf, wie die Sequenzen der geforderten Capabilities generisch aus Produktbeschreibungen (z. B. aus CAD-Daten) erstellt werden. Außerdem werden derzeit keine geometrischen Daten in den Dienstleistungsbeschreibungen integriert. Das ist aber zwingend notwendig, damit die Positionen der Dienstleistungen am Werkstück verortet werden können.

Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt VWS vernetzt bietet den Projektpartnern eine einzigartige Möglichkeit, die entwickelten Digitalen Zwillinge und Infrastrukturelle Komponenten in unterschiedlichen Demonstratoren zusammenzuschalten. So bauen wir zusammen ein erstes VWS-basiertes lauffähiges offenes digitales I4.0-Ökosystem auf und können die Potenziale der vernetzten dezentralen Produktion erkunden, daraus ergebende Chancen und neue Geschäftsmodelle ableiten.

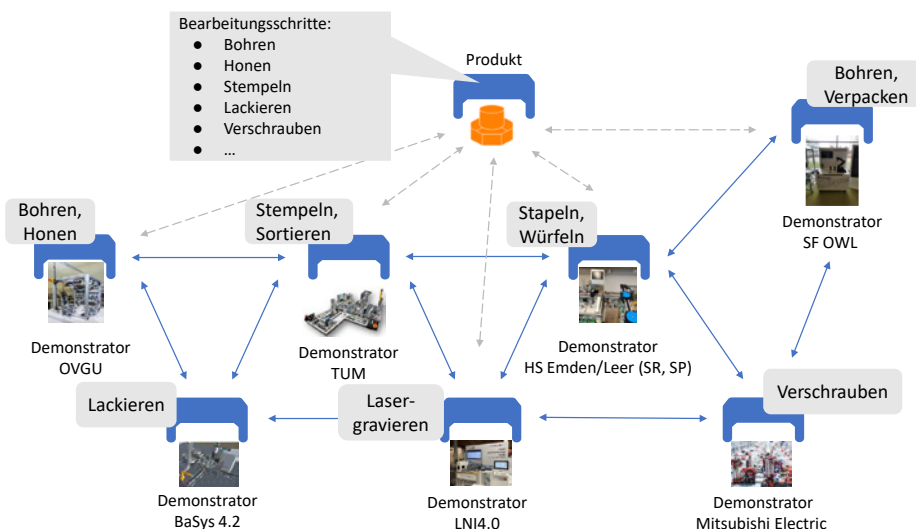


Abbildung 3: Szenario des deutschlandweiten Demonstrators.

Werden Sie Teil des Projektes und gestalten Sie Industrie 4.0 und Maschinen Economy und offene Systeme mit uns!

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2021). Details of the Asset Administration Shell: Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01). Abgerufen von: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part_1_V3.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- [2] Fay, A., Gehlhoff, F., Seitz, M., Vogel-Heuser, B., Baumgärtel, H., Diedrich, C., Lüder, A., ... Verbeet, R. (2019). Agenten zur Realisierung von Industrie 4.0. VDI-Statusreport, Düsseldorf, VDI Verlag.
- [3] Wein, S., Dassen, Y., Pallasch, C., Miny, T., Storms, S., & Brecher, C. (2021). Konzept und Anwendung Autonomer Industrie 4.0-Komponenten auf Basis Agenten-basierter Ansätze. *at-Automatisierungstechnik*, 69(6), 430-441. doi: 10.1515/auto-2020-0117.
- [4] Belyaev, A., Diedrich, C. (2019). Aktive Verwaltungsschale von I4.0-Komponenten: Erscheinungsformen von Verwaltungsschalen. In VDI-Berichte, vol. 2351, Automation 2019, VDI Wissensforum GmbH, Ed., 1st ed., Düsseldorf, VDI Verlag.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2018). I4.0-Sprache: Vokabular, Nachrichtenstruktur und semantische Interaktionsprotokolle der I4.0-Sprache. Abgerufen von: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-sprache.html>
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2021). Details of the Asset Administration Shell: Part 2 – Interoperability at Runtime – Exchanging Information via Application Programming Interfaces (Version 1.0RC02). Abgerufen von: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part_2_V1.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [7] Belyaev, A., Hasler, J., Urban, C., Diedrich, C. (2022). Architektonische Gestaltungsprinzipien einer dezentralen Industrie 4.0 - Infrastruktur: Taxonomie von dezentralen Registry und Discovery. In Ulrich Jumar, Christian Diedrich (Hrsg.): EKA 2022 - Entwurf komplexer Automatisierungssysteme, 17. Fachtagung.

Chris Urban, M.Sc.

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
39106 Magdeburg
chris.urban@ovgu.de

Alexander Belyaev, M.Sc.

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
39106 Magdeburg
alexander.belyaev@ovgu.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
39106 Magdeburg
christian.diedrich@ovgu.de

AUTOMATIONSWISSEN

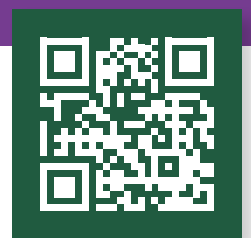


- Künstliche Intelligenz & Robotik
- Cybersecurity
- Simulation & Digital Twin
- Augmented-X
- Industrial Edge & Industrial Cloud
- Wireless Automation

Jetzt ein halbes Jahr unverbindlich testen!

- atp magazin ein halbes Jahr frei Haus
- Exklusive Angebote zu unseren Fachbüchern und Veranstaltungen
- Spannende Fachberichte und Interviews in jeder Ausgabe
- Nach Ablauf der Zeit endet der Bezug automatisch

atp
magazin



Verwaltungsschale: Einsatz in wandelbaren Produktionsanlagen

Stephan Schäfer, Dirk Schöttke, Thomas Kämpfe, Vasil Denkov, Bernd Tauber

Wandelbare Produktionsumgebungen weisen aufgrund ihrer flexiblen Funktionalität und ihrem variablen Anlagendesign eine hohe Komplexität auf. Die Komplexität entsteht u. a. durch die Heterogenität der verwendeten Komponenten, deren Skalierbarkeit, deren Wechselwirkung innerhalb der Systeme, sowie der systemübergreifenden Kommunikation. Einen großen Einfluss auf die Flexibilität und Komplexität der Anlage haben u. a. Softwarelösungen in der Umgebung von Automatisierungssystemen. Vor deren Einsatz müssen sie für den Nachweis der geforderten Qualität, umfangreiche Testszenarien durchlaufen. Mögliche Diskrepanzen zu erwarteten Funktionen dürfen nicht erst im Betrieb von Anlagen identifiziert werden, sondern sollten möglichst im Vorfeld erkannt werden.

Dies setzt voraus, dass mit der Aufbereitung der Anforderungen deren Testszenarien in einer maschinenlesbaren und interpretierbaren Form bereitgestellt und durchlaufen werden. Die Methode der modellbasierten Testfallgenerierung in der Automatisierungstechnik bietet hier eine Möglichkeit, die Qualität der Anlagenbestandteile zu bewerten [1]. In [2] wird eine Methode des anforderungsbasierten Tests komplexer Automatisierungssysteme vorgestellt.

Motivation

Für Standardlösungen haben sich in der Softwareentwicklung isolierte Tests, mit der Eigenschaft der Reduktion der Komponentenkomplexität, etabliert. Hierfür benötigen sie einen zuverlässigen Engineering-Prozess, der reproduzierbare Ergebnisse bereitstellt. Das bedeutet, dass bereits in der Phase der Anforderungsermittlung die erforderlichen Testszenarien künftiger Anlagen abgeleitet werden müssen. In vielen Fällen ist jedoch eine klare Spezifikation der Testszenarien nicht immer ableitbar. Hieraus ergibt sich trotz der Möglichkeit einer virtuellen Inbetriebnahme eine Lücke bei der Integration von Komponenten. Diese wird mit wachsender Komplexität der Anlagen zunehmend verstärkt. Dies ist unter anderem wegen der Vielzahl von Schnittstellen und deren Spezifikation eine Herausforderung.

Ist diese Lücke mit den zur Verfügung stehenden technischen Lösungen beherrschbar? Im Grunde gibt es einen umfangreichen „Werkzeugkasten“, der über eine möglichst standardisierte Schnittstelle angewendet werden kann. So bieten Verwaltungsschalen (nachfolgend „VWS“ genannt) mit ihren Schnittstellen eine Möglichkeit der Vereinfachung und Optimierung der Testprozesse. Der Einsatz standardisierter VWS erlaubt einen iterativen Ansatz über den gesamten Lebenszyklus der Anlage. Mit der Standardisierung von Teilmodel-

len der VWS können entsprechende Informationen jederzeit bereitgestellt werden.

Verwaltungsschalen – Eine Einordnung

Eine VWS ist die standardisierte digitale Repräsentanz eines physischen Gegenstandes, dem sogenannten Asset [3]. Aus diesem Grund lässt sich die VWS auch als ein digitales Modell für einen physisch vorhandenen Gegenstand bezeichnen, welches basierend auf Metadaten als maschinenlesbare Selbstbeschreibung der entsprechenden physikalischen oder logischen Komponente dient. Gemäß dem Diskussionspapier: „Verwaltungsschale in der Praxis“ [4] besteht das Informationsmodell einer VWS aus den folgenden Elementen (Auszug):

- » Metainformationen zur Verwaltungsschale, Asset, Teilmodellen, etc.,
- » Asset-unabhängigen und Asset-spezifischen Teilmodellen.

Dabei können Teilmodelle je nach Sicht bestimmte Aspekte des Assets abbilden und sowohl statische als auch dynamische bzw. ausführbare Elemente beinhalten.

Testumgebung – Einordnung und Strategien

Während das RAMI-4.0-Modell zu einer Komplexitätsreduktion führt und die wichtigsten Aspekte der Industrie-4.0-Vision in der Form einer Schichtenarchitektur veranschaulicht, beschreibt es keine Methoden zur Validierung der korrekten Funktionsweise der bestehenden Anlagenressourcen. Jedoch können nur mit einem ganzheitlichen Ansatz der Qualitätssicherung in der Softwareerstellung und Testung Fehlfunktionen vermindert werden [5]. Der Zeitpunkt der Fehlererkennung ist wesentlich hinsichtlich des Aufwandes der Fehlerkorrektur. Je später Fehler in der Systemumgebung erkannt werden, desto aufwendiger ist deren Beseitigung. Es müssen dementsprechend Lösungen zur Reduzierung des Testaufwandes, der effektiven Gestaltung der Testdurchführung und mögliche Kriterien der Priorisierung berücksichtigt werden. Mit VWS können hierzu zeitnah die erforderlichen Informationen bereitgestellt werden. Um bspw. zeitnah auf Systemänderungen reagieren zu können, müssen Teilsysteme und Komponenten möglichst automatisiert die erforderlichen Testszenarien durchlaufen. Hierfür ist die variable Abstimmung des Testszenarios mit den gestellten Anforderungen ein geeigneter Ansatz.

Damit eine automatisierte Testdurchführung ohne zusätzliches Engineering erfolgen kann, sind ergänzende Anforderungen an die Umgebung zu erfüllen. Eine Anforderung ist die

lose Kopplung der VWS untereinander unter Verwendung definierter Schnittstellen. Zudem wäre eine automatisierte Erzeugung von VWS als Repräsentanten von Assets sinnvoll.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lassen sich automatisierte Tests bei jeder Änderung mit überschaubarem Aufwand durchführen, so dass ein niederschwelliger Einstieg in die Testung von Komponenten möglich ist. Eine VWS kann zudem einen Koordinator für die Testscenarien, welcher den Testprozess koordiniert und protokolliert, repräsentieren. Der Testprozess sollte folgende Ziele berücksichtigen (Auszug):

- » Verifikation und Validierung von Komponenten und Anlagen
- » Qualitätssicherung im operativen Betrieb
- » Zertifizierung von Verwaltungsschalen, Submodellen und Funktionalitäten zum Zweck der Wiederverwendbarkeit
- » Evaluierung von Anlagenkomponenten auf Basis spezifischer Anwendungsszenarien
- » Protokollierung von Komponentenverhalten

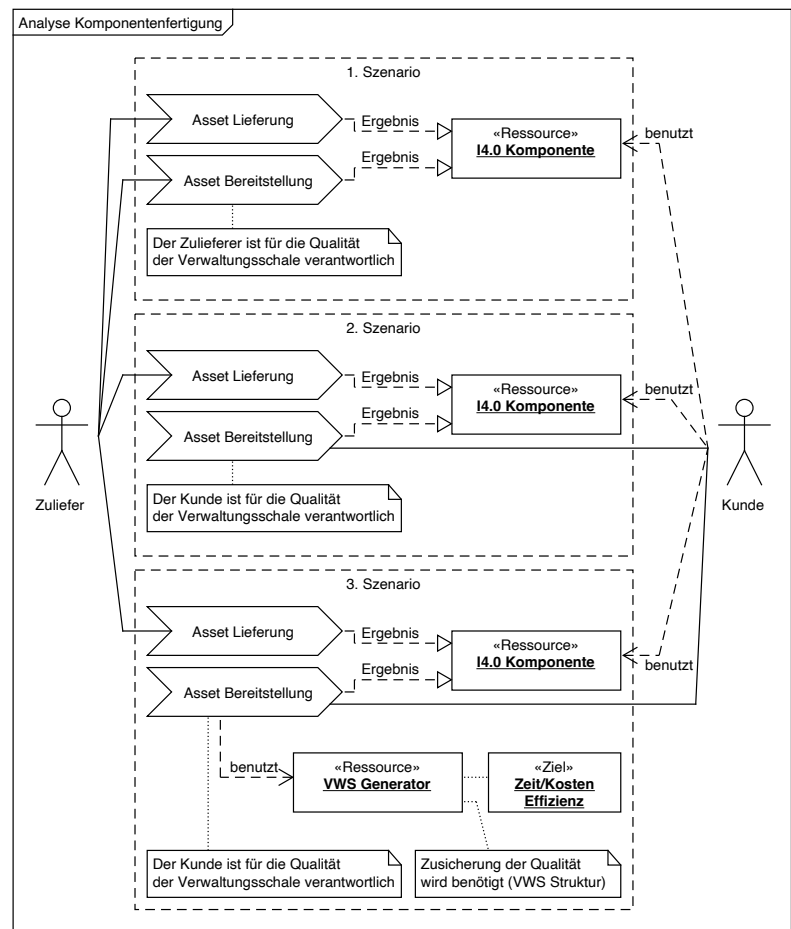


Abbildung 1: Beispielszenarien der VWS-Erstellung.

Voraussetzungen zum Testen

Um zu verifizieren, ob die gestellten Anforderungen an die wandelbare Umgebung vollständig und widerspruchsfrei erfüllt werden, sind entsprechende formalisierte Testszenarien notwendig. Für das semi- oder vollautomatisierte Testen ist ein geeigneter Engineering-Prozess erforderlich. Dieser beginnt mit einer Anforderungsanalyse. Das Ziel des *Requirement Engineerings* liegt in der Spezifikation des konkreten Verhaltens der Anlagenkomponenten in Zusammenhang mit dem benötigten Anwendungsfall. Die zum Verhalten korrespondierenden Voraussetzungen müssen ebenfalls spezifiziert und quantisiert werden, damit sie messbar sind. Der erste Schritt liefert als Ergebnis eine Anforderungsspezifikation, die das konkrete Verhalten der zu integrierenden Ressourcen detailliert beschreibt. Zur Automatisierung des Engineering-Prozesses, sowie als Voraussetzung für die sich anschließenden Phasen, ist eine maschinenlesbare Form der Anforderungslisten und formalisierten Testszenarien erforderlich. Ein beispielhaftes Verfahren für eine solche Formalisierung auf Basis von UML und einer *Requirement Description Language* ist in [6] vorgestellt. Hier werden aus den formalisierten Anforderungen mithilfe eines Engineering-Werkzeugs die entsprechenden Fähigkeiten abgeleitet.

Mögliche Beispielszenarien

Da der beschriebene Engineering-Prozess als Konzept für die Realisierung wandelbarer Industrieanlagen dienen kann, werden im Folgenden drei typische Szenarien (s. Abbildung 1) zur Bereitstellung einer VWS betrachtet.

Hier wird in 3 Typen von VWS auf Basis eines einheitlichen Informations-Metamodells unterschieden. Der Typ 1 beinhaltet eine passive VWS mit Asset-Beschreibung. Der Typ 2 stellt eine reaktive Form dar, die neben der Asset-Beschreibung auch einen Kommunikationskanal beinhaltet. Erst die proaktiven VWS des Typs 3 ermöglicht eine selbstständige Kommunikation zwischen den VWS.

1. Im ersten Szenario werden sowohl das Asset als auch die zugehörige VWS vom Lieferanten aufbereitet, validiert und bereitgestellt. In diesem Szenario ist der Lieferant für die Qualität der VWS und die Übereinstimmung des Produktes mit der entsprechenden Leistungsbeschreibung verantwortlich.
2. Im zweiten Szenario wird vom Lieferanten nur das Asset zur Verfügung gestellt. Die Realisierung der VWS liegt in der Verantwortung des Anwenders und verlangt anwenderseitigen Fach- und Engineering-Aufwand sowie Ressourcen beim Erstellungsprozess. Der Anwender muss auf Basis der vom Lieferanten bereitgestellten technischen Beschreibung eine VWS Typ 1 erstellen und, wenn eine Kommunikationsschnittstelle erforderlich ist, daraus eine Typ 2 VWS erzeugen. Hierfür werden standardisierte Prozesse und eine entsprechende Toolchain benötigt. Nach der Erstellung der VWS ist eine Validierung der syntaktischen Korrektheit, der Vollständigkeit und der Übereinstimmung der VWS mit den Charakteristiken

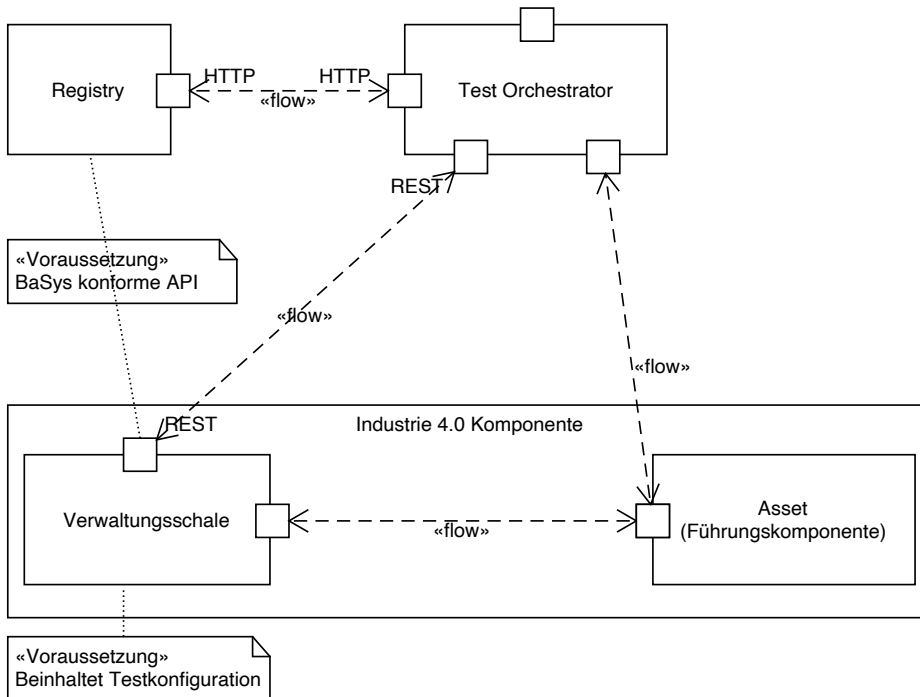


Abbildung 2: Bestandteile der „Registry-basierten Nutzung“.

des Assets erforderlich. Die Qualität der Verwaltungsschalenstruktur lässt sich über Strukturtests nachweisen. Die Spezifikation und die Dokumentation der Testszenarien gehören auch zu den Aufgaben des Integrators, wobei zum Zweck der Qualitätssicherung eine Beschreibung der Testanforderungen erforderlich ist. Aufgrund des hohen Engineering-Aufwands, der mit dem Erstellungsprozess verbunden ist, stellt das zweite Szenario eine ressourcen-ineffiziente Alternative dar.

- Das dritte Szenario basiert auf dem zweiten Szenario und unterscheidet sich in der automatisierten Erstellung aktiver VWS unter Einsatz eines VWS-Generators. Als Basis des Generierungsvorgangs dient die Existenz einer passiven VWS (Beschreibung des Assets), die entweder vom Lieferanten bereitgestellt oder vom Anwender realisiert werden kann. Die Transformation der passiven in eine aktive VWS erfolgt dynamisch, wozu zusätzliche Softwareressourcen erforderlich sind.

Automatisiertes Testen mit Verwaltungsschalen

Im Folgenden werden Teilbereiche einer generischen Methode zum Testen von Anlagenkomponenten vorgestellt. Die Methode setzt den Einsatz eines VWS-Generators voraus. Sie umfasst die Durchführung von Struktur- und Verhaltenstests und kombiniert traditionelle Softwaretestmethoden mit der Verwendung von VWS als digitale Repräsentanten ihrer Assets. Der hier verwendete VWS-Generator wurde im Rahmen des BMBF-Projektes *OpenBasys 4.0* realisiert. Hierfür wird auf der Infrastruktur des *Eclipse Basyx Frameworks* aufgesetzt [7].

In der Aufbereitung der Testumgebung unterscheiden wir zwei Varianten. In der ersten Variante werden die relevanten Informationen zum Testen, soweit sie in der Spezifikation vorliegen, als Submodell mit der VWS bereitgestellt. Mit der zweiten Variante ergibt sich die Möglichkeit, über ein Ticketsystem der jeweili-

gen VWS eine externe Testsequenz mit ihren Parametern zuzuordnen.

Registry-basierte Nutzung

Als Ausgangspunkt für die Testdurchführung und zum Zweck des Aufbaus der Kommunikationsbeziehung zwischen dem Orchestrator und potenziellen Testobjekten wird eine Registry-Komponente eingeführt. Voraussetzung für diese Art der Testdurchführung ist die Integration einer Registry im Produktionsnetzwerk. Die Registry beinhaltet Referenzen zu jeder registrierten und somit für andere Entitäten verfügbaren VWS. Wird eine Kommunikationsbeziehung zwischen dem Orchestrator und der Registry aufgebaut, so kann diese als Auskunftsstelle für proaktive und reaktive Testobjekte verwendet werden. (s. Abbildung 2) Der Testprozess ist somit nur für Komponenten geeig-

net, die durch Typ 2 und Typ 3 VWS repräsentiert werden. VWS des Typs 1 können im Rahmen eines solchen Testprozesses nicht verifiziert werden, da diese über keine Kommunikationsschnittstelle verfügen. Im Rahmen der Testung werden die registrierten VWS und die durch diese repräsentierten Komponenten nacheinander sequenziell verifiziert.

Ticket-basierte Nutzung

Der Ticket-basierte Testprozess ist im Gegensatz zur Registry-orientierten Testung für alle Arten von VWS geeignet. Dabei gelten Tickets als Eingangsinformationen, die sowohl die Testkonfiguration als auch den Zugriffspunkt des Testobjekts beschreiben. Je nach Spezifikation kann ein Ticket als Eintrag in einer relationalen Datenbank oder als Datei der Testlösung zur Verfügung gestellt werden. Für die erste Variante ist eine Schnittstelle erforderlich, damit eine Verwendung von spezifischen Programmiersprachen seitens des Nutzers ausgeschlossen werden kann. Eine weitere Möglichkeit besteht u. a. in der direkten Integration einer Datenbank im Kontext der Softwarekomponente *Test Orchestrator*. Das Ticket jeder passiven VWS kann entweder den Pfad zur AASX-Datei oder die Datei selbst enthalten. Bei jeder aktiven VWS muss die URL des Testobjekts zur Verfügung stehen.

Fazit

Im Beitrag wurde in Auszügen ein Verfahren für die automatisierte Testung von Anlagenkomponenten vorgestellt. Automatisierte Tests lassen sich bei jeder Änderung mit überschaubarem Aufwand durchführen. Es wurde gezeigt, wie dieser systematische Ansatz für das Testen von Anlagen mithilfe eines Generierungsprozesses der VWS durchgeführt werden kann. Hierzu ist u. a. ein automatisierter Abgleich der Datenlage zwingend erforderlich, um die jeweiligen Versionsstände und die erforderlichen Fähigkeiten der Komponenten im Kontext mit dem Anlagenverhalten abgleichen zu können.

Referenzen

- [1] Grochowski, M., Simon, H., Bohlender, D., Kowalewski, S., Löcklin, A., Müller, T., ... Weyrich, M. (2020). Formale Methoden für rekonfigurierbare cyber-physische Systeme in der Produktion. *at-Automatisierungstechnik*, 68(1), 3-14.
- [2] Meinecke, K., Land, K., Jumar, U., Vogel-Heuser, B., Reider, M., & Ziegler, S. (2021). Anforderungsbasierter Test für die Validierung komplexer Automatisierungssysteme. *at-Automatisierungstechnik*, 69(6), 417-429.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022). Details of the Asset Administration Shell - Part 1 The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02). Abgerufen von: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2020). Verwaltungsschale in der Praxis Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen? (Version 1.0) Abgerufen von: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2020-verwaltungsschale-in-der-praxis.html>
- [5] Magnus, S., Russ, T., Krause, J. (2016). Anforderungs- und modellbasierte Testfallgenerierung und Testdurchführung unter Nutzung von Methoden zur Netzwerkanalyse. In: Tagungsband 14. Fachtagung EKA (2016). ifak
- [6] VDI/VDE-GMA (2018). Testen vernetzter Systeme für Industrie 4.0. Abgerufen von: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/testen-vernetzter-systeme-fuer-industrie-40>
- [7] Eclipse BaSyx Platform (2021). Ready-to-use components and extendable software development kits (SDK). Abgerufen von: <https://www.eclipse.org/basyx/>.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Schäfer

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
12459 Berlin
stephan.schaefer@htw-berlin.de

Dirk Schöttke

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
12459 Berlin
dirk.schoettke@htw-berlin.de

Thomas Kämpfe

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
12459 Berlin
thomas.kaempfe@htw-berlin.de

Vasil Denkov

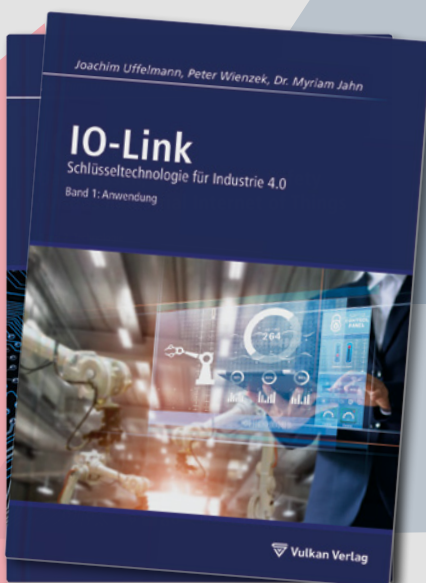
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
12459 Berlin
vasil.denkov@htw-berlin.de

Bernd Tauber

EAW Relaistechnik GmbH
15711 Königs Wusterhausen
eaw@eaw-relaistechnik.de

Schlüsseltechnologie FÜR INDUSTRIE 4.0

BUCH TIPP



Ihr Mehrwert:

- Entwicklung von IO-Link Produkten
- Was steckt in der Technologie?
- Möglichkeiten für Hardware und Software

Autor: Joachim R. Uffelmann, Peter Wienzek, Myriam Jahn
Angaben: 3. Auflage in zwei Bänden | Umfang: 320 + 404 Seiten
Band 1 Broschur: ISBN: 978-3-8027-7439-4 | Artikel-Nr.: 74394
eBook: ISBN: 978-3-8027-7440-0 | Artikel-Nr.: 74400
Band 2 Broschur: ISBN: 978-3-8027-7441-7 | Artikel-Nr.: 74417
eBook: ISBN: 978-3-8027-7442-4 | Artikel-Nr.: 74424
Preis: 2 x 39 €

Hier direkt bestellen:
www.vulkan-shop.de



MTPlatform: Das Amazon für die modulare Automation

Anlagenbetreibende stehen heute vor der Herausforderung, dass sie sich durch umfangreiche Marktrecherchen erst einen Überblick verschaffen müssen, welche Modullieferanten ihre Produkte inklusive Module Type Package (MTP) anbieten. Diese Recherche ist aktuell aufwendig, zeitintensiv und demzufolge auch teuer. Das steht im Gegensatz zum Ziel der modularen Automation mit MTP: Verkürzte time-to-market, Flexibilisierung und die Entkopplung der einzelnen Engineeringsschritte. Dieser Artikel zeigt, wie der Moduleinkauf mit der MTPlatform bald so einfach wie ein Klick bei Amazon wird.

Semodia wird ihren Kunden einen Überblick, eine Vergleichsmöglichkeit und einen direkten Kauf von MTP-fähigen Modulen aus einer Hand anbieten: So übersichtlich und gut strukturiert wie eine Richtlinie, so einfach zu bedienen wie ein Smartphone und so verbreitet wie Amazon. Auf einer Plattform sollen künftig Modulbauende deren Produkte anbieten und Anlagenbetreibende erwerben können. Ein Inventar bietet die Möglichkeit zur Speicherung und Verwaltung der eigenen Module und deren MTPs. Wenn ein Modul für einen Zeitraum nicht zum Einsatz kommt, wird es zum Verleih angeboten. So wird auch der Modulbetreibende selbst zum Anbietenden.

Um diese Idee in die Tat umzusetzen und die Modularisierung weiter voranzutreiben, arbeitet das Team von Semodia genau an einer solchen Plattform, der *MTPlatform*.

Release auf der HANNOVER MESSE 2022

Bereits zur HANNOVER MESSE 2022 wurde die *MTPlatform* released und der Öffentlichkeit vorgestellt. Kostenloses Kundenkonto anlegen, MTPs hochladen, diese in einem eigenen Inventar anzeigen lassen sowie Beispiel-MTPs einfordern, sind die ersten Funktionen der Plattform. Obendrein liefert ein *MTP-Validator* die erste innovative Hauptfunktion. Mit

diesem können Kunden und Kundinnen ihre MTPs kostenlos auf Standardkonformität prüfen. Das Ergebnis der Validierung informiert dabei primär über alle verletzten Regeln, die der Validator prüft. Jede Regelverletzung gibt dabei an, wie kritisch dieser Fehler einzuschätzen ist und was die eigentliche Erwartung der Regel darstellt. Weiterhin liefert jeder Fehler auch einen Verweis auf den jeweiligen Standard, der die entsprechende Regel begründet.

Damit ist der *MTP-Validator* der bislang erste, der die Konformität zur neuesten MTP-Richtlinie, der VDI/VDE/NAMUR 2658, prüft und die Ergebnisse nutzerfreundlich in Klartext ausgibt.

MTP-Viewer zur ACHEMA 2022

Auf der ACHEMA im August 2022 wird der *MTP-Viewer* als eine neue Ausbaustufe der *MTPlatform* präsentiert. Der *MTP-Viewer* ist die Vorstufe weiterer kommender Anwendungen der *MTPlatform*: Eine *MTPol* zur Inbetriebnahme von Modulen und ein Editor für die Erstellung bzw. nachträgliche Änderung von MTPs. Mit dem *MTP-Viewer* können die Nutzer:innen ihre hochgeladenen MTPs nicht nur auf Richtigkeit prüfen, sondern sich auch deren Inhalte anzeigen lassen. Die im MTP enthaltenen Informationen zu Kommunikation, Mensch-Computer-Interaktion (HMI) und Diensten werden nicht wie in einem

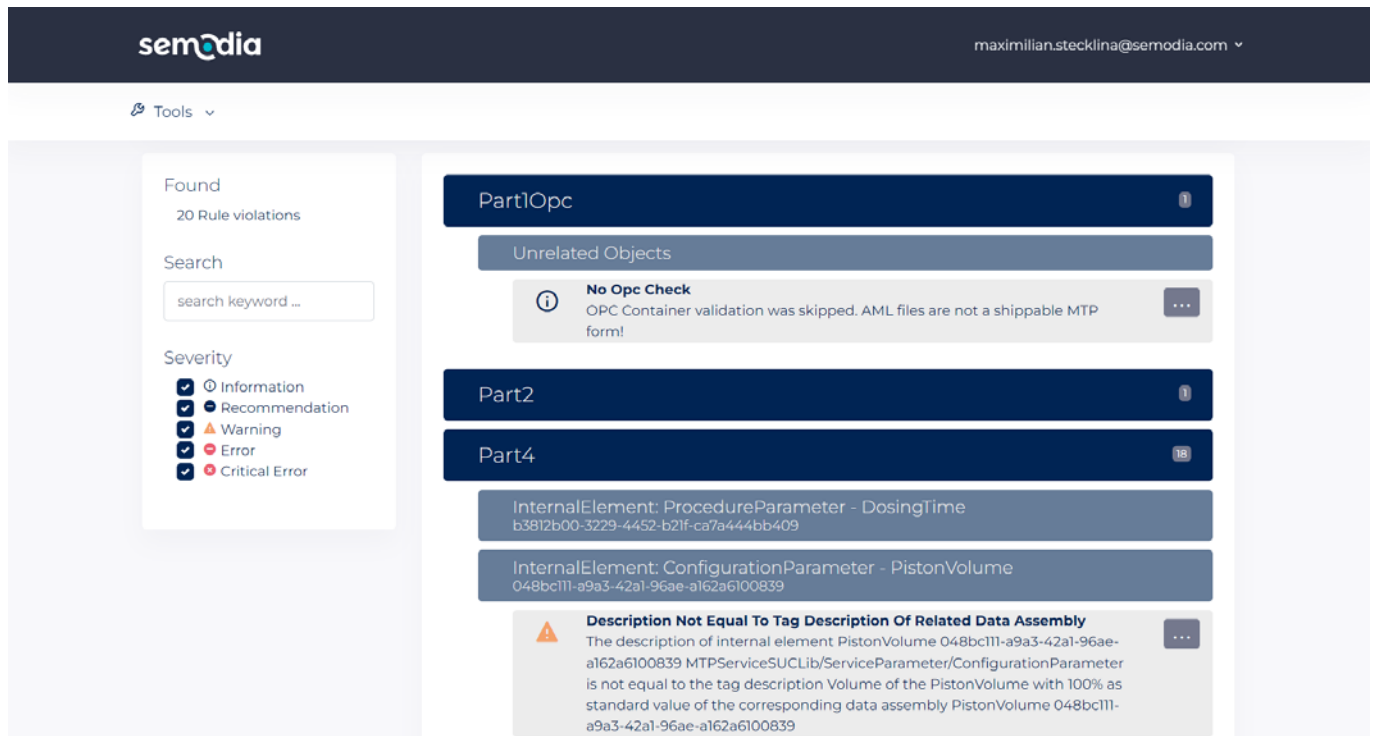


Abbildung 1: Eine Ansicht der Ausgabe des MTP-Validators.

AutomationML Viewer gelistet, sondern ähnlich zu einem gängigen *Process Orchestration Layer* (POL) interpretiert und grafisch aufbereitet.

Für die Darstellung der HMIs werden sowohl die Koordinaten als auch die eClass-Bibliotheken ausgewertet und auf eine durch Semodia entwickelte Grafik-Bibliothek gemappt. Auch werden die Dienste vollständig interpretiert, gut für die Nutzer :innen strukturiert und vollständig mit allen Parametern dargestellt. Die zukünftige mögliche Interaktion mit der *MTPol* werden bereits jetzt angedeutet, so dass sichtbar wird, wohin die Reise geht. Auch setzt Semodia damit einen ersten Schritt hin zur Editierungsfunktion für das MTP auf der Plattform. In Zukunft wird die MTP-Darstellung nicht mehr auf die reine Anzeige begrenzt sein, Nutzer:innen bekommen außerdem die Möglichkeit, ihre MTPs direkt in einer grafischen Oberfläche zu editieren und neu zu exportieren. In Verbindung mit dem *MTP-Editor* gehören falsch konfigurierte MTPs somit der Vergangenheit an.

Nächste Ausbaustufe: Modulverwaltung

Damit wurde die *MTPPlatform* um ein wesentliches weiteres Feature erweitert. In der zweiten Jahreshälfte wird die MTP-Verwaltung um eine Modulverwaltung ergänzt. Dort können Modul- und Geräteherstellende in Zukunft ihre MTP-fähigen Produkte platzieren. Semodia wird die Modulsuche, basierend auf der Definition von Attributen und Funktionsbeschreibungen der VDI 2776, gestalten. Damit kann sichergestellt werden, dass Beteiligte aus unterschiedlichen Kontextwelten, wie beispielsweise der Verfahrens- und Automatisierungstechnik, die Plattform effektiv für sich nutzen können. Die Eigenschaften der Module werden entsprechend der VDI 2776 auf das interne semantische Modell gemappt und können in einer intelligenten Suche

durch Anlagenbetreibende bzw. Anlagenhersteller:innen gezielt gefunden werden. Damit wird ein Match zwischen dem Bedarf der Betreibenden und der verfügbaren Module erstellt. Dies vereinfacht die Modulsuche und unterstützt den darauffolgenden Kauf.

Mehr Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit

Semodia hat sich nun seit drei Jahren auf Lösungsansätze rund um das Thema MTP spezialisiert. Die Gründer- und Mitarbeiter:innen von Semodia wirken in national und international agierenden Gremien mit, um das babylonische Verständigungsproblem zwischen den Automatisierungstechniken der Module ein für alle Mal in den Griff zu bekommen. Damit leistet das Team mit seinen Softwareprodukten und Dienstleistungen einen wesentlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung modularer verfahrenstechnischer Anlagen und hilft damit, Ressourcen in der Prozessindustrie einzusparen.

Mit der Einführung und Weiterentwicklung der *MTPPlatform* gestaltet Semodia den MTP-Markt hin zu mehr Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit mit. Neben der Modularisierung werden mit der Plattform die Themen Digitalisierung und Industrie 4.0 weiter gestärkt und unsere Kunden in Ihrer Modularisierungs- und Digitalisierungsstrategie unterstützt.

Anna Menschner

Semodia GmbH
01445 Radebeul
anna.menschner@semodia.com

Maximilian Stecklina

Semodia GmbH
01445 Radebeul
maximilian.stecklina@semodia.com



In kaum einer Branche können KI und Machine Learning zu einem größeren Nachhaltigkeitshebel werden als in der Robotik, die schon heute dank dieser Zukunftstechnologien immer neue Branchen und Use Cases erschließt. Im Interview erklärt Jörg Rommelfanger, Leiter der Robotics-Division von ABB Deutschland, was Roboter heute schon voneinander lernen können und macht deutlich, dass die Zeiten von eingezäunten Fertigungslinien schon bald der Vergangenheit angehören werden.

Herr Rommelfanger, die industrielle Robotik befindet sich im Zuge der Digitalisierung mitten in einem tiefgreifenden Wandel. Wie sieht für Sie heute eine perfekte Roboterinstallation aus?

Eine gute Frage, bei der viele Aspekte eine Rolle spielen. In erster Linie steht bei jeder Roboteranwendung natürlich der Kundennutzen im Fokus. Roboter helfen dabei, wettbewerbsfähig zu sein und die Produktion profitabel zu gestalten. Rein technisch betrachtet müssen sie sich dafür aber nahtlos in die Prozesse des Kunden integrieren lassen. Flexibilität, Schnelligkeit und Einfachheit sind daher weitere Eigenschaften, die die moderne Robotik heute mitbringen muss.

Wer an Roboter denkt, hat meist die starren Fertigungslinien in der Automobilproduktion vor Augen, in der sie über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg z. B. die gleichen Karosserieteile zusammenschweißen. Ist dieses Bild überholt?

So weit würde ich noch nicht gehen, dennoch ist es so, dass Roboter heute flexibel auf Veränderungen in der Produktion reagieren können müssen. Es werden nicht mehr nur z. B. Losgrößen oder Prozesse verändert, sondern eventuell sogar die Aufgaben, die ein Roboter während seiner Einsatzzeit erledigen soll.

Rücken Kraft, Präzision und Geschwindigkeit heute dann zu Gunsten von mehr Flexibilität zunehmend in den Hintergrund?

In den Hintergrund vielleicht nicht unbedingt, dennoch beobachten wir tatsächlich einen Trend hin zu einer stärkeren Individualisierung und Flexibilisierung der Roboter. Wenn Sie heute einen individualisierten Sportschuh oder eine den Wünschen des Kunden entsprechende Fahrzeuglackierung realisieren möchten, geht das mit Robotern von der Stange eben nicht mehr. Wir sehen einen zunehmenden Mix in den Losgrößen und Produktionsvolumina der Anwender. Hier kommt dann der digitale Layer eines Roboters ins Spiel, wo KI und Machine Learning eben nochmal viel größere Potenziale eröffnen und uns in Zukunft vielleicht sogar in Richtung autonomer und sich selbst optimierender Systeme führen.

Sehen Sie aufgrund dessen in diesem Bereich mehr Innovationspotenzial als z. B. in der mechanischen Hardware eines Roboters?

Natürlich haben wir gerade in den vergangenen zehn Jahren gesehen, wie gut auch Hardware durch Software optimiert

werden kann. Die Bahnplanung eines Roboters, die dank digitaler Tools enorm vereinfacht werden konnte, ist dafür ein gutes Beispiel. Trotzdem würde ich Ihnen dabei nicht zustimmen. Software wird Hardware nie eliminieren – beide ergänzen sich kontinuierlich. Die Entwicklungen gehen Hand in Hand und bedingen einander. Aufgrund der Weiterentwicklungen in beiden Bereichen entstehen immer neue Use Cases.

Können über diese neuen Applikationen dann auch neue Branchen erschlossen werden? In der Prozessindustrie z. B. hat die Robotik bislang noch nicht so recht Fuß gefasst.

Absolut, auch wenn das für die Chemie- und Verfahrenstechnik jetzt nicht unbedingt zutrifft. Insbesondere aber die Logistik und mobile Robotik erschließen z. B. in der Gesundheitsbranche und im Einzelhandel neue Möglichkeiten. Hier sind die Eintrittshürden auch etwa durch die stetige Weiterentwicklung der Cobots und ihrer einfachen Inbetriebnahme heute deutlich geringer. Inzwischen können wir Roboter über eine neue Software blockweise – also per Drag-and-Drop – intuitiv programmieren. Das beherrscht sogar bereits mein siebenjähriger Sohn.

Hat das auch Einfluss auf althergebrachte Use Cases wie die eben schon angesprochene Automobilindustrie?

In jedem Fall! Auch dort werden flexible Produktionskonzepte in kleineren Produktionszellen immer beliebter. Es sind zwar nach wie vor stationäre Systeme im Einsatz, die aber so deutlich anpassungsfähiger sind. Was nicht heißt, dass mobile Systeme hier keine Rolle spielen, ganz im Gegenteil.

... weil die Intralogistik eben zunehmend über fahrerlose Transportsysteme abgewickelt wird?

Richtig. Der Weg des Bauteils zur Produktionszelle wird ebenfalls immer stärker roboterisiert. In einem modernen Automobilwerk trifft die stationäre zunehmend auf die mobile Robotik. Über AGVs (*Autonomous Guided Vehicles*, Anm. d. Red.) können so auch kleinere stationäre Zellen schnell und einfach skaliert werden. Die Zeit der Roboter-Gärten, die ausschließlich auf Output getrimmt waren, sind vorbei. Hier sehen wir dramatische Veränderungen hin zu kleineren, anpassungsfähigeren Systemen und Prozessen.

Liegt das lediglich an den volatilen Losgrößen oder gibt es dafür noch andere Gründe?

Die Varianz in den Produktionsumfängen und die zunehmende Individualisierung sind schon die größten Treiber.

„Software wird Hardware nie eliminieren – beide ergänzen sich kontinuierlich. Die Entwicklungen gehen Hand in Hand und bedingen einander.“

Unternehmen müssen heute generell mit sehr viel mehr Unsicherheiten umgehen können. Produkte können nicht mehr einfach über Jahre hinweg unverändert in riesigen Volumina hergestellt werden. Eine einhundertprozentige Planung ist heute, wie auch aktuell aufgrund geopolitischer Geschehnisse deutlich wird, fast nicht mehr möglich.

Zu klassischen Roboter-Gärten hat der Mensch auch nur Zutritt, wenn alles stillsteht. Beobachten Sie in den etablierten Anwendungsfeldern einen Trend hin zu kollaborierenden Systemen und einem gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Maschine?

Definitiv. Für Industrieroboter haben wir inzwischen eine Sensorik entwickelt, die die Bewegungen des Roboters verlangsamt, sobald sich eine Person nähert. Dann können beispielsweise Bauteile eingelegt oder entnommen werden, ohne dass die gesamte Linie angehalten werden muss. Auch Zäune und Rolltore werden damit zunehmend obsolet und ich bin mir sicher, dass sie irgendwann völlig verschwunden sein werden. Dieser interaktiven Robotik steht dann noch die vollständig kollaborative Zusammenarbeit mit Cobots gegenüber.

... um die es in den letzten Jahren aber deutlich ruhiger geworden ist. Ist der Hype abgeflacht?

Absolut nicht! In den USA haben wir in einem ersten Use Case im Healthcare-Sektor gezeigt, wie mobile Cobots aussehen können. Dort haben wir ein AGV mit einem Cobot verheiratet. Dieses System könnte in einem Labor für Covid-Tests das Handling der Proben übernehmen. Wir sprechen also schon lange nicht mehr über rein stationäre Systeme, die lediglich Werkstücke anreichen oder halten können. Gerade in der Servicerobotik im Gesundheitswesen schlummert großes Potenzial. Aber auch in der Endmontage der Automobilfertigung sehen wir Ansätze dafür.

Dennoch haben Cobots die industrielle Produktion noch nicht durchdrungen, oder?

Das ist schwierig zu bewerten, weil es nicht überall immer Use Cases für kollaborierende Systeme gibt. Fakt ist, dass Cobots für die Wettbewerbsfähigkeit und Produktivität eines Unternehmens förderlich sein können.

Ist das denn wirklich ausschließlich Aufgabe der Hersteller? Oder müssten vielmehr die Anwender ihre Pro-

zesse und Anlagen auch neu denken, um die Funktionalitäten von Cobots optimal zu nutzen?

Ein Stück weit schon, aber wir helfen dabei gerne mit, schließlich sind wir ja kein reiner Produktlieferant, sondern können auch dabei unterstützen, Prozesse und Anwendungen auszulegen. Da sind wir in enger Abstimmung mit unseren Kunden und Partnern.

Gehört da auch ein gewisser psychologischer Aspekt zu, um Mitarbeiter:innen ein Stück weit die Angst vor dem Cobot zu nehmen?

Sie sprechen da einen sehr wichtigen Punkt an. Wir sind darauf bedacht, die Menschen in diesen Prozess von Anfang an mit einzubinden. Wir wollen niemanden vor vollendete Tatsachen stellen. Wichtig für die Akzeptanz sind zudem die Anmutung und das Design, was nicht unterschätzt werden sollte. Wir müssen hier weniger in Richtung Industriemaschine denken, sondern eher in Richtung Smartphone. Diese gewohnten Bedienkonzepte müssen wir in die Robotik noch stärker überführen und haben auch eine gewisse emotionale Komponente. Letztendlich steht und fällt der Einsatz von Cobots mit der Einfachheit der Systeme. Wie schnell kann ich sie installieren und in Betrieb nehmen? Das ist neben dem *Return on Invest* die wesentliche Frage.

Wird der Cobot vielleicht aufgrund seiner Wandelbarkeit und Flexibilität in Zukunft für den breiten industriellen Einsatz interessanter werden?

Die Flexibilität des Cobots ist sicherlich ein Vorteil, den starre Robotersysteme nicht per se mitbringen. Kollaborierende Roboter kann ich darüber hinaus vielleicht auch noch in anderen Umgebungen oder Prozessen schnell einsetzen, was bei einem herkömmlichen Roboter nicht immer gelingt. Ein Schlüssel dafür ist auch wieder die Einfachheit des *Teachments*, mit dem ich den Cobot schnell an einer anderen Stelle wieder für eine neue Applikation einsetzen kann.

Das macht den Cobot auch im Sinne der Nachhaltigkeit attraktiv. Welche Rolle spielt Sustainability in der Robotik bereits?

Uns begegnet die Nachhaltigkeit tagtäglich. Diesem Thema müssen wir uns aus zwei Richtungen nähern. Zum einen aus der Produktsicht des reinen Roboters, der immer weniger Energie benötigen darf. Nachhaltigkeit ist zu einer Marktanforderung geworden, die wir adressieren müssen. Allein

„Roboter-Gärten sind überholt. Wir sehen dramatische Veränderungen hin zu kleineren, anpassungsfähigeren Systemen und Prozessen.“

unsere aktuelle Steuerungsgeneration braucht 20 % weniger Strom, vor allem aufgrund von Bremskraftrückgewinnung. Darüber hinaus wichtig ist aber auch, dass wir bestehende Geräte nicht einfach durch neue ersetzen. Das *Refurbishment* alter Systeme spielt bei uns eine große Rolle, vor allem wenn es wie aktuell zu Rohstoffengpässen kommt.

Die andere Richtung ist vermutlich die Prozess-Sicht?

Ja, denn der große Vorteil des Roboters ist, dass er von Natur aus sehr präzise und materialeffizient arbeitet und somit sehr wenig Ausschuss und Abfall produziert. Nutzen wir für die Produktion nun nachhaltige oder recycelte Werkstoffe, wird der Benefit noch größer. Auf der anderen Seite haben wir z. B. ein Verfahren für die Fahrzeuglackierung entwickelt, bei dem wir den Lack nicht zerstäuben, sondern zu 100 % aufs Fahrzeug bringen. Das funktioniert ähnlich wie ein Tintenstrahldrucker, hat nur den charmanten Vorteil, dass kaum Lackpartikel aufwendig aus der Luft abgeschieden werden müssen. Nicht ohne Grund ist die Lackierung der energieintensivste Prozess in der Autoproduktion. Zusätzlich dazu können wir dank dieses pixelbasierten Verfahrens hoch individualisierte Lackierungen realisieren. Auch das momentan im Trend liegende zweifarbige Lackieren, wofür Fahrzeuge heute noch oft eben zwei Mal durch die Lackierstraße gefahren werden und kleinteilig abgeklebt werden müssen, entfällt dadurch. Das ist ein großer Schritt in Richtung einer umweltfreundlicheren und effizienteren Produktion.

Stichwort Effizienz: Moderne Elektroautos erhalten Updates heute zunehmend Over-the-air und können dann weitere Strecken zurücklegen oder erhalten andere Features. Ist das auch für die Robotik schon möglich?

Das ist heute schon Alltag – zumindest was unsere Roboter betrifft. Unsere Systeme sind an eine Plattform

angebunden, wo wir ihre Daten sammeln, verarbeiten und für proaktive und prädiktive Service-Modelle nutzen können. Über diese Plattform erzeugen wir mithilfe von KI aber auch ganz andere Mehrwerte. So bringen wir z. B. Greifern in nur wenigen Versuchen bei, vorher unbekannte Gegenstände sicher zu handhaben, weil Greifer von anderen Anwendern sie in ihren jeweiligen Applikationen bereits kennen.

Die Roboter optimieren sich sozusagen gegenseitig und profitieren von ihren „Erfahrungen“?

So könnte man es sagen. Die Systeme kommunizieren und lernen voneinander, weil sie gemeinsam an einer Plattform angebunden sind. Wir sind so in der Lage, eine Art kontinuierlichen Lernprozess zu installieren. 5G wird dies in Kombination mit KI und Machine Learning natürlich extrem beschleunigen.

Das bedingt aber auch, das die Anwender dieser Systeme die Daten auch teilen, was bislang ja immer noch eher kritisch betrachtet wird. Bemerken Sie da ein Umdenken im Markt?

Aus meiner Sicht schon, ja. Wobei es bei den Bedenken weniger um die konkreten Daten geht, sondern eher um die Security dieser Informationen. Das ist die viel größere Frage, die dahintersteckt. Daran arbeiten wir natürlich massiv und versuchen die maximale Sicherheit zu gewährleisten.

Die Robotik wird damit auch zu einem Schmelztiegel verschiedener Technologien und Domänen?

Ich glaube, dass kaum ein Sektor der industriellen Produktion an KI, Machine Learning und in diesem Zusammenhang auch an IT- und OT-Security vorbeikommt. Da geht es der Robotik genauso wie allen anderen Domänen.

ZUR PERSON

Jörg Rommelfanger

Nach Stationen bei der carat robotic innovation GmbH und der KraussMaffei Technologies GmbH startete Jörg Rommelfanger seine Laufbahn bei ABB im Jahr 2012. Anschließend hatte er verschiedene Führungspositionen auf lokaler und globaler Ebene inne. Jörg Rommelfanger verfügt über einen Abschluss als Diplom-Ingenieur (FH) in Mechatronik der Hochschule Bochum sowie einen postgradualen Abschluss in Betriebswirtschaft von der Fernuniversität Hagen. Seit dem 1. Januar 2022 ist er Leiter der Robotics-Division von ABB in Deutschland.

Automatisierte Qualitätskontrolle: Retrofit für Bestandsanlagen

Bastian Schulte, Holger Flatt, Reinhold Schulte, Chris Kleinhans

Für die Fertigung von Dreh- und Frästeilen in der Großserienproduktion stellt die qualitative Maßkontrolle ein wichtiges Werkzeug zur Sicherung einer dauerhaften Bauteilqualität dar. Je nach Komplexität und Beschaffenheit der Bauteile variiert der zeitliche und personelle Aufwand dieser Kontrollen. Für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) stellt die manuelle Maßkontrolle aktuell den Standard der Qualitätsprüfung dar. Jedoch zeigt eine automatisierte Maßkontrolle während des Fertigungsprozesses nicht nur ein erhebliches Einsparpotenzial in den Bereichen Energie und Ressourcen auf, sondern auch eine Qualitäts- und Produktionssteigerung. Dieses Potenzial haben das Fraunhofer IOSB-INA mit dem Standort in Lemgo und der Auftragsfertigungsbetrieb IWN GmbH & Co. KG aus Bielefeld in einer Studie analysiert.

KMU-Standard: Die manuelle Maßkontrolle

Um eine konstante Bauteilqualität, die den Anforderungen der Kunden entspricht, herzustellen, müssen spanende Produktionsprozesse auf ihre Maßhaltigkeit überprüft werden. Dabei stellt die Fertigungszeichnung und die darauf angegebene Maßtoleranzen den Kundenwunsch dar. Bauteile, die hiervon abweichen, gelten als Ausschuss und können nicht an den Kunden geliefert werden. Um eine Ausschussproduktion zu verhindern, werden die gefertigten Bauteile nach einem auf den Vorgaben der Zeichnung basierenden Prüfplan vermessen. Auf dem für jedes Bauteil individuell formulierten Prüfplan werden die zu prüfenden Maße und die Häufigkeit der Prüfungen beschrieben. Dabei unterscheidet sich die Häufigkeit der zu prüfenden Merkmale von einhundertprozentigen Kontrollen, bis hin zu einmaligen Kontrollen pro Schicht. Je komplexer Bauteile aufgebaut und je „enger“ die Merkmale toleriert sind, desto zeitintensiver und aufwändiger gestaltet sich besonders die manuelle Maßkontrolle, die bei KMUs zum Standard-Verfahren zählt [1].

Laut Prüfplan werden geometrische Merkmale nach dem Zerspanungsprozess an der Maschine geprüft. Die Vielzahl und die Genauigkeitsanforderungen der zu messenden Merkmale führt zu einem erheblichen Zeitaufwand bei der manuellen Maßkontrolle. Dies stellt vor allem in der Großserienproduktion, mit Bauteildurchlaufzeiten von ca. 0,5-1 Min., ein Problem dar. Die Bauteildurchlaufzeit ist zum Teil kürzer als die benötigte Zeit zur Messung der entsprechenden Bauteilmerkmale. Somit besteht die Gefahr einer Ausschussproduktion, bis ein notwendiger Offset, d. h. die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Maß, erkannt wird.

Neben anhaltenden Werkzeugverschleiß muss der Maschinenbediener innerhalb der manuellen Maßkontrolle ebenfalls auf entsprechende Umwelteinflüsse auf den Zerspanungsprozess reagieren. Hier sind besonders Temperaturverläufe innerhalb der Maschine zu nennen. Temperaturschwankungen führen zu einer schwankenden Maßhaltigkeit des Produktionsprozesses [2]. Nach einem Maschinenstillstand, z. B. aus Gründen von Mitarbeiterpausen oder Instandhaltung, ist eine Warmlaufphase der Maschine notwendig, damit ein konstantes Temperaturniveau innerhalb der Maschine erreicht wird. Innerhalb dieser Phase ist durch temperaturbedingte Maßschwankungen eine Produktion nicht wirtschaftlich, da die Maßhaltigkeit über einen erhöhten Prüfaufwand erhalten wird. Eine qualitativ hochwertige und maßhaltige Produktion ist in diesem Fall mit hohem Personalaufwand verbunden. Dieses ist insofern für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ausschlaggebend, als das die Positionen Materialaufwand, Personalkosten und energetische Aufwendungen die größten Kostenblöcke in einer Unternehmensbilanz darstellen [3]. Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit im internationalen Vergleich sind Maßnahmen zu einer ressourceneffizienten Produktion im Bereich Industrie 4.0, wie die Automatisierung der maßhaltigen Qualitätskontrolle, sinnvoll.



Abbildung 1: Produktionsdatenerfassungssystem INAsense.

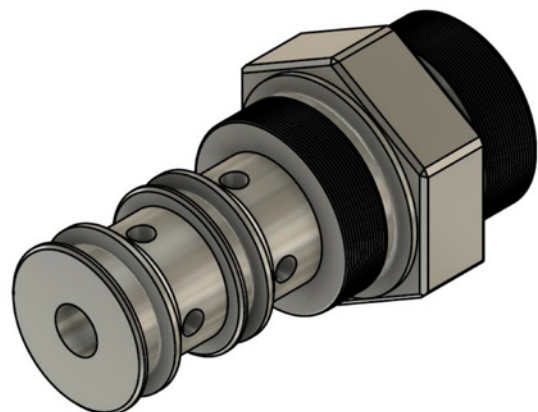


Abbildung 2: CAD-Darstellung Drehteil.

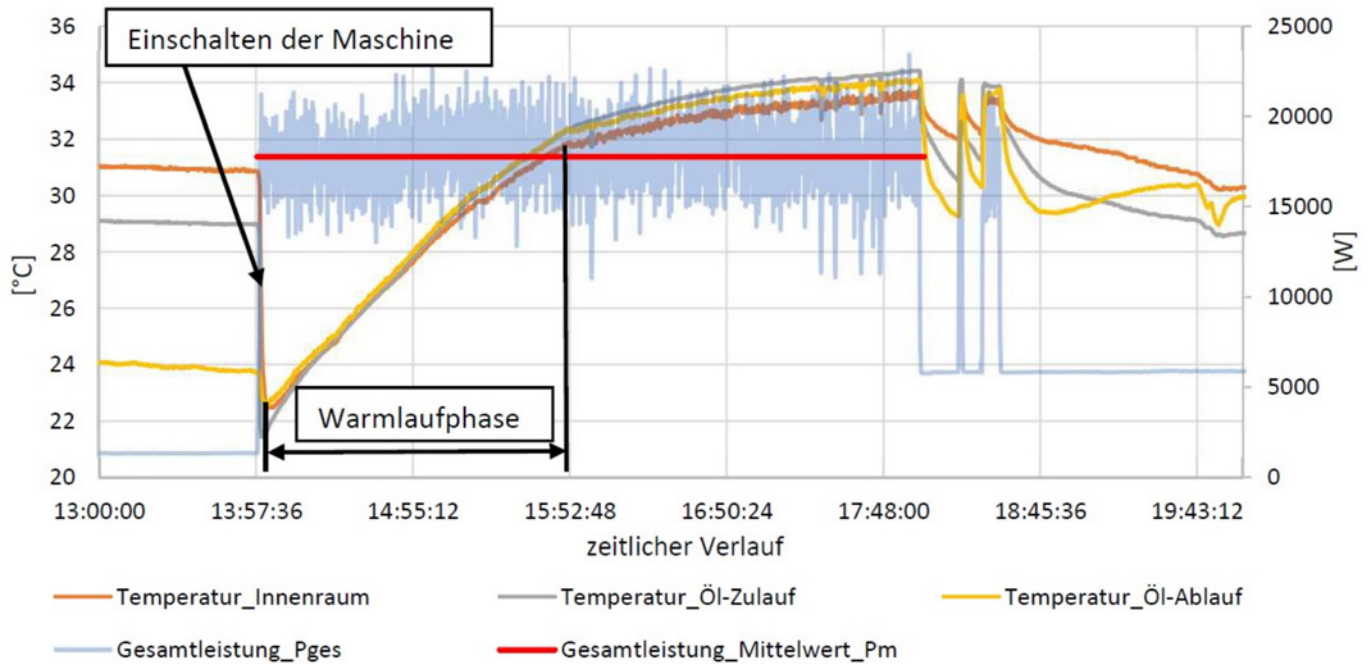


Abbildung 3: Warmlaufphase einer Fertigungsmaschine.

Um das Potenzial einer automatisierten Qualitätskontrolle zu analysieren, hat das Fraunhofer IOSB-INA in Verbindung mit IWN GmbH & Co. KG (IWN) eine Studie innerhalb der Produktion durchgeführt. Durch den Einsatz unterschiedlicher Messsensorik wird die Warmlaufphase einer spanenden Fertigungsmaschine und die Vorteile einer Produktion mithilfe einer automatisierten Qualitätskontrolle dargestellt.

Temperaturmessungen in der Warmlaufphase

Zur Bewertung der Temperaturverläufe innerhalb von Zerspanungsmaschinen wird ein Mehrspindeldrehautomat beispielhaft mit verschiedener Sensorik ausgestattet. Hier wird zum Auslesen und zur Auswertung der Sensorwerte auf das Produktionsdatenerfassungssystem *INAsense* des Fraunhofer IOSB-INA zurückgegriffen (s. Abbildung 1). Mit diesem System können Werkzeugmaschinen zeitnah und niederschwellig mit Sensortechnik ausgestattet werden, um Prozess- und Umweltdaten zu analysieren. Dazu zählen verschiedene Umweltdaten, wie Feuchtigkeit und Temperatur, oder auch prozessinterne Daten wie die Leistungsaufnahme und verschiedene mechanische Messungen. Unter Berücksichtigung dieses Systems werden verschiedene Temperatursensoren in den Innenraum der Maschine montiert. Diese messen den Temperaturverlauf des Innenraums sowie des Zulaufs und Ablaufs des Kühlschmierstoffes.

Weiterhin wird die Leistung der Maschine durchgehend erfasst. Dazu werden die Stromwandler an die entsprechenden Zuleitungen der Maschine montiert. Sowohl die Temperatursensoren als auch die Stromwandler werden mit dem *INAsense* verbunden. Die gemessenen Daten werden mit diesem System entsprechend ausgelesen und in eine Datenbank geschrieben. Hier stehen die aufgenommenen Messwerte zur Weiterverarbeitung und Auswertung zur Verfügung. Durch die Auswertung der gemessenen Sensorwerte können die Warmlaufphase und gleichzeitig anhaltende Leistungsaufnahme der Maschine dargestellt werden.

Um die Veränderung der Maßhaltigkeit festzustellen, werden Bauteile innerhalb dieser Warmlaufphase gefertigt, ohne dass eine Offsetkorrektur durchgeführt wird. Anschließend werden die Bauteilkonturen vermessen und dokumentiert. Bei dem in diesen Versuch hergestellten Bauteil handelt es sich um ein Drehbauteil mit unterschiedlichen Merkmalen. Zu diesen Merkmalen zählen Innen-, Außengewinde, ein Sechskant, Querbohrungen und Hinterschnitte (s. Abbildung 2).

Darstellung der Messergebnisse

Die aufgenommenen Messwerte lassen sich wie in Abbildung 3 für die Warmlaufphase einer Maschine darstellen. Hier sind die Temperaturverläufe des Innenraums, des Kühlschmierstoff-Zulaufs und des Kühlschmierstoff-Ablaufs dargestellt. Weiterhin werden die durch die Maschine aufgenommene Gesamtleistung und daraus eine gemittelte Gesamtleistung dargestellt. Es zeigt sich, dass ein starker Temperaturanstieg innerhalb von zwei Stunden nach dem Einschalten der Maschine abgebildet werden kann. Danach schwächt der Temperaturanstieg innerhalb der Maschine ab. Vor dem Erreichen dieses Niveaus führt der Temperaturanstieg zu Schwankungen in der Maßhaltigkeit. Durch die Auswertung bestimmter Merkmale der in diesem Zeitraum gefertigten Bauteile, lassen sich die Maßschwankungen innerhalb der Warmlaufphase darstellen.

Es stellt sich heraus, dass ohne eine Offsetkorrektur die Ausschussquote bei 100 % liegt. Dabei schwanken die verschiedenen Bauteilmerkmale unterschiedlich. In Abbildung 4 sind die Maßschwankungen innerhalb der Warmlaufphase für ein Längenmaß und in Abbildung 5 für ein Durchmessermaß dargestellt. Die Schwankungen des Längenmaßes befinden sich relativ konstant um den in der Zeichnung abgebildeten Sollwert und im vorgeschriebenen Toleranzbereich zwischen dem oberen Toleranzwert (OT) und dem unteren Toleranzwert (UT).

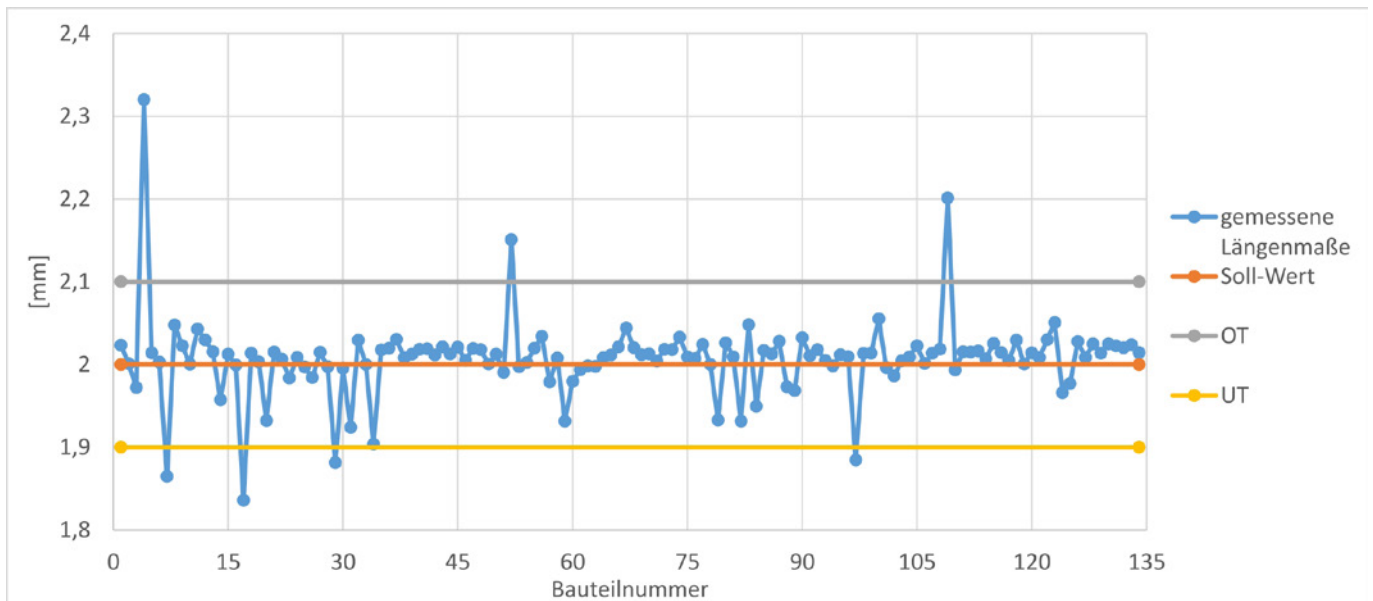


Abbildung 4: Maßabweichungen in der Warmlaufphase eines Längenmaßes.

Da die Durchmessermaße nicht nur um einen bestimmten Mittelwert schwanken, sondern sich dieser ebenfalls mit verändert (s. Trendlinie in Abbildung 5), müssen die Maschinenbediener:innen dieses entsprechend durch Maßüberprüfungen erkennen und die gemessenen Offsets händisch korrigieren. Somit erfordern die verschiedenen Konturarten auch einen unterschiedlichen Korrekturaufwand. Dieser Korrekturaufwand wird auch über den angegebenen Toleranzbereich eines Maßes definiert. Für das hier dargestellte Längenmaß liegt der Toleranzbereich bei $\pm 0,1$ mm und bei dem Durchmessermaß liegt der Toleranzbereich bei $+ 0,03$ mm. Somit ist der Toleranzbereich des Durchmessermaßes deutlich geringer und Maßabweichungen können hier schneller zu einer Ausschussproduktion führen. Um eine maßhaltige Produktion zu gewährleisten, sind für Maße mit geringem Toleranzbereich ein erhöhter Messaufwand notwendig.

Jedoch zeigt auch Abbildung 4, dass Ausschläge innerhalb einer Warmlaufphase in den Abmessungen möglich sind. Eine einhundertprozentige Maßhaltigkeit ist somit auch hier nicht gegeben. Das in diesem Versuch produzierte Bauteil, das in Abbildung 2 ähnlich dargestellt ist, besitzt 24 verschiedene Durchmesser- und Längenmaße an der Außenkontur. Die Durchlaufzeit eines Bauteils liegt bei ca. 55 Sekunden. Somit besteht ein enormer Messaufwand, um in dieser Phase Bauteile zu produzieren. Für die Warmlaufphase weiterhin problematisch ist die aufgenommene Leistung, ohne dass Bauteile produziert werden können. Somit werden ca. 17,7 kW pro Stunde benötigt. Es entstehen Kosten, ohne dass Bauteile gefertigt werden. Mithilfe einer manuellen Maßkontrolle ist eine Fertigung für diese Phase folglich nicht wirtschaftlich.

Ermittlung des Einsparpotenzials

Zur Ermittlung des Einsparpotentials durch eine automatisierte Qualitätskontrolle wird beispielhaft die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) bestimmt [6]. Bei der Berechnung wird von einem Zweischichtsystem ausgegangen, sodass die Fertigungsmaschine über eine dritte Schicht nicht eingeschaltet ist. Außerdem wird eine durchgehende, störungsfreie Pro-

duktion mit Ausnahme der Warmlaufphase angenommen. Der Ausschuss der Produktion, ohne die Betrachtung der Warmlaufphase, wird beispielhaft mit 15 % und die Länge der Warmlaufphase mit zwei Stunden angenommen. Die Durchlaufzeit eines Werkstückes beträgt 55 Sekunden.

Aus den hier vorgestellten Werten unter idealisierten Bedingungen ergibt sich ein OEE von 54 %.

Durch die Einbindung einer automatisierten Qualitätskontrolle und einer automatischen Offsetkorrektur kann eine maßhaltige Produktion für die Warmlaufphase umgesetzt werden. Es steigt sowohl die Verfügbarkeit der Maschine, als auch die Qualität. Wie in [7] beschrieben kann die Qualität auf bis zu 99 % durch die Integration einer automatisierten Qualitätskontrolle angehoben werden. Die Steigerung beider Parameter, der Qualität auf 99 % und der Verfügbarkeit auf 100%, erhöht den OEE in diesem Beispiel auf 84 %.

Anhand des idealisierten Rechenbeispiels kann durch die Nutzung der automatisierten Qualitätskontrolle ein Steigerungspotenzial der Maschineneffektivität um ca. 35 % offengelegt werden. Diese OEE-Steigerung hat einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Produktion eines Unternehmens. Weiterhin kann durch eine maßhaltige Produktion innerhalb der Warmlaufphase eine Bauteilproduktion erzeugt werden. Das hat zur Folge, dass auch die Kosten für die Energieaufwendungen in diesem Bereich um ca. 12 % reduziert werden können. Dieses geht daraus hervor, dass die Warmlaufphase einen Energiebedarf von ca. 35 kWh besitzt und in einer Produktion im Zweischichtbetrieb der Gesamtenergiebedarf bei ca. 283 kWh liegt (auf Beispielmachine bezogen).

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgestellten Studie wird das Potenzial einer automatisierten Qualitätskontrolle analysiert. Zur Umsetzung des vorgestellten Ansatzes gilt es zu Beginn die verschiedenen Maschinentypen zu betrachten. Hier unterscheiden sich diese

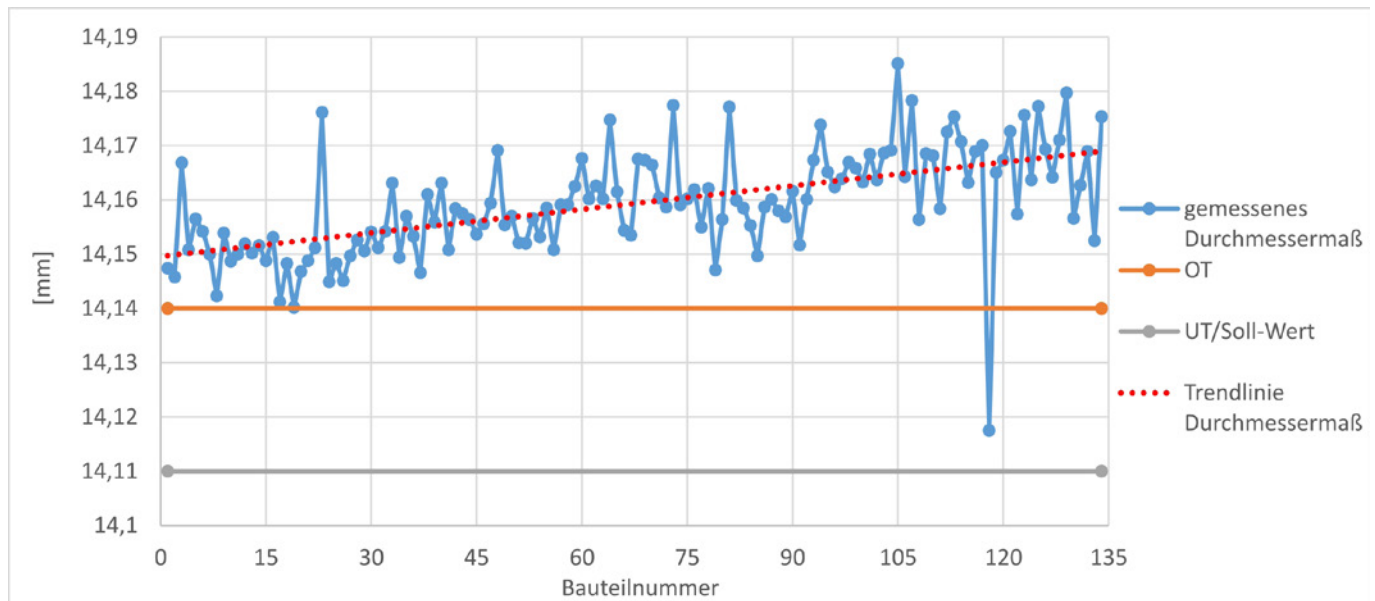


Abbildung 5: Maßabweichungen in der Warmlaufphase eines Durchmessermaßes.

besonders in dem Maschinenbaujahr, sodass in vielen KMUs sowohl neue Maschinen (< 1 Jahr alt) und ältere Maschinen (> 15 Jahre alt) verwendet werden. Die Problematik ist hierbei, einen Retrofit-Ansatz zu finden, sodass dieser auf dem Großteil der Maschinen eingesetzt werden kann.

Abhilfe schafft hier der VDMA-Leitfaden Industrie 4.0 „Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0-Neuer Nutzen mit vorhandenen Maschinen“ [8], der Möglichkeiten für die Befähigung verschiedener Maschinentypen für die Industrie 4.0 vorstellt. Diese Möglichkeiten sind in die drei Stufen „Erfassung & Visualisierung“, „Intelligente Zustandsüberwachung“ und „Aktion“ eingeteilt. In der ersten Stufe wird über verschiedene Sensoranbindungen innerhalb der Maschine und über Darstellungstools, z. B. Dashboards, der Maschinenstatus sichtbar dargestellt. In der zweiten Stufe wird über verschiedene Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens eine intelligente Zustandsüberwachung der Maschine angestrebt. Mithilfe dieser Überwachung können über eine implementierte KI Zusammenhänge zwischen Sensorwerten und Maschinenstatus gezogen werden. In der letzten Stufe wird anhand der Zusammenhänge der KI der Zerspanungsprozess automatisiert. Notwendige Korrekturwerte werden automatisch aus den gemessenen Offsets bestimmt und in die Maschinensteuerung integriert.

Weiterhin gilt es ein Konzept für die automatisierte Maßkontrolle zu erarbeiten. Dazu zählen besonders die Messtechnik und die Anbindung der Sensorik an die Maschine. Zum Messen der verschiedenen Bauteilmerkmale stehen sowohl taktile als auch optische und pneumatische Sensoren zur Verfügung.

Referenzen

- [1] WFL Millturn Technologies GmbH & Co. KG. (2022). Qualitätssicherung als integraler Bestandteil der smarten Fertigung. In Quality Engineering 2022, 01, p.50-51
- [2] Gebhardt, M., Wegener, K. (2013). Temperatureinfluss auf Werkzeugmaschinen. MB-Revue Jahreshauptausgabe Band 42, 59-63.

- [3] VDI Zentrum Ressourceneffizienz. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0-Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes.
- [4] Rehorn, A., Jiang, J., Orban, P. (2005). State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review". Int J Adv Manuf Technol 26, 693–710.
- [5] Klocke, F. (2018). Fertigungsverfahren 1: Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, 9. Aufl. Springer Vieweg.
- [6] Garza-Reyes, J. A. (2017). From measuring overall equipment effectiveness (OEE) to overall resource effectiveness (ORE). Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 21 No. 4, pp. 506-527.
- [7] Renishaw GmbH. (2011). Der Bessere überlebt-Prozessüberwachung in der spanenden Bearbeitung. Abgerufen von: <https://www.renishaw.de/resourcecentre/download/white-paper-der-bessere-ueberlebt-prozessueberwachung-in-der-spanenden-bearbeitung--37392?user-Language=de&>
- [8] Friesen, A., Flatt, H., Jasperneite, J. (2020). Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0 - Neuer Nutzen mit vorhandenen Maschinen. VDMA Forum Industrie 4.0, Frankfurt am Main.

Bastian Schulte, M.Sc.

Fraunhofer IOSB-INA
32657 Lemgo
bastian.schulte@iosb-ina.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Holger Flatt

Fraunhofer IOSB-INA
32657 Lemgo
holger.flatt@iosb-ina.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Reinhold Schulte

IWN GmbH & Co. KG
33719 Bielefeld
reinhold.schulte@iwn.de

Chris Kleinhans, M.Eng.

IWN GmbH & Co. KG
33719 Bielefeld
chris.kleinhans@iwn.de

Warum Sie die Hauptbeiträge dieser Ausgabe lesen sollten:

#h2

Roboterprogrammierung mithilfe von AutomationML

„Maschinen programmieren Maschinen“

Grüner Wasserstoff bildet einen der aktuell vielseitig erforschten Energieträger. Im Bereich der Automatisierungstechnik steht dabei die Erzeugung, die Speicherung und der Transport von Wasserstoff im Vordergrund. In laufenden Forschungsprojekten mit Leitcharakter, wie beispielsweise H2Giga, wird dabei die automatisierte Montage von Elektrolyseanlagen untersucht. Der Beitrag beschreibt hierzu ein Konzept, wie auf Basis von bestehenden Montageplänen automatisch Roboterprogramme erstellt werden. Die Autoren verwenden AutomationML als Datengrundlage für die im Beitrag beschriebenen Algorithmen. Leser:innen bekommen einen Überblick über den Ablauf der automatischen Generierung und erhält wertvolle Hinweise zu bestehenden Hürden und Forschungsfragen.

60

52

#aas

Realisierung und Evaluation des Verwaltungsschalen-Metamodells

„Eine Python-Bibliothek für die Verwaltungsschale“

Python gehört zu den am schnellst wachsenden Skriptsprachen im Ingenieurbereich. Begründet wird dies durch die vergleichsweise niedrigen Einstiegshürden sowie zahlreiche öffentlich zur Verfügung stehende Bibliotheken. Gleichzeitig können Python-Skripte sowohl in der Cloud als auch in der Edge sowie überall dazwischen betrieben werden. Ein Grund für die Autoren, den Aufbau einer Verwaltungsschale ebenfalls mithilfe einer Python-Bibliothek zu vereinfachen. Hiermit wird es möglich, Teilmodelle automatisiert zu generieren bzw. dies dem Menschen in assistierter Funktion zu erleichtern. Grundlage bildet das von der Plattform I4.0 veröffentlichte UML-Modell für die Repräsentation von Informationen in der Verwaltungsschale.

#mtp

Orchestration of modular plants

„Die Suche nach dem richtigen Dirigenten für das Orchester“

Die Modularisierung von Anlagen der Prozessindustrie gilt mehr denn je als Enabler für eine flexible und wandelbare Produktion. Dabei spielt das *Module Type Package* (MTP) eine tragende Rolle für die Beschreibung der Engineering-Aspekte eines Moduls. Trotz zahlreicher neuer Methoden bleibt jedoch die Frage nach dem Engineering-Aufwand für die automatisierungstechnische Verschaltung einer konfigurierten Anlage. Hierbei müssen die Module hinsichtlich ihrer in Diensten abgebildeten Fähigkeiten korrekt kombiniert werden. Die Autoren stellen im Beitrag eine Methode vor, mit der die als Orchestrierung bezeichnete softwaretechnische Zusammenführung der einzelnen Module sinnvoll und effizient gelingt. Basis hierfür bildeten zahlreiche Interviews mit Expert:innen in einem großen Konsortium, sodass Akademia und industrielle Praxis Hand in Hand gehen.



 **Prof. Dr.-Ing. Mike Barth**
atp-Chefredakteur Science

78

86

68

#machinelearning

Using domain-knowledge to improve machine learning

„Simulation und maschinelles Lernen gehen Hand in Hand“

KI und insbesondere *Machine Learning* (ML) stehen ganz oben auf der Liste der Dinge, die helfen sollen, die steigende Komplexität in industriellen Produktionsprozessen zu beherrschen. Gleichzeitig existieren nach wie vor zahlreiche Domänen, in denen keine oder lediglich wenige Daten für das maschinelle Lernen zur Verfügung stehen. Im Beitrag greifen die Autor:innen diese Problematik auf und untersuchen den Stand der KI im Bereich der Einbeziehung von Domänenwissen. So werden beispielsweise Parameter und Zustände von physikalischen Gleichungen mit maschinellem Lernen (*Deep Learning*) geschätzt. Ein anderes Beispiel betrifft die Robustheit von Neuronalen Netzen in Bezug auf Unsicherheiten oder Ausreißer in den Trainingsdaten. Ein gelungener Ausblick auf das, was bald kommen wird.

#machinelearning

Industrielles Transfer-Lernen

„Übertragen von Lösungen auf neue Probleme“

Wie auch der Beitrag „Using domain-knowledge to improve machine learning“ beschäftigen sich die Autoren in diesem Artikel mit den bestehenden Problemen für Maschinelles Lernen im industriellen Einsatz. Dabei wird insbesondere das Prinzip des Transfer-Lernens erläutert, bei dem die Trainingsdaten für Neuronale Netze mit Prozesssimulationen erzeugt werden. Dabei streut man die Parameter der Simulation großzügig, um den Algorithmus auf die in der Realität vorkommenden Änderungen vorzubereiten. Diese Vorgehensweise wird im Beitrag anhand mehrerer Use-Cases, wie beispielsweise Verschleißvorhersage, Roboterprogrammierung oder visuelle Objekterkennung erläutert.

Peer-Review: 04.01.2022

Roboterprogrammierung mithilfe von AutomationML

Konzeptionierung einer automatischen Roboterprogrammerstellung auf Basis von AML

Malte Jakschik, Alfred Hypki, Bernd Kuhlenkötter, Ruhr-Universität Bochum (RUB)

Inmitten der Energiewende wird mit dem Leitprojekt H2Giga durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Weiterentwicklung der Wasserstoffproduktion fokussiert. Das Teilprojekt HyPLANT100 befasst sich mit der automatisierten Montage von Elektrolyseanlagen. Im folgenden Beitrag wird ein Konzept präsentiert, welches die AutomationML-basierte Konzeptionierung und Implementierung selbstkonfigurierender Roboterprogramme für die Elektrolyseurfertigung auf Basis eines Algorithmus beschreibt. Dieser generiert aus dem spezifischen Montageplan den Programmcode für die Robotersysteme.

#AutomationML #selbstkonfigurierende Roboterprogramme #automatisierte Montage

Robot programming with the help of AutomationML

Conceptual design of an automatic robot programme generation based on AML

In the midst of energy transition, the lead project H2Giga promoted by the German federal government focuses on the further development of hydrogen generation. The subproject HyPLANT100 is concerned with the automated assembly of electrolysis plants. We present a concept for the AutomationML-based development and implementation of a self-configuring robot program for electrolyser manufacture. This is based on an algorithm which automatically transforms the specific assembly plan into useable program code for robot systems.

#AutomationML #self-configuring robot program # automated assembly

1. Einleitung

Wasserstoff gewinnt im Rahmen der Energiewende für den stationären und mobilen Einsatz zunehmend an Bedeutung. Zur Dekarbonisierung von nicht elektrifizierbaren Prozessen wird Wasserstoff bspw. in der chemischen Industrie eingesetzt, aber auch zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen. Ein weiterer Anwendungsbereich findet sich im Schwerlastverkehr, wo durch den Einsatz von wasserstoffgetriebenen Brennstoffzellen die Probleme der erforderlichen Reichweiten in Verbindung mit den hohen Gewichten der Fahrzeuge adressiert werden können.

Das zentrale Element bei der Wasserstoffherzeugung ist dabei der Elektrolyseur in dem durch Zuführung von elektrischer Energie und Wasser schließlich Wasserstoff erzeugt wird. Wenn der dafür eingesetzte Strom bei der Wasserelektrolyse aus regenerativen Energiequellen wie Wind oder Sonne gewonnen wird, spricht man von grünem Wasserstoff. Diese Elektrolyseure werden derzeit in einer sehr aufwendigen Manufaktur-ähnlichen Art und Weise hergestellt, was den Elektrolyseurherstellungsprozess sehr zeit- und kostenintensiv macht. Um die hohen und weiter steigenden Mengenanforderungen an Wasserstoff langfristig decken zu können, ist daher eine Automatisierung der Elektrolyseurproduktion erforderlich. Die besonderen Anforderungen an

die Elektrolyseurproduktion resultieren daraus, dass hier die klassische mechanische Montage eng mit der Verbindungstechnik für elektrische, flüssige und gasförmige Medien einhergehen muss und zudem besondere Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen erfüllen muss.

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein konzeptionelles Vorgehen zur automatisierten Generierung von Roboterprogrammen. Hierfür wird der Anwendungsfall der Produktion von Elektrolyseuren betrachtet. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Projektstruktur und -ausrichtung beschrieben, die den Rahmen für die spätere Umsetzung des Konzeptes bieten.

Im Rahmen des übergeordneten Leitprojektes H2Giga des BMBF soll mit über 130 beteiligten Institutionen aus Wirtschaft und Wissenschaft eine serienmäßige Herstellung von Elektrolyseuren erarbeitet werden und die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland sowie die Verwendung von nachhaltigen Energiesystemen weiter forciert werden. Durch die verschiedenen Teilprojekte soll sowohl die Verfahrenstechnik der Wasserstoffelektrolyse verbessert werden als auch die Produktion solcher Anlagen von kleinen Elektrolyseuren hin zu Großanlagen effizienter und kostengünstiger erfolgen.

Das Teilprojekt „Entwicklung optimierter und automatisierter Abläufe und Standards für den Aufbau großskaliger

Wasserelektrolyseure“ (HyPLANT100, Laufzeit 2021-2025) wird im Kontext von H2Giga die effiziente Montage und Aufstellung von großskaligen Elektrolyseursystemen erforschen und entwickeln. Dadurch wird der Kreis eines industrialisierten Produktionsprozesses, also der Fertigung der Elektrolyseure hin zur Montage funktionsfähiger Elektrolyse-Großanlagen, geschlossen. HyPLANT100 adressiert damit das in [1] empfohlene Vorgehen, leicht skalierbare Elektrolyse-Anlagen zu entwickeln. In der genannten Studie heißt es: „Stacks selbst sind aber auch bei großen Anlagen auf eine bestimmte Leistung limitiert (auch zukünftig nur einstelliger Megawatt-Bereich erwartet) und werden modular ergänzt („numbering up“), um größere Systemleistungen zu erreichen“.

HyPLANT100 betrachtet dazu anfangs Kleinelektrolyseure, die zunächst in einer Vorfertigung mit weiterer Peripherie zu größtmöglichen seriellen Baugruppen (sogenannten *Skids*) verschaltet bzw. montiert werden.

Aufgrund variierender Kundenanforderungen bzgl. beispielsweise der Gesamtleistung, der Installationsrandbedingungen sowie des Medienzu- und Abflusses soll eine gute Skalierbarkeit von solchen Elektrolyse-Anlagen berücksichtigt werden. Hierfür wird eine Modularisierung einzelner Skid-Konfigurationen und deren Peripherie angestrebt, die dann zusammen die großskalige Elektrolyse-Anlage bilden. Diese Weiterentwicklungen der Montage sollen unabhängig von der Verfahrenstechnik der Elektrolyseure erfolgen, wodurch Standards für einzelne Peripheriekomponenten und deren Schnittstellen als ein weiteres Ziel für das Projekt HyPLANT100 definiert wurden. Abbildung 1 zeigt einen Elektrolyseur der Firma H2 Core Systems GmbH in Schaltschrankgröße. Anhand der Abbildung lässt sich das Potenzial der Modularisierung zu größtmöglichen seriellen Baugruppen für großskalige Elektrolyse-Anlagen erkennen. Um die genannten Ziele zu erreichen, ist die Verwendung intelligenter Sensorik, Steuerung und mobiler Robotik sowie die durchgängige Digitalisierung des gesamten Produktionsprozesses notwendig.

Auch durch eine zuvor definierte Skid-Größe bleibt die Konfiguration der Anlage je nach Größe und Leistung kundenspezifisch. Um den in [1] berechneten Wasserstoffbedarf von 44 GW bis zum Jahr 2030 decken zu können, ist eine große Anzahl von Elektrolyseuren notwendig. Eine Standardisierung der Baugruppen aus Skid und Peripherie sowie die automatisierte Montage der Komponenten und Anlage ist dabei eine ebenfalls in [1] definierte Handlungsempfehlung an die Elektrolysebranche im Hinblick auf die wachsenden Produktionsvolumina.

Die Programmierung der Industrieroboter für sowohl variable Spezifikationen anhand der Skid-Konfigurationen wie auch für eine steigende Produktionsanzahl an Elektrolyseuren zu automatisieren, ist dabei ein wichtiger Teil der Anforderungen. Mithilfe eines integrativen und durchgängigen Datenmanagements lassen sich neben einer Beschreibung von Individualisierungen der Anlage auch die entsprechenden Informationen für die Montageprozesse ableiten. Für die (teil-)automatisierte Montage ist eine genaue Betrachtung der Prozesse Voraussetzung. Hierdurch ergibt sich ggf. eine sinnvolle Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), die die

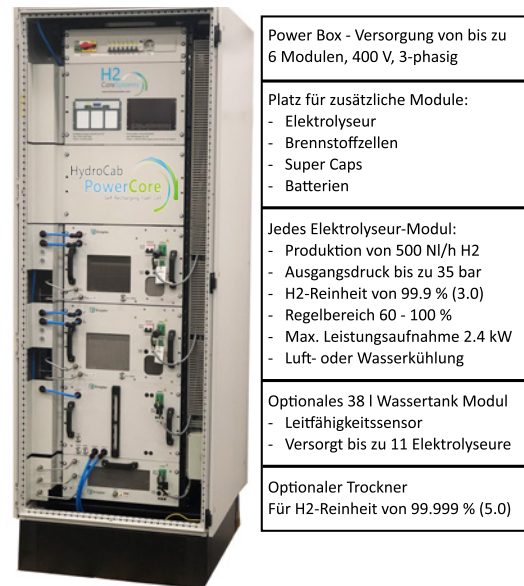


Abbildung 1: Elektrolyseur der Firma TC Hydraulik in Schaltschrankgröße.
Quelle: H2 Core Systems GmbH.

geforderte Automatisierung einzelner Fertigungsschritte unterstützt. Das durchgängige Datenmanagement ermöglicht darüber hinaus die Integration der Qualitätssicherung, die über den gesamten Produktlebenszyklus konsistent durchgeführt werden kann und eine gute Dokumentation der Anlage zur Folge hat. Demnach ist die Verwendung eines konsistenten Datenformats eine entscheidende Voraussetzung für die Digitalisierung. Mit der *Automation Markup Language* (AutomationML, abgekürzt AML) wird in diesem Beitrag ein Format präsentiert, welches für den standardisierten Austausch von Produkt- und Prozessdaten vom AutomationML e.V. entwickelt wurde und einen möglichen Lösungsansatz darstellt.

Durch die noch frühe Phase des Projektes bleiben dennoch die Forschungsfragen bestehen, ob AML die dargestellte Kette abbilden kann und wie eine solche Abbildung konkret aussehen kann. Im Laufe des Projektes sollen diese weiter untersucht und beantwortet werden, genauso wie die Frage, welche Im- und Exporter zu weiteren Engineering-Tools explizit für die durchgängige Umsetzung einer Tool-Chain erforderlich sind.

Im weiteren Projektverlauf soll eine durchgängige Abbildung der Anlageninformationen erfolgen. Mithilfe der Daten der zu fertigenden Skids sollen dann automatisiert die erforderlichen Roboterprogramme sowie die Arbeitsteilungen zwischen Menschen und Roboter bei MRK-Szenarien generiert werden.

Dazu werden eine *Programm-Template-Bibliothek* (PTL) und eine Wissensdatenbank aufgebaut, mithilfe derer die grundlegenden Teilprozesse abgebildet werden. Durch die Entwicklung eines Algorithmus, der aus der spezifischen Anlagenkonfiguration und dessen Datenstruktur Montageprozesse ableitet und die dazu passenden Programmblöcke aus der PTL wählt und diese parametrisiert, kann eine automatische Erzeugung der Programme umgesetzt werden. Mithilfe von *Produkt-Prozess-Ressourcen-Skill Modellen* (PPRS-Modellen) wird eine Wissensdatenbank erstellt, die

es ermöglicht, vorab eine optimierte Aufteilung und Auswahl einzelner Prozesse in manuelle Arbeiten, automatisierte Arbeiten oder Arbeiten in einer Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK).

2. AutomationML

Der Datenaustausch zwischen heterogenen Engineering Tools wurde als Engstelle und damit als Kosten- und Aufwandstreiber im Engineering-Workflow identifiziert. [2, 3]

Die Industrialisierung von Produktionsprozessen, auch im hier betrachteten Beispiel der Elektrolyseure, erfordert eine Effizienzsteigerung und eine damit einhergehende Kostenverminderung. Um im Datenaustausch durch eine Standardisierung die Effizienz zu steigern, ist die Nutzung eines einheitlichen und standardisierten Datenformates ebenfalls ein wichtiger Schritt hin zur Industrialisierung der Produktionsprozesse. Hierdurch können zusätzliche Schnittstellen zwischen einzelnen Entwicklungstools und aufwendige und fehlerträchtige Datenformatierungen und -konvertierungen vermieden werden.

Computer Aided Engineering Exchange (CAEX) ist ein Standardformat nach IEC 62424, das auf einem XML-Schema basiert, neutral und frei zugänglich ist. AutomationML basiert auf diesem CAEX-Format und dient als objektorientierte Modellierungssprache zur Modellierung, Speicherung und dem Austausch verschiedener Engineering-Daten. Das CAEX-Format dient dabei durch die Objekttopologie als Grundgerüst in AutomationML.

Aus diesen Gründen soll in dem vorliegenden Konzept der Lösungsansatz des einheitlichen Datenaustausches mithilfe von AutomationML dargestellt werden. Der Datenfluss über den gesamten Produktionslebenszyklus einer Anlage hinweg ist wie oben bereits erwähnt eine Engstelle für effizientes und qualitatives Engineering. Grund dafür sind die Heterogenität der verwendeten Software-Systeme und die damit verbundenen Inkompatibilitäten der Daten. Hier setzt AutomationML an:

AutomationML hat sich zum Ziel gesetzt, den Ansatz eines offenen Datenformates für die komplette Engineering-Kette zu konkretisieren und zu standardisieren. [4, 5] Hierfür wurde 2006 durch Daimler der Verein AutomationML e.V. gegründet, für den führende Industrieunternehmen und Anwender automatisierender Technologien eingeladen wurden, um das Ziel der Vereinheitlichung in einem Datenformat zu erreichen. Mittlerweile besteht der Verein aus über 50 verschiedenen Industrieunternehmen, Instituten und Lehrstühlen, die sich dieser Aufgabe angenommen haben. [5]

3. Stand der Technik

Das angesprochene Format AutomationML hat sich im Laufe seiner Standardisierung zunehmend etabliert und wird in verschiedenen industriellen Bereichen eingesetzt. In [6] sind verschiedene Beispiele aufgezeigt, u. a. von den Firmen ABB, BMW, Daimler, Festo und Volkswagen.

Im Bereich industrieller Anwendungen ist eine Vielzahl von Werkzeugen entstanden und im Einsatz, die AutomationML zum Datenimport und -export nutzen. Eine Übersicht ist in

[7] gegeben. Beispielhaft ist hier die Verwendung von AutomationML bei RF::Suite zu nennen. Hier wird AutomationML für den Import von Topologie-, Geometrie- und Kinematik-Informationen zur Abbildung eines digitalen Zwillings einer Prozessanlage sowie der digitalen Inbetriebnahme verwendet. Genauso kann auf Basis der CAEX-Dateien ein digitales Abbild realer Anlagen erstellt werden, um diese zu optimieren oder zu überwachen. Ein Beispiel für eine industrielle Software-Entwicklungskooperation ist in [8] aufgezeigt. Hier wird ein Importer speziell für ABB RobotStudio beschrieben, der das Importieren von COLLADA-Dateien für weitere Simulationen unterstützt. Ein weiteres Beispiel für einen durchgängigen Workflow zur virtuellen Inbetriebnahme unter Verwendung von AutomationML wird in [9] vorgestellt. Der Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) hat AutomationML ebenfalls bereits in zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten erfolgreich eingesetzt.

Das Ziel des Vorhabens *conexing* war, alle am Produktentwicklungs- und Produktionsprozess beteiligten Menschen interdisziplinär und unternehmensübergreifend von der Konzipierungsphase bis zur virtuellen Produktionsüberprüfung in einer gemeinsamen Arbeitsumgebung zusammenzubringen – in der so genannten *conexing*-Lösung. Die hier entwickelte Lösung basierte dabei auf AutomationML [10]. In diesem Vorhaben wurde auch ein Container-Format spezifiziert und implementiert, das weitere Informationen und Daten enthalten kann, beispielsweise Montagepläne oder Informationen für die Assistenz der manuellen Arbeitsteile. Im Vorhaben ROBOTOP wurde ein webbasierter 3D-Konfigurator entwickelt, der durch die Konfiguration einer roboterbasierten Automatisierungslösung führt. Diese Konfiguration kann dann von Systemintegratoren oder Endnutzern im XML-basierten Datenformat AutomationML heruntergeladen und in andere Softwaretools zur weiteren Verwendung eingebunden werden [11].

Der aktuelle Forschungsstand und die Beziehung von AutomationML zur Industrie-4.0-Umgebungen ist in [12] diskutiert. Auf Basis des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0) und der Referenzarchitektur des *Industrial Internet Consortium* (IIRA) wird in [13] mithilfe von AutomationML die automatische Generierung eines digitalen Zwillings von *Cyber-physischen Systemen* (CPS) untersucht und beschrieben.

Die Verwendung von AutomationML für die Beschreibung von Prozessen ist in verschiedenen Arbeiten adressiert worden. In [14] wird die Anwendung des AutomationML-Datenformats im Hinblick auf seine Anwendbarkeit für die Beschreibung von Fertigungsprozessen aufgezeigt. Ebenfalls in diesem Bereich liegt die Arbeit in [15]. Hier wird die AutomationML-basierte Speicherung von Daten für Roboterbahnen beschrieben, wobei die roboterbasierte Additive Fertigung als Anwendungsbeispiel betrachtet wird.

Die modellgetriebene Transformation eines Transportsystems zwischen dem PX5-Konfigurator für Montratec und AutomationML beschreibt [16]. Ziel des Beitrages ist eine verbesserte Synthese zwischen Fertigungslinien und Simulationstools. Die transformierten Daten werden anschließend in Siemens Plant Simulation weiterverwendet.

4. Das Konzept

Wie in Abschnitt 1 bereits beschrieben, soll für den gesamten Produktionsprozess bis hin zur Montage durchgängig das Datenaustauschformat AutomationML verwendet werden. Hierdurch werden neben den einzelnen verwendeten Komponenten auch deren Beziehungen untereinander beschrieben. AutomationML bietet hierbei den Vorteil der Produktstrukturierung und der zentralen Verwaltung aller extern abgelegten Informationen durch Referenzierungen.

Die oben beschriebene PTL beinhaltet einzelne Programm-Templates für die Roboterprogramme. Mithilfe der beschriebenen Schnittstellen der einzelnen Komponenten in dem spezifischen Produkt zueinander und der PTL, lassen sich mithilfe eines passenden Algorithmus für die Montage entsprechende Roboterprogramm-Templates auswählen und zu einem Roboterprogramm zusammenfügen. Durch die vorangegangene Definition von Roboterprogramm-Templates und deren Randbedingungen und der Kombination der Wissensdatenbank lassen sich die Montageprozesse in manuelle bzw. roboterbasierte Arbeitsschritte kategorisieren: für automatisierbare und in der Wissensdatenbank hinterlegte Schritte bestehen geeignete parametrisierbare Templates, sonst wird der Schritt zunächst manuell ausgeführt. Mithilfe eines solchen Tools wird die derzeitige größtenteils manuelle Fertigung von Wasserelektrolyse-Anlagen durch fortschreitende Template-Erstellung kontinuierlich automatisierter. Das entspricht dem übergeordneten Ziel von H2Giga – der Industrialisierung der Fertigung solcher Anlagen.

Abbildung 2 zeigt einen groben Ablaufplan der zuvor beschriebenen automatischen Generierung des Roboterprogramms.

Für die Beschreibung des Konzeptes wird im nächsten Abschnitt vertieft auf das Strukturbild aus Abbildung 2 eingegangen. Dafür werden Herausforderungen der einzelnen Schritte thematisiert und mögliche Lösungsansätze geliefert.

Zunächst startet der Algorithmus mit dem Abruf der Produktdatei (CAEX). Die CAEX-Datei beschreibt die gesamte Elektrolyse-Anlage, bestehend aus Einzelelektrolyseuren, zentralen Peripheriekomponenten beispielsweise zur Wasser- sowie Wasserstoffreinigung und weiteren Produktdaten, wie z. B. der Art und Größe des Skid-Rahmens, in den die einzelnen Elektrolyseur- und Peripheriekomponenten eingebaut werden sollen. Die Anlage selbst ist in vorgelagerten Schritten aufgrund der gewünschten Gesamtleistung, der baulichen Randbedingungen sowie der Randbedingungen für die Medizinzu- und Abfuhr konzipiert worden. Mithilfe einer vordefinierten Suchfunktion wird die CAEX-Datei der Anlage nach Interfaces abgetastet. Gesucht wird hier nach montagerelevanten Schnittstellen zwischen den zu verbauenden Komponenten, sowie der Positionsdaten der Komponenten innerhalb des Skids. Für die Schnittstellenbetrachtung sind elektrische und mechanische Verbindungen von Bedeutung.

AutomationML stellt zur Beschreibung von Objekten und deren Objekthierarchien sogenannte *InternalElements* zur Verfügung. Diesen können mithilfe von Interfaces und Attributes verschiedene Schnittstellen und Informationen zugewiesen werden. In *SystemUnitClasses* können dann

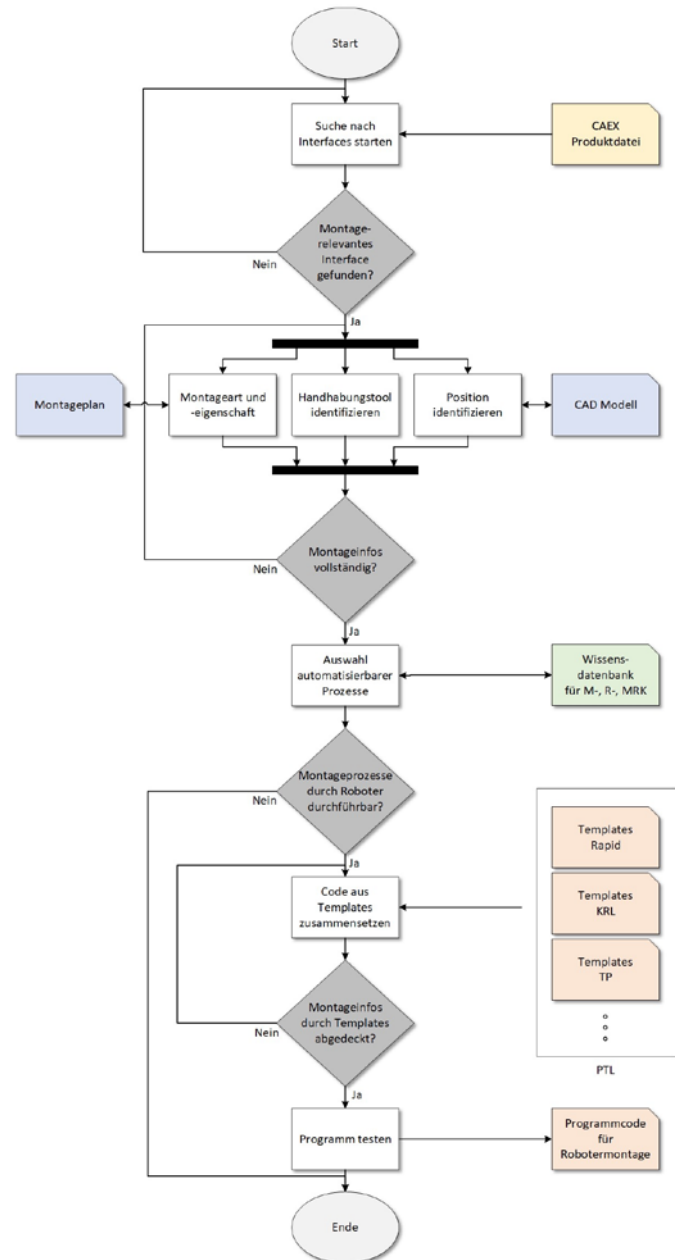


Abbildung 2: Flussdiagramm der automatischen Roboterprogrammerstellung.

wiederverwendbare Klassen definiert werden, bestehend aus den zuvor genannten Strukturen. Durch *AttributeTypes* können Attributen zusätzliche Eigenschaften zugewiesen werden und Attribute vom gleichen Typ zusammengefasst werden.

Durch *RoleClasses* können *SystemUnitClasses* Rollen zugewiesen werden, die die Funktionen der Klasse weiter beschreiben. Die Rollen beschreiben die Funktionen zunächst abstrakt und lösungsspezifisch. In der Instanz-Hierarchie lassen sich dann einzelne Objekte aus den definierten Klassen ableiten, welche die zuvor beschriebenen Eigenschaften erben. Durch diese Struktur, die darin enthaltenen Interfaces und durch *InternalLinks* ist es möglich, die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten abzubilden. Mithilfe der Interfaces können Informationen aus externen Daten referenziert werden. In AutomationML wird dazu für Signal- und

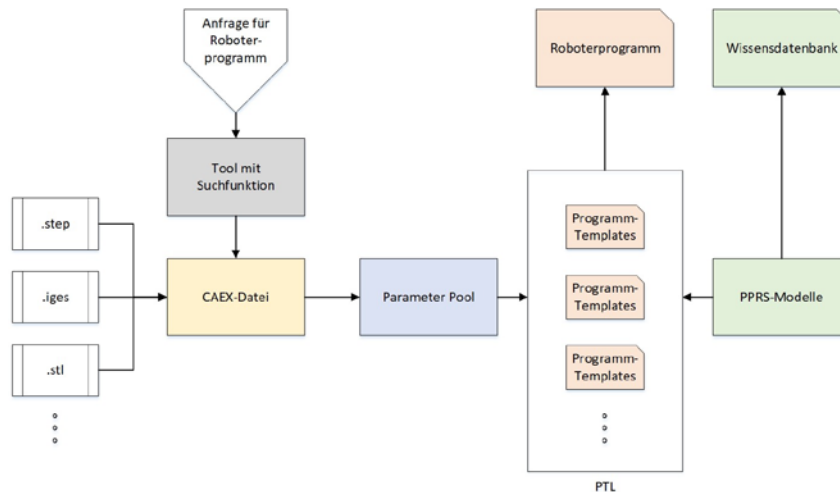


Abbildung 3: Darstellung der Arbeitspakete.

Verhaltensinformationen auf PLCopen XML-Dateien und zur Abbildung von Geometrie und Kinematik-Daten auf COLLADA-Dateien verwiesen [5]. In einem ersten Schritt der Umsetzung des Konzeptes wird eine CAEX-Datei erstellt, die eine generische Elektrolyse-Anlage beschreibt. Diese umfasst neben dem Elektrolyseur auch die dazu gehörige Peripherie wie zum Beispiel die Wasseraufbereitung oder die Gastrocknung. Begrenzt wird die CAEX-Anlage durch die oben beschriebene Definition des Skids. Die darin beschriebenen Attribute zu den Schnittstellen und die referenzierten Geometriedaten sind die Grundlage für die automatische Erstellung von Roboterprogrammen.

Die hinterlegten Attribute der zu verbauenden Komponenten beschreiben Informationen wie zum Beispiel Abmaße, Gewicht und ggf. Material. Mithilfe dieser Informationen lässt sich etwa die Handhabung der zu montierenden Komponente bestimmen.

Mithilfe der Basis-Interface-Klasse *ExternalDataConnector* lassen sich externe Dateien referenzieren. Dies ist bereits eine in AutomationML standardisierte Vorgehensweise, um auf das verknüpfte CAD-Modell der Anlage zurückzugreifen. Auf diese Weise sind die Positionsdaten für das Montagevorhaben zu ermitteln.

Die bedeutendsten Positionsdaten sind hier die Positionierungen der Einzelkomponenten in der Gesamtanlage, die Positionen beispielsweise für deren Befestigungen und die Positionen der elektrischen und medientechnischen Verbindungen. Für das Auslesen der Positionsdaten muss erneut eine Suchfunktion definiert werden, die die Modelldatei nach den geforderten Positionsdaten scannt. Wird bei dieser Suche auf die Modelldatei der zu montierenden Teilkomponente zurückgegriffen, müssen die Positionsdaten von dem lokalen Koordinatensystem des Modells auf das globale Koordinatensystem der Anlage transformiert werden. Es bleibt zu untersuchen, ob es von Vorteil ist, die Koordinaten zu transformieren oder aber für die Positionsdatenermittlung die Modelldatei der gesamten Anlage zu verwenden.

Mit einem ähnlichem Vorgehen lässt sich mithilfe eines geeigneten Montageplans auf die Montageart und -eigenschaft schließen, die Informationen wie die Verschraubung oder

das Anziehmoment bereitstellen. In diesem Montageplan ist auch die Sequenz von Operationen festgelegt, die für die nachfolgende Montage abgearbeitet wird.

Mithilfe der bereits oben beschriebenen Wissensdatenbank und den zugrunde liegenden PPRS-Modellen wird an dieser Stelle die Automatisierbarkeit der identifizierten Prozesse untersucht und eingeordnet.

Zuvor erstellte und getestete Roboterprogramm-Templates beschreiben Lösungen für einzelne Handhabungsabläufe, Transportaufgaben sowie Montageprozesse und bilden die beschriebene PTL. Diese Templates geben eine Definition von benötigten Parametern vor, die bei Vollständigkeit die anfangs gestartete Suchfunktion beenden. Anhand der Parameter und mithilfe des Algorithmus lassen sich nun geeignete Programm-Templates für verschiedene Codesequenzen zu einem vollständigen Roboterprogramm, entsprechend dem Montagevorhaben, auswählen und anschließend zusammensetzen. In der PTL werden Roboterprogramm-Templates basierend auf den spezifischen Roboterprogrammiersprachen der einzelnen Roboterhersteller für die Codegenerierung vorgehalten.

Hieraus ergeben sich für die Umsetzung des Lösungskonzeptes bereits erste Aufgaben. Neben der Definition von geeigneten Suchfunktionen werden auch passende Datenstrukturen benötigt. In [17] wird bei der automatischen Generierung von Prozessoperationen, hier einer Transportaufgabe, auf Basis des Standardformates IEC 62264 auf die Programmiersprache *Planning Domain Definition Language* (PDDL) zurückgegriffen. Das Ergebnis ist eine auf ANSI/ISA-95 [18] basierende Prozessbeschreibung. Der Einsatz von ANSI/ISA-95 ist an einem durchgängigen Beispiel in [19] dargestellt. Es bleibt zu untersuchen, ob die vorliegende Standardisierung auch für den vorgestellten Kontext adaptierbar und von Vorteil ist.

Die Erstellung von generischen Produkthanlagen für großskalige Elektrolyseure im AutomationML Editor [7; 5], einem frei verfügbaren Tool, bzw. über die AutomationML Engine ist unabhängig von der gewählten Programmiersprache eine schon beschriebene und zielführende Teilaufgabe. Hierbei ist die Kooperation mit den Partnern des Konsortiums eine gute Voraussetzung für valide Daten.

Die referenzierten Informationen (ECAD-Dateien, Protokolle der Qualitätssicherung etc.) sowie Informationen aus den Montageprozessen wie beispielhaft das Drehmoment einer Flanschverbindung benötigen eine strukturierte Dateiverwaltung. Aus dem oben vorgestellten Strukturbild lassen sich weitere Aufgaben ableiten, wie sie in Abbildung 3 visualisiert sind, die im Folgenden weiter erläutert werden.

Für die Positionsdatenerfassung der Montagevorhaben werden Referenzierungen auf die CAD-Modelle verwendet. Hierfür müssen die CAD-Daten entsprechend im CAEX-Dokument eingebunden und referenziert werden. Die Eignung von AutomationML für derartige Vorgehensweisen ist am LPS bereits zum Transfer von ECAD-Modellen zu Positionsspezifikationen von Bauelementen [20] sowie zum Vorhalten von Stücklisteninformationen unterschiedlicher Produktvarianten [21] im Kontext der Klemmenleistenmontage erfolgreich verifiziert worden. Ebenso wurde im Rahmen eines Projektes zur robotergestützten Automatisierung einzelner Montage- und Verkabelungsschritte in der Herstellung von Schaltschränken per AutomationML ein digitales Modell eines Schaltschranks entwickelt, das neben einer dreidimensionalen Darstellung der Bauelemente auch weitere Informationen zur Verkabelung enthält [22].

Für die Erzeugung verschiedener Programm-Templates ist die Analyse bisheriger einzelner Montageprozessschritte erforderlich. Die systematische Kategorisierung dieser Schritte könnte mithilfe der PPRS-Modelle erfolgen, die ebenfalls für die Erstellung der Wissensdatenbank genutzt werden können. In [23] werden diese Modelle zum Management von Produktvarianten in der Anlagenplanung verwendet. Hier wird der Schraubprozess für verschiedene Produktvarianten mithilfe von PPRS-Modellen modelliert. Der Umfang eines Skills stellt dabei einen sinnvollen Rahmen für die zu definierenden Roboterprogramm-Templates dar. Sind die verschiedenen Skills für die Montageprozesse oder Handhabungsaufgaben definiert und automatisierbar, können diese in Programm-Templates übersetzt werden. Je nach Roboterhersteller sind die Programm-Templates mithilfe der entsprechenden Programmiersprache umzusetzen.

Die variierenden Abmaße der Komponenten je nach Elektrolysetechnik und Größenordnung der Anlage bringen

unterschiedliche Montageverfahren mit sich. Daraus resultieren unterschiedliche Handhabungsmöglichkeiten und damit auch Montageverfahren. Für die Umsetzungsphase sollte zunächst mit einer Technologie der Elektrolyse, einer festgelegten Anlagengröße und einer herstellereinspezifischen Roboterprogrammiersprache begonnen werden, um den Umfang der Variationen von Montageverfahren und Programm-Templates zu begrenzen. Für eine vollumfängliche Lösung ist die Programmlösung dann auf weitere Verfahrenstechniken, Anlagengrößen und Roboterhersteller zu erweitern.

5. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wird ein Lösungskonzept präsentiert, das Roboterprogramme automatisch generiert. Basis dieses Lösungskonzeptes ist der standardisierte Datenaustausch durch eine XML-Datenstruktur, beschrieben durch die Automation Markup Language AutomationML. Für die anstehende Umsetzung wurde ein struktureller Ablauf präsentiert, der einen möglichen Lösungsweg beschreibt. Die zur Erstellung der Wissensdatenbank erstellten PPRS-Modelle bieten eine weitere Grundlage, die für Optimierungsmaßnahmen der Montage verwendet werden kann. Auf Basis dieser Ergebnisse können sich MRK-basierte Montageprozesse ableiten lassen. Durch zuvor festgelegte Rahmenbedingungen für die Automatisierung kann schon bei der Erzeugung des Roboterprogramms eine Prozessaufteilung erfolgen, welche Prozessschritte von einem Menschen bzw. von einem Roboter oder in einer Kollaboration durchzuführen sind.

Danksagung

Das Projekt HyPLANT100 wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Leitprojektes H2Giga. Das LPS-Teilvorhaben „Flexibilisierung des Automatisierungs- und Roboterprogrammierungsprozesses bei Hybriden Montagesystemen“ wird darin unter dem Förderkennzeichen 03HY114B gefördert und vom Projektträger Jülich (PtJ) betreut. Es hat eine Laufzeit bis März 2025. Wir bedanken uns an dieser Stelle ganz besonders für diese Förderung.

Referenzen

- [1] Smolinka T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A. (2018). *Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Abgerufen von: <https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Studie-IndWEDe.pdf>
- [2] Schmidt, N., Lüder, A., Steininger, H., Biffi, S. (2014). AutomationML for user requirements fulfilment related to engineering process efficiency. In *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4902-4908). IEEE.
- [3] AutomationML e.V. (2021). *AutomationML - Brochure*. Abgerufen von: <https://www.automationml.org/wp-content/uploads/2021/06/AutomationML-Brochure.pdf>
- [4] Draht, R. (2010). *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*. Berlin, Heidelberg
- [5] Draht, R. (2021). *AutomationML. A Practical Guide*. Oldenbourg
- [6] Draht, R. (2021). *AutomationML. The Industrial Cookbook*. Oldenbourg
- [7] AutomationML e.V. (2021). *AutomationML Tools*. Abgerufen von: <https://www.automationml.org/about-automationml/aml-tools/>
- [8] Kühlenkoetter, B., Schyja, A., Hypki, A., & Miegel, V. (2010). Robot workcell simulation with AutomationML support-An element of the CAX-Tool chain in industrial automation. In *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)* (pp. 1-7). VDE.
- [9] Hämmerle, H., Strahilov, A., Draht, R. (2016). AutomationML im Praxiseinsatz. *atp magazin*, 58(05), 52-64. doi: 10.17560/atp.v58i05.567
- [10] Bartelt, M., Kühlenkötter, B. (2016). *conexing Abschlussbericht. Werkzeug zur interdisziplinären Planung und produktbezogenen virtuellen Optimierung von automatisierten Produktionssystemen. Bochumer Universitätsverlag Westdeutscher Universitätsverlag (Maschinenbau, 10)*. doi: 10(9783899667653).

- [11] Schäffer, E., Bartelt, M., Pownuk, T., Schulz, J. P., Kuhlenkötter, B., Franke, J. (2018). Configurators as the basis for the transfer of knowledge and standardized communication in the context of robotics. *Procedia CIRP*, 72, 310-315.
- [12] Zhao, J., Schamp, M., Hoedt, S., Aghezaf, E. H., Cottyn, J. (2021). AutomationML in Industry 4.0 Environment: A Systematic Literature Review. *Advances in Automotive Production Technology–Theory and Application*, 162-169.
- [13] Pokojski, J. (2020). Using AutomationML and graph-based design languages for automatic generation of digital twins of cyber-physical systems. In *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems–Real-life Applications: Proceedings of the 27th ISTE International Conference on Transdisciplinary Engineering, July 1–July 10, 2020* (Vol. 12, p. 135). IOS Press.
- [14] Lüder, A., Hundt, L., Keibel, A. (2010). Description of manufacturing processes using AutomationML. In *2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010)* (pp. 1-8). IEEE.
- [15] Babcsinchi, M., Freire, B., Neto, P., Ferreira, L. A., Señaris, B. L., Vidal, F. (2019). AutomationML for Data Exchange in the Robotic Process of Metal Additive Manufacturing. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 65-70). IEEE.
- [16] Novak, P., Kadera, P., Wimmer, M. (2017). Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems—Transportation system case study. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE.
- [17] Wally, B., Vyskočil, J., Novák, P., Huemer, C., Šindelár, R., Kadera, P., ... Wimmer, M. (2019). Flexible production systems: Automated generation of operations plans based on ISA-95 and PDDL. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 4062-4069. doi:10.1109/LRA.2019.2929991
- [18] ANSI/ISA 95.00.03. (2005). Enterprise-Control System Integration. Part 3: Activity models of manufacturing operations management. ANSI: www.ansi.org
- [19] Harjunkoski, I., Bauer, R. (2014). Sharing data for production scheduling using the ISA-95 standard. *Frontiers in Energy Research*, 2, 44. doi: 10.3389/fenrg.2014.00044
- [20] Linsinger, M., Kutschinski, J., Stecken, J., Kuhlenkötter, B. (2018). Mensch-Roboter-Kollaboration im Schaltschrankbau: Konzept zum Setzen von Endhalterklemmen bei der Klemmenleistenmontage. *Automation*, 19, 95-107.
- [21] Linsinger, M., Stecken, J., Kutschinski, J., Kuhlenkötter, B. Orts- und aufgabenflexibler Einsatz von Leichtbaurobotern in der Montage.
- [22] Spies, S., Kuhlenkötter, B. (2019). *Automatisch verdrahtet*. Abgerufen von: <https://www.industrial-production.de/mrk---cobots/automatisch-verdrahtet.htm>
- [23] Herzog, J., Röpke, H., Lüder, A. (2020). Management der Produktvarianz in der Anlagenplanung der Automobilendmontage unter Nutzung der PPRS Modellierung. In *21 th VDI-Congress Automation 2020*.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter (geb. 1971) ist Professor und Leiter des Lehrstuhls für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum (RUB). Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Planung, Simulation und Umsetzung von Produktionssystemen und Smarten Product-Service-Systemen. Prof. Kuhlenkötter ist u. a. Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) und der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik (MHI) sowie Wissenschaftlicher Leiter des Forschungszentrums für das Engineering Smarter Produkt-Service Systeme (ZESS).



Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum
Industriestraße 38C
44894 Bochum
@kuhlenkoetter@lps.ruhr-uni-bochum.de

Dr.-Ing. Alfred Hypki (geb. 1963) ist Oberingenieur am LPS. In seinen Forschungsarbeiten stehen die Themen Roboterprogrammierung und Arbeitszellensimulation sowie die Mensch-Roboter-Kollaboration im Vordergrund. Dr. Hypki ist Leiter der Arbeitsgruppe Geometrie und Kinematik im AutomationML e.V.



Dr.-Ing. Alfred Hypki
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum
Industriestraße 38C
44894 Bochum
@hypki@lps.ruhr-uni-bochum.de

Malte Jakschik, M.Sc. (geb. 1993) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am LPS. Mit dem Projekt H2Giga und den darin enthaltenen Teilprojekten HyPLANT100 und FertiRob arbeitet er an zukunftsweisenden Themenstellungen rund um die Produktion von Wasserstoffanlagen.



Malte Jakschik, M.Sc.
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum
Industriestraße 38C
44894 Bochum
@jakschik@lps.ruhr-uni-bochum.de

Lernen Sie die Zukunft der Automatisierung kennen

In unserer neuen Rubrik atp^{hd} dreht sich alles um die Automatisierungsexpert:innen von morgen. Auf dieser Seite stellen zukünftig in loser Reihenfolge Doktorand:innen ihr Promotions-Thema und sich selbst der Automatisierungs-Community vor. So können Sie, liebe Leserinnen und Leser, einen Einblick in die aktuellen Forschungstrends gewinnen, während die jungen Nachwuchskräfte Netzwerke für ihren beruflichen Weg nach der Promotion knüpfen können.

Lara Waltersmann:

Gestaltung eines Informationssystems für das Umweltmanagement

Doktorvater: Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer (Universität Stuttgart)

Worüber promovieren Sie?

Neben Politik, Behörden und Gesellschaft fordern auch Kunden und Investoren immer mehr Transparenz und eine Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit von Unternehmen. Durch Monitoring und das Setzen von Umweltzielen bildet das Umweltmanagement hierbei die Grundlage für eine Umsetzung. Aufgrund der erforderlichen Datenvielfalt und -menge werden jedoch Informationssysteme zur Unterstützung benötigt. Das Ziel dieser Dissertation ist daher, eine Methode zur Gestaltung eines Informationssystems für das Umweltmanagement zu entwickeln.

Was bringt das der produzierenden Industrie?

Durch die gestiegenen Transparenzanforderungen entsteht ein Mehraufwand in der Datenerfassung. Fehlende Koordination führt zudem zu Dateninkonsistenzen. Durch die Methode werden Unternehmen befähigt, alle relevanten Daten für das Umweltmanagement zu erfassen, verarbeiten sowie Stakeholdern zugänglich zu machen. Dieses reduziert den Aufwand und systematisiert gleichzeitig die Datenerfassung.

Warum genau dieses Thema?

Wir brauchen eine nachhaltige Wirtschaft, um Herausforderungen wie die Klimakrise angehen zu können. Digitalisierung kann und muss hier unterstützen, z. B. um Prozesse zu vereinfachen und Daten zu analysieren. An genau dieser Schnittstelle der zwei transformativen Themen – Nachhaltigkeit und Digitalisierung – sehe ich große Potenziale, um das Ziel einer nachhaltigen Wirtschaft auch zu erreichen.

Kontakt:

Lara Waltersmann
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
+ 49 711 970-1756
lara.waltersmann@ipa.fraunhofer.de



Sie finden mich außerdem auf:

Research Gate:



LinkedIn:



XING:



Peer-Review: 28.10.2021

Realisierung und Evaluation des Verwaltungsschalen-Metamodells

Python-SDK PyI40AAS und Lösungen für die praktische Umsetzung

Torben Miny, Michael Thies, Sebastian Heppner, Igor Garmayev, Leon Möller, Tobias Kleinert, RWTH Aachen University

Im Rahmen von Industrie 4.0 gilt das Konzept der Verwaltungsschale als eines der zentralen Ergebnisse. In diesem Beitrag wird das vom Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik der RWTH Aachen University entwickelte Python-SDK PyI40AAS zwei Jahre nach Beginn der Arbeiten vorgestellt. Es ist eine Realisierung des von der Plattform Industrie 4.0 veröffentlichten technologie-neutralen UML-Modells für die Repräsentation von Informationen in der Verwaltungsschale. Zudem werden einige Design-Entscheidungen bei der Implementierung beleuchtet und daraus Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Metamodells abgeleitet.

#Verwaltungsschale #Industrie 4.0 #Software Development Kit #Python

Realization and evaluation of the Asset Administration Shell metamodel

Python SDK PyI40AAS and solutions for the practical implementation

In the context of Industry 4.0, the concept of the Asset Administration Shell is considered one of the central results. This paper presents the Python SDK PyI40AAS developed by the Chair of Information and Automation Systems for Process and Material Technology after two years of work. It is a realization of the technology-neutral UML model for the representation of information in the Asset Administration Shell published by the Platform Industry 4.0. In addition, some design decisions during the implementation are highlighted and recommendations are made for the further development of the metamodel.

#Asset Administration Shell #Industry 4.0 #software development kit #Python

1. Einleitung

Zehn Jahre sind seit dem Beginn der Idee Industrie 4.0 vergangen und das Konzept der *Verwaltungsschale* (VWS) gilt als eines der zentralen Ergebnisse. Die VWS ist ein Konzept für den herstellerübergreifenden Datenaustausch [1] und wurde 2016 in der DIN SPEC 91345 [2] als deutscher Standard und 2021 in der IEC 63278 [3] international veröffentlicht. Eine VWS soll die Informationen über ein Asset (z. B. eine Pumpe oder ein Temperatursensor) verwalten, einen standardisierten Zugriff darauf bieten und die horizontale sowie vertikale Integration über den gesamten Lebenszyklus des Assets unterstützen. Als Asset wird ein „physisches oder logisches Objekt, das sich im Besitz einer Organisation befindet oder unter dem Gewahrsam einer Organisation steht, und entweder einen wahrgenommenen oder tatsächlichen Wert für die Organisation hat“, bezeichnet [4]. 2018 veröffentlichte die Plattform Industrie 4.0 ein technologie-neutrales UML-Modell für die Repräsentation von Informationen in der VWS (im Folgenden „VWS-Metamodell“), das aktuell in der Version 3.0RC01 [4] vorliegt. Ein Hauptfokus liegt auf der semantischen Annotation der Informationen, die mittels Referenzen auf Begriffsdefinitionen umgesetzt wird. Neben dem VWS-Metamodell wurden zugehörige

Datenformate sowie eine abstrakte Dienst-Schnittstelle für den Zugriff auf die Informationen definiert.

Für die praktische Anwendbarkeit des VWS-Metamodells werden konkrete Realisierungen in Form von Software-Applikationen benötigt. Hierfür dient das VWS-Metamodell als Basis für Datenmodelle. Zur Wiederverwendung von Software-Code ist es sinnvoll, Software-Bibliotheken bzw. *Software Development Kits* (SDKs) zu entwickeln, die ein solches Datenmodell bereitstellen und für Applikationen nutzbar machen. Ein SDK bietet in der Regel eine vollständige Implementierung der Spezifikation, sodass VWS-konforme Daten verarbeitet werden können. Im Rahmen des BaSys4.0-Projekts sind erste Open-Source-SDKs in den Programmiersprachen C, C# und Java entstanden [5]. Zusätzlich wurden Umsetzungen von SAP in TypeScript [10] und JavaScript [11], vom Department of Electrical Electronic and Computer Engineering der University of Catania basierend auf OPC UA [12], von der NOVA School of Science and Technology in JavaScript [6] und von der Plattform Industrie 4.0 der AASX Package Explorer in C# [13] veröffentlicht.

Die Ausgestaltung der VWS ist seit 2016 Forschungsthema am Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik der RWTH Aachen

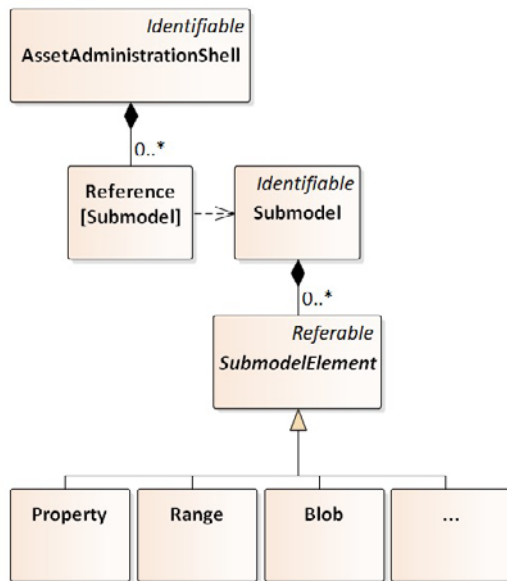


Abbildung 1: Vereinfachtes UML-Klassenmodell des VWS-Metamodells.

University. Mit dem Projekt openAAS [7], in Zusammenarbeit mit dem ZVEI, wurden die ersten Modellierungen und die erste Open-Source-Referenzimplementierung entwickelt. Darauf aufbauend war der Lehrstuhl an dem durch die Plattform Industrie 4.0 entwickelten VWS-Metamodell ebenfalls beteiligt. Zur Evaluation der praktischen Umsetzung dieses neuen Modells wurde ein SDK benötigt. Die Entscheidung fiel auf die Implementierung eines eigenen SDKs, da für die im wissenschaftlichen Umfeld verbreitete Programmiersprache Python bislang keine VWS-Implementierung bereitstand und die aktuellen SDKs zum Teil keine exakte Nachbildung des VWS-Metamodells umgesetzt haben. Aus diesen Gründen wurde 2019 mit der Entwicklung eines SDKs in Python begonnen. Dabei ist die praktische Anwendbarkeit ein weiteres Ziel, sodass Wert daraufgelegt wird, mit automatisierten Tests, statischer Typprüfung und Dokumentation eine angemessene Softwarequalität zu erreichen.

Eine erste Version des SDKs wurde unter dem Namen Pyl40AAS [14] im Mai 2020 veröffentlicht, welche das VWS-Metamodell der Version 2.0.1 umsetzt. Inzwischen stellt das SDK ebenfalls einen Entwicklungszweig für die Version 3.0RC01 des VWS-Metamodells sowie weitere Funktionen und eine verbesserte Dokumentation bereit. Für die Weiterentwicklung des Projektes wurde eine Integration in das Eclipse-BaSyx-Projekt (vgl. Abschnitt 3) angestrebt, die am 02.07.2022 vollzogen wurde. Der neue Name des SDKs ist BaSyx Python SDK. Im Rahmen dieses Beitrags wird zur besseren Unterscheidung weiterhin der Name Pyl40AAS verwendet. In diesem Beitrag wird das SDK vorgestellt, einige Design-Entscheidungen bei der Implementierung beleuchtet und daraus Empfehlungen zur Weiterentwicklung des VWS-Metamodells abgeleitet.

2. Das Metamodell der VWS

Das von der Plattform Industrie 4.0 als UML-Modell veröffentlichte VWS-Metamodell dient der einheitlichen Darstellung

von Informationen in der VWS. Es besteht grundlegend aus den zwei Klassen *AssetAdministrationShell* und *Submodel* (s. Abbildung 1).

Objekte der Klasse *AssetAdministrationShell* definieren den Bezug der repräsentierten Informationen zu einem Asset (z.B. Temperatursensor) und können eine beliebige Anzahl von *Submodel*-Objekten (Teilmodelle) referenzieren. Ein *Submodel*-Objekt dient der Beschreibung eines Aspekts eines Assets (z. B. Digitales Typenschild) und ist aus *SubmodelElement*-Objekten aufgebaut. Die eindeutige Identifikation der Hauptobjekte (*AssetAdministrationShell* und *Submodel*) erfolgt über global eindeutige Identifikatoren, z. B. *Internationalized Resource Identifier* (IRI) oder *International Registration Data Identifier* (IRDI), – im VWS-Metamodell durch die Ableitung von *Identifiable* dargestellt.

Für verschiedene Typen von Informationen wurden spezialisierte *SubmodelElement*-Klassen definiert, u. a. *Property*, *Range*, *File*, *Blob* oder *SubmodelElementCollection*. Ein *Property*-Objekt ist ein Datenelement, das einen Einzelwert darstellt, z. B. die Seriennummer einer Pumpe oder den aktuellen Messwert eines Temperatursensors. Zur Beschreibung eines Wertebereichs (z. B. Messbereich), kann ein *Range*-Objekt genutzt werden, das einen Minimum- und einen Maximum-Wert besitzt. Zur Speicherung und Weitergabe von umfangreichen Binärdaten, z. B. einer CAD-Zeichnung, ist das *Blob*-Objekt vorgesehen.

Die Identifikation aller *SubmodelElement*-Objekte erfolgt über das Attribut *IdShort*, welches im jeweiligen (global identifizierbaren) Namensraum eindeutig sein muss, z.B. innerhalb eines *Submodel*s oder einer *SubmodelElementCollection*. Im VWS-Metamodell ist dieses Attribut durch die abstrakte Basisklasse *Referable* definiert. Mithilfe von *SubmodelElementCollection*-Objekten, die selbst eine beliebige Anzahl von *SubmodelElement*-Objekten enthalten können, kann eine hierarchisch geschachtelte Objekt-Struktur erstellt werden.

2.1 Referenzen

Das VWS-Metamodell sieht an vielen Stellen Referenzen auf andere Objekte bzw. Ressourcen vor. In der Spezifikation sind diese entweder explizit als *Reference*-Objekt oder durch einen Stern an einem Objekttyp gekennzeichnet. *Reference*-Objekte können auf verschiedene Referenz-Ziele verweisen:

- » Beliebige VWS-Objekte mit global eindeutiger Identifikation (*Identifiable*),
- » darin enthaltene VWS-Objekte mit lokaler *idShort*-Identifikation (*Referable*) oder
- » Ressourcen außerhalb von VWS, die mit einer IRI oder IRDI identifiziert werden können.

Je nach Kontext wird dabei eingeschränkt, dass eine Referenz nur auf VWS-Objekte einer bestimmten Klasse verweisen darf (z. B. muss das *submodel*-Attribut von *AssetAdministrationShell*-Objekten Referenzen auf *Submodel*-Objekte enthalten). Eine Referenz ist ein Objekt bestehend aus einer geordneten Liste von Key-Objekten, die jeweils das nächste

Tabelle 1: Vergleich bestehender Implementierungen.

SDK/ Eigenschaft	Sprache	AAS Metamodell Version	Unterstützte Austauschformate/ Serialisierungen	API	UI	Sonstige Features
Eclipse BaSyx	C#	2.0.1	JSON, XML, AASX	HTTP, MQTT	Ja	Code-Bindings, Discovery (mDNS)
Eclipse BaSyx	Java/C++	2.0.1	JSON, XML, AASX	HTTP MQTT, OPC UA, natives TCP	Nein	Code-Bindings
i40-aas-objects	TypeScript, Go	2.0.1	JSON	Nein	Nein	
i40-aas	JavaScript/ TypeScript	2.0.1	JSON	HTTP	Ja	MongoDB, PostgreSQL
CoreAAS	TypeScript	2.0.1	XML	OPC UA	Nein	
NOVAAS	JavaScript		AASX	MQTT	Ja	
AASX Package Explorer	C#	2.0.1	JSON, XML, AASX	HTTP, MQTT, OPC UA	Ja	Formular-Plugin
Pyl40AAS	Python	2.0.1 & 3.0RC01	JSON, XML, AASX	Nein	Ja	Backend-Integration, Compliance Tool

Objekt in der Baumstruktur referenzieren und drei verpflichtenden Attribute (*type*, *value* und *idType*) besitzen. Das Attribut *type* beschreibt die Art der Entität, z. B. *GlobalReference*, *Submodel* oder *Property*, die über dieses Key-Objekt referenziert wird, das Attribut *value* ist der Wert der Referenz, z. B. eine *IRDI* oder eine *IdShort*, und das Attribut *idType* gibt den Typen des Referenzwertes an, z. B. *IRDI* oder *IdShort*.

Für die maschinenverarbeitbare semantische Beschreibung der Datenobjekte besitzen viele Klassen das Attribut *semanticId*, über welches eine Referenz auf eine semantische Beschreibung in Registern, wie z. B. IEC61360-CDD [15] oder ECLASS [16], definiert werden kann. Mit Hilfe der Klasse *ConceptDescription* können zusätzlich eigene oder abgeleitete semantische Definitionen festgelegt und referenziert werden.

2.2 Erweiterbarkeit der Modellobjekte

Insgesamt existieren drei Möglichkeiten der Erweiterung von Objekten im VWS-Metamodell: *HasDataSpecification*, *HasExtension* und *Qualifiable*:

Mit *HasDataSpecification* können an alle Objekte mit Hilfe von definierten *DataSpecifications* dynamische Attributerweiterungen durchgeführt werden. Liegt ein Verweis auf eine *DataSpecification* bei einem Objekt vor, müssen die dort definierten Attribute zusätzlich zu den klassenspezifischen Attributen bereitgestellt werden. Die möglichen *DataSpecifications* werden in [4] veröffentlicht und deren Verwendung beschrieben. Derzeit existieren zwei *DataSpecifications* (*DataSpecificationIEC61360* und *DataSpecificationPhysicalUnit*), die nur für die Nutzung bei *ConceptDescriptions* vorgesehen sind.

Die Klasse *HasExtension* wurde für die Speicherung von Daten in anderen Datenformaten eingeführt. Hiermit können Objekten z. B. im OPC-UA-Datenformat vorliegende Informationen hinzugefügt werden. Dies dient nur der Speicherung und dem Abruf bzw. Austausch dieser Informationen ohne weitere Interpretation der Inhalte.

Abschließend bietet *Qualifiable* die Möglichkeit, mit Hilfe von sogenannten *Constraints*, z.B. *Qualifier*, ein Objekt semantisch genauer zu beschreiben. Einige Qualifier sind in IEC 62569-1 [8] oder DIN SPEC 92000 [9] definiert.

2.3 Teilmodell-Templates

Das VWS-Metamodell bietet somit viele Möglichkeiten zur Modellierung von Informationen im Industrie-4.0-Kontext. Zur Erreichung einer besseren semantischen Interoperabilität wurde das Konzept der Teilmodell-Templates eingeführt. Ein Teilmodell-Template definiert die Struktur von Teilmodellen für einen bestimmten Aspekt bzw. ein bestimmtes Informationsmodell und weist ihrer Semantik einen festen Identifikator zu. Innerhalb eines Teilmodell-Templates werden alle vorgesehenen Objekte inkl. deren *idShorts*, Beschreibungen sowie *semanticIds* definiert. Hierdurch kann beim Informationsaustausch sichergestellt werden, welche Informationen in einem dazu konformen Submodel-Objekt enthalten sind und wie diese identifiziert und interpretiert werden können.

3. „Related Work“: Andere Implementierungen

Eclipse BaSyx [5] ist die Referenzimplementierung der BMBF-geförderten Forschungsprojekte BaSys 4.0 und BaSys 4.2. Es implementiert Kernkonzepte der VWS, wie Teilmodelle, *Repositories* oder *Registries*. Der Zugriff auf die VWS wird über im Rahmen des Projekts entwickelte HTTP, MQTT, OPC UA und nativen TCP Interfaces sowie eines sogenannten *Virtual Automation Bus* realisiert, mit dem Ziel, Steuerung von Feldgeräten über VWS zu ermöglichen. Eclipse BaSyx ist in .NET, Java und C++ implementiert und folgt Version 2.0.1 der Spezifikation [4]. Außer den Interfaces sind auch die Datenaustauschformate zu XML und JSON sowie das AASX Package Format implementiert.

i40-aas-objects [10] ist eine Implementierung des VWS-Metamodells (Version 2.0.1) in *TypeScript*, entwickelt von SAP, die

es Applikationsentwicklern erlaubt, der Spezifikation [4] konforme JSON-Dateien zu erstellen. Die Implementierung stellt *TypeScript*-Klassenrepräsentationen von VWS-Objekten, wie *Referables* und *Identifiables*, sowie Datentypen bereit. Des Weiteren existiert ein „Validator“, der die Konformität von JSON VWS-Dateien überprüfen kann.

i40-aas [11] – ebenfalls von SAP – benutzt die *i40-aas-objects*-Implementierung des VWS-Metamodells, um einen VWS-Service in einem Docker-Image anzubieten. Dabei stellt eine Instanz des Images eine VWS mit beliebig vielen Teilmodellen und einem Datenbackend durch MongoDB und PostgreSQL dar. Fokus der Entwicklung liegt auf der Kommunikation zwischen VWS.

CoreAAS [12], entwickelt vom Department of Electrical Electronic and Computer Engineering der University of Catania, ist eine Implementierung des AAS-Informationsmodells (Version 2.0.1) als OPC-UA-Informationsmodell. Zusammen mit „node-opcua-coreaas“, einer Erweiterung von „node-opcua“, das eine *TypeScript*-Implementierung von OPC UA darstellt, erlaubt *CoreAAS* die Entwicklung eines OPC-UA-Servers, der das *CoreAAS*-Informationsmodell anbietet. Ziel dieser Implementierung ist es, ein konsistentes VWS-Informationsmodell aus OPC-UA-Objekttypen zu erreichen, das, soweit möglich, der Spezifikation von [4] entspricht, wobei sich das implementierte Modell im Detail von [4] unterscheiden kann.

NOVAAS [6] [17] ist eine graphische Benutzeroberfläche für das Lesen von VWS aufbauend auf dem graphischen IoT-SDK Node-RED und wird von der NOVA School of Science and Technology entwickelt. Es ermöglicht das Durchsuchen einer in einem eigenen JSON-Format vorkonfigurierten VWS durch Benutzer sowie das Abonnieren von Änderungen in Teilmodellen dieser VWS, basierend auf dem Kommunikationsprotokoll MQTT. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Dashboards zu erstellen, die den Wert einzelner Datenpunkte in Echtzeit darstellen können.

AASX Package Explorer [13], entwickelt von verschiedenen Industrie- und Forschungspartnern, ist ein auf C# basierender Editor mit grafischer Oberfläche. Die Software ermöglicht die Erzeugung der VWS in JSON- und XML-Formaten und ihre Editierung. Des Weiteren enthält das Tool auch einen REST-Server und einen OPC UA-Server für die geladenen AASX-Dateien.

Das SDK *Pyl40AAS* stellt damit eine Ergänzung zu den bestehenden SDKs und Tools dar, indem es die maschinelle Verarbeitung von VWS-Daten und die Entwicklung von dazu geeigneten Software-Werkzeugen in der Programmiersprache Python ermöglicht. Ein Vergleich der unterschiedlichen Implementierungen ist in Tabelle 1 gegeben.

4. Implementierung in Python

Dieses Kapitel beschreibt die in *Pyl40AAS* implementierten Aspekte des VWS-Metamodells. Es zeigt anhand von Beispielen, welche Funktionalität *Pyl40AAS* bietet und vermittelt so ein grundlegendes Verständnis der implementierten Funktionalitäten.

Zur Beschreibung der *Pyl40AAS*-Implementierung soll folgendes Anwendungsbeispiel dienen. Ein Pumpenhersteller

möchte seinen Kunden Informationen zu seinen Produkten in Form von VWS anbieten. Dafür erstellt er für einen Pumpentyp eine VWS, in dem die Produktdaten (Katalogdaten) enthalten sind. Zur Darstellung der Merkmale erstellt er entsprechende Teilmodelle und nutzt die verschiedenen Modellierungselemente, z. B. ein *Property*-Objekt für die Information über die Nennleistung.

Die Erstellung der VWS und der darin dargestellten Informationen soll dabei automatisiert aus bestehenden Daten oder durch manuelle Eingabe erfolgen. Die Übermittlung der Informationen zum Kunden soll als JSON-Datei, konform zur Spezifikation [4], erfolgen. Bereits in einer SQL-Datenbank vorgehaltene Produkttyp-Informationen sollen automatisch in das VWS-Datenmodell übernommen werden.

4.1 Metamodellklassen

In *Pyl40AAS* wurden die Klassen des VWS-Metamodells als Python-Klassen implementiert. Dadurch ist es möglich, mit Python VWS und Teilmodelle als Objekte anzulegen, zu verknüpfen und generell zu bearbeiten. Angelehnt an das oben beschriebene Anwendungsbeispiel, wird im Code-Beispiel 1 die Erstellung eines Teilmodells (*Submodel*) mit einem Merkmal (*Property*) einer Pumpe gezeigt: Hier die Nennleistung mit einem Wert von 5000.

```
propRatedPower = model.Property(
    id_short="RatedPower",
    value_type=model.datatypes.Int,
    value=5000,
    semantic_id=model.Reference((model.Key(
        type=model.KeyElements.GLOBAL_REFERENCE,
        id_type=model.KeyType.IRI,
        value="https://acplt.org/RatedPower"
    )),)
)

submodel_pump = model.Submodel(
    identification=model.Identifier(
        "https://acplt.org/PumpSubmodel",
        model.IdentifierType.IRI
    ),
    submodel_element=[propRatedPower],
    semantic_id=model.Reference((model.Key(
        type=model.KeyElements.GLOBAL_REFERENCE,
        id_type=model.KeyType.IRI,
        value="https://acplt.org/PumpSubmodel"
    )),)
)
```

Code-Beispiel 1: Erstellung von Python-Objekten der VWS-Klassen.

4.2 Adapter

Mit Hilfe von Adapter-Routinen können die erstellten Objekte gemäß der Spezifikation im JSON-, XML- und AASX-Format serialisiert oder aus diesen Datenformaten geladen werden. Es ist sowohl das (De-)Serialisieren einzelner Objekte als auch das (De-)Serialisieren ganzer Objektsammlungen (sog. *ObjectStores*) möglich.

In Code-Beispiel 2 serialisiert der Pumpenhersteller das zuvor erstellte *Submodel*-Objekt als JSON-Datei, um dieses den Kunden zur Verfügung zu stellen. Diese Datei kann dann von den Kunden eingelesen und weiterverarbeitet werden.

```
write_aas_json_file(open("pumpe.json", "w"), [submodel_pump])
read_aas_json_file(open("pumpe.json"))
```

Code-Beispiel 2: Schreiben und Lesen von JSON-Dateien.

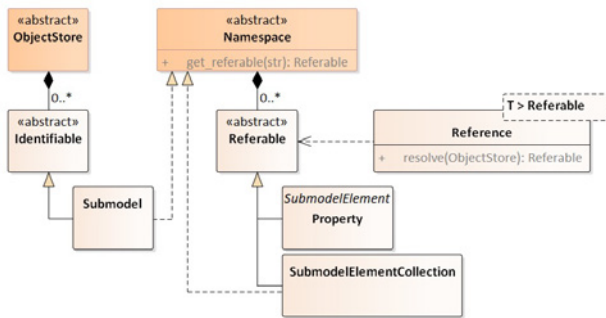


Abbildung 2: Ergänzungen am VWS-Metamodell zur Auflösung von Referenzen.

4.3 Auflösen von Referenzen

Um den Umgang mit *Reference*-Objekten in praktischen Anwendungen zu unterstützen, enthält Pyl40AAS Funktionen zum Auflösen von Referenzen auf VWS-Objekte. D. h., zu einem gegebenen *Reference*-Objekt kann das referenzierte Objekt in verschiedenen Quellen gesucht und als Python-Objekt der entsprechenden Pyl40AAS-Modell-Klasse von dort abgerufen werden. Leider spezifiziert [3] die genaue Semantik der Auflösung von Referenzen bislang nicht und sieht keinen einheitlichen Mechanismus dafür vor, insb. für Referenzen auf *Referable*-Objekte. In Pyl40AAS wurden diese Konzepte daher ergänzt (s. Abbildung 2):

Als einheitliche Schnittstelle für das Abrufen von *Identifiable*-Objekten, die stets die Wurzel der Objekthierarchien darstellen, aus verschiedenen Quellen dienen sogenannte *ObjectStore*-Klassen. Diese kapseln z. B. eine interne In-Memory-Liste von Objekten, einen Datenbank-Server für VWS-Objekte oder einen Web-Server mit der Repository-API zum Abruf von Objekten anhand ihrer Identifikation.

Für die Auflösung von *Referable*-Objekten innerhalb der verschiedenen Attribute anderer VWS-Objekte anhand ihrer *idShort* definiert Pyl40AAS eine einheitliche *get_referable()*-Methode. Diese wird von allen Objekten, die weitere *Referable*-Objekte beinhalten können, implementiert – repräsentiert durch die neue abstrakte Klasse *Namespace*. Zur Auflösung einer Referenz auf ein *Referable*-Objekt kann somit zunächst das darüberliegende *Identifiable*-Objekt aus dem übergebenen *ObjectStore* abgerufen werden. Innerhalb des Objekts wird dann der durch die *idShorts* definierte Pfad zum endgültigen Objekt sukzessive mittels *get_referable()* aufgelöst. Dabei müssen noch weitere Besonderheiten beachtet werden, die sich aus der redundanten Modellierung der *Reference*-Objekte ergeben: So können z. B. theoretisch mehrere globale Identifikationen angegeben sein, die beim Auflösen verworfen werden müssen. Pyl40AAS implementiert diese Funktionalität mit der Methode *resolve()* jedes *Reference*-Objektes (vgl. Code-Beispiel 3).

```
# Ruft das erste von der AAS referenzierte Submodel
# aus der CouchDB ab:
obj_store = CouchDBObjectStore("localhost", "aas")
submodel = aas.submodel[0].resolve(obj_store)
```

Code-Beispiel 3: Auflösen einer Referenz mit einem *ObjectStore* und *resolve()*.

4.4 Compliance Check Tool

Das Compliance Check Tool ist eine in Pyl40AAS enthaltene Applikation zur Überprüfung von serialisierten VWS-Daten

auf Konformität mit den standardisierten Datenformaten und dem VWS-Metamodell.

Es richtet sich hauptsächlich an Entwickler anderer VWS-Applikationen und SDKs, die die Konformität erzeugter Daten überprüfen wollen. Zusätzlich ermöglicht das Compliance Check Tool die Überprüfung verschiedener Dateien auf Übereinstimmung der enthaltenen VWS-Daten. Damit können VWS-Applikationen auf die Vollständigkeit ihrer Abbildung der VWS-Daten beim Einlesen und Exportieren überprüft sowie bereits gespeicherte Dateien auf inhaltliche Gleichheit analysiert werden.

Die Bedienung des Tools erfolgt über die Befehlszeile, wobei die Nutzung zur Prüfung einer VWS-JSON-Datei wie in Abbildung 3 aussehen kann.

```
$ aas_compliance_check -v --json deserialization aas_file.json

Compliance Test executed:
SUCCESS: Open file
FAILED: Read file and check if it is deserializable
- WARNING: Ignoring 'revision' attribute of AdministrativeInformation object due to missing 'version'
```

Abbildung 3: Nutzung des Compliance Check Tools zur Überprüfung einer JSON-Datei.

4.5 Backends

Die Integration von bestehenden Informationen aus bereits existierenden Datenquellen soll für den Applikationsentwickler so einfach wie möglich gestaltet werden. Dazu werden in Pyl40AAS *Referable*-Objekte um ein *source*-Attribut sowie zwei Funktionen *update()* und *commit()* erweitert. Die *update()*- und *commit()*-Funktionen sind in der Lage, Daten einzelner Objekte, aber auch hierarchische Objektstrukturen, mit zugrundeliegenden Datenquellen abzugleichen. Jedes zu synchronisierende Objekt wird über dessen *source*-Parameter mit einer individuellen Datenquelle verbunden. Ist der *source*-Parameter gesetzt, so genügt es auf dem entsprechenden Objekt, die *commit()*-Funktion aufzurufen, um die Daten des Objekts in seiner aktuellen Form zur zugrundeliegenden Datenquelle hochzuladen. Äquivalent aktualisiert die *update()*-Funktion, das *Referable*-Objekt mit den aktuell in der zugrundeliegenden Datenquelle vorliegenden Daten.

Der Vorteil dieses Konzepts ist, dass durch das *source*-Attribut die zugrundeliegenden Datenquellen als Teil der Daten verwaltet werden können, ohne dass spezielle Datenobjekt-Klassen oder Funktionen benötigt werden. Die Datenquellentyp- bzw. Kommunikationsprotokoll-spezifische Kommunikation ist separat durch sogenannte *Backends* implementiert und so vor dem Nutzer der Datenobjekte verborgen. Um dies zu erreichen, hat der *source*-String standardmäßig die Form einer URL (s. Abbildung 4), wobei das Schema der URL (z. B. „http://“ oder „opc.tcp://“) den Datenquellentyp festlegt und der darauffolgende Pfad die Datenquellentyp-spezifische Adresse der tatsächlichen Daten in der Datenquelle beschreibt. Würde etwa ein OPC UA Server als Backend benutzt, wäre dies mit Schema „opc.tcp://“ der *source*-URL definiert, während der tatsächliche Datenspeicherort in dem OPC UA Server

opc.tcp://	path/to/server:port?<query>
Backend-Schema	Backend-Interner Pfad

Abbildung 4: Beispiel eines *source* Strings.

durch den darauf folgenden Pfad definiert ist. Durch weitere Backend-Implementierungen kann der Mechanismus einfach für neue Datenquellentypen erweitert werden. Der Pumpenhersteller ist hierdurch in der Lage, seine Produkt-Informationen mit Hilfe eines entsprechenden Backends automatisiert aus der SQL-Datenbank in die erzeugten VWS zu übernehmen und Änderungen zurückzuschreiben. Damit der Pumpenhersteller die Objekte nicht händisch anlegen und den source-Parameter für die Objekte einzeln setzen muss, kann ein Datenquellentyp-spezifischer *ObjectStore* erstellt werden. Dieser kapselt die zugrundeliegenden Datenquelle als *ObjectStore*-Objekt und erlaubt so das einfache Abrufen, Hinzufügen und Löschen von VWS-Objekten mit automatischer Verwaltung des *source*-Parameters.

4.6 AAS Manager

Zur visuellen Darstellung sowie Erstellung und Bearbeitung von VWS ohne Kenntnisse einer Programmiersprache wurde auf Basis von Pyl40AAS ein Editor mit einer grafischen Benutzeroberfläche implementiert, vergleichbar mit dem AASX Package Explorer. Der Editor soll das in Pyl40AAS umgesetzte VWS-Datenmodell und dazugehörige Funktionen validieren. Außerdem soll der Editor aufgrund seines generischen Aufbaus im Gegensatz zu dem AASX Package Explorer mit minimalem Aufwand an neue Versionen des VWS-Metamodells anpassbar sein, die in Pyl40AAS umgesetzt werden. Die Benutzeroberfläche des Editors ist in drei Bereiche geteilt (s. Abbildung 5): die Dateinavigation (links), der Detailbereich (rechts) und Dialoge (unten rechts). Im Dateinavigationsbereich werden die Dateien und die darin enthaltenen *Referable*- und *Identifiable*-Objekte als Objekt-Baum dargestellt. Als Basis dafür dienen die *ObjectStores* aus Pyl40AAS sowie die Adapter zum Import und Export von Dateien. Der Detailbereich stellt die Attribute des im Navigationsbereich ausgewählten Objekts dar. Falls in einem Attribut eine Referenz vorliegt, wird versucht diese mit der *resolve()*-Funktion von Pyl40AAS aufzulösen. Auflösbare Referenzen werden als interaktive Hyperlinks auf die referenzierten Objekte dargestellt. Eine Beschreibungsleiste im unteren Teil des Bereichs zeigt weiterführende Hinweise zum ausgewählten Objekt bzw. Attribut an. Diese werden zur Laufzeit dynamisch aus Code-Kommentaren der Pyl40AAS-Klassen erzeugt. Objekte können entweder direkt editiert oder über spezielle Dialoge hinzugefügt werden. Die Eingabefelder dieser Dialoge werden dynamisch zur Laufzeit basierend auf einer Analyse der entsprechenden Pyl40AAS-Klasse konstruiert. Dabei werden insbesondere passende Eingabe-Widgets für jeden Parameter anhand der Typ-Annotationen in Pyl40AAS ausgewählt. Falls bei der Erstellung/Editierung Fehler auftreten, werden diese abgefangen und dem Benutzer in einem Fenster angezeigt.

5. Diskussion

Die VWS stellt ein mächtiges Konzept dar, um die Digitalisierung durch verbesserten Datenaustausch zwischen verschiedenen Organisationseinheiten (insb. zwischen Firmen und Abteilungen) voranzubringen. Dieses hat das Potenzial, die Integration von Wertschöpfungsketten zu verstärken,

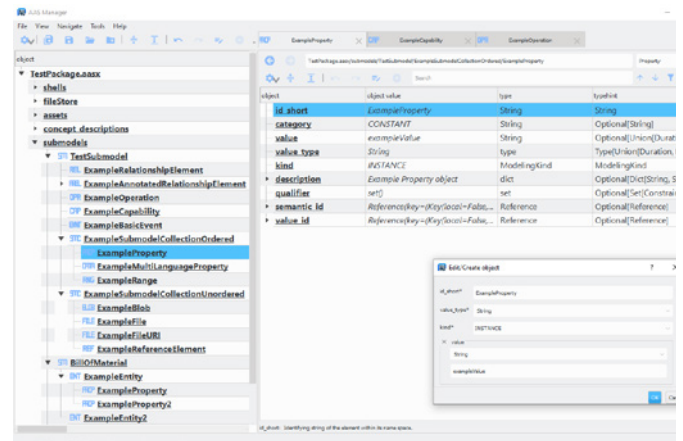


Abbildung 5: AAS Manager, ein Editor mit grafischer Benutzeroberfläche zur Erstellung und Bearbeitung von VWS.

womit eines der primären Ziele von Industrie 4.0 erreicht wird.

Mit der Implementierung von Pyl40AAS wurde eine Grundlage für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geschaffen, z. B. für die Untersuchung von Anwendungsmöglichkeiten und Konzepten für den Datenaustausch mit VWS. Zudem wurden dabei Konzepte für die Implementierung verschiedener Aspekte des VWS-Metamodells entwickelt und erprobt, wie z. B. die beschriebenen Funktionalitäten zum Auflösen von Referenzen und Einbinden externer Datenquellen. Damit diente die Implementierung gleichzeitig als Evaluation der praktischen Umsetzbarkeit des VWS-Metamodells für Software-Anwendungen. Die dabei festgestellten vereinfachenden und herausfordernden Aspekte sind im Folgenden zusammengefasst:

5.1 In welchen Aspekten ist das VWS-Metamodell gut implementierbar?

- » Die Implementierung des Informationsmodells als Datenmodell in einer Programmiersprache, die die Definition von Objektklassen oder Verbund-Datentypen mit Mehrfachvererbung erlaubt, fällt durch die klassenorientierte Definition sehr leicht.
- » Die Beschränkung auf eine begrenzte Auswahl von Basis-Datentypen stellt die Unterstützung der notwendigen skalaren Datentypen sicher.
- » Die Serialisierungsformate liegen als formale Schemata vor, sodass entsprechende (De-)Serialisierungsfunktionen einfach umgesetzt werden können.

5.2 Wo gibt es Verbesserungsbedarf im VWS-Metamodell?

- » In verschiedenen Bereichen sind implizite Fallunterscheidungen anhand des Kontextes notwendig, z. B. beim Auflösen von Referenzen oder beim Abrufen einer durch ein File-Objekt referenzierten Datei.
- » Der Aufbau von *Reference*-Objekten als Liste von (komplexen) *Key*-Objekten könnte durch eine einfache URI erfolgen.

- » Die Verwendung von *Reference*-Objekten für die *semanticId*-Eigenschaft, die in den meisten Fällen vergleichend statt referenzierend verwendet wird, könnte vereinfacht bzw. genauer beschrieben werden.
- » Einige Datenstrukturen sind redundant bezüglich ihres Anwendungsfalles (z. B. *Property*-, *Blob*- und *File*-Objekt), sodass es in der Anwendung zu einer uneindeutigen Modellierung kommen kann, die weitere Fallunterscheidungen nötig macht. Hier sollte genauer beschrieben werden, wann welche Klasse verwendet werden soll.
- » Die korrekte Nutzung einiger Modellelemente des VWS-Metamodells könnte besser spezifiziert werden. Beispielsweise wird die Semantik und die vorgesehene Verwendung der Klasse *AdministrativeInformation* zur Versionierung von *Identifiable*-Objekten nicht weiter erläutert.
- » Das VWS-Metamodell enthält mit den Klassen *HasExtensions* und *HasDataSpecification* zwei Mechanismen, die zur dynamischen Erweiterung individueller Objekte dienen sollen. Damit wird statisches Type Checking des Programmcodes unmöglich, da der Type Checker keine Aussage über die zur Laufzeit hinzugefügten Attribute treffen kann. Gleichzeitig ist diese Erweiterung in vielen Programmiersprachen nur unvollständig möglich oder aus softwaretechnischer Sicht nicht empfehlenswert. Nicht standardisierte dynamische Erweiterungen sind zudem nicht zielführend, um Interoperabilität zu erreichen. Zur Wahrung einer hohen Code-Qualität und Interoperabilität empfehlen die Autoren anstatt dessen die Verwendung des Konzepts der Vererbung.

Die meisten der genannten Punkte können durch konkretere Festlegungen im Metamodell verbessert werden. Dennoch wird aus den angesprochenen Schwierigkeiten bezüglich der Implementierbarkeit des VWS-Metamodells ersichtlich, dass mit der bestehenden Spezifikation sehr viele verschiedene Anwendungsfälle für die VWS erfasst werden sollen, ohne

dass diese für die Anwendung ausreichend klar definiert sind. Daraus ergibt sich die grundsätzliche Frage, ob alle Anwendungsfälle mit einem einzigen Modell, das über generische Strukturierung von Daten (wie XML oder JSON) hinaus geht, abgedeckt werden können oder ob nicht zunächst strategisch bestimmte Einschränkungen vorgenommen werden sollten.

6. Fazit

Zusammengefasst sehen die Autoren das Konzept der VWS als äußerst gewinnbringend an. Da jedoch das Metamodell über viele Jahre mit unterschiedlichen Erweiterungen entwickelt wurde, sollten nach Ansicht der Autoren die jetzt vorliegenden Ansätze kritisch hinsichtlich Anwendungen, Umsetzbarkeit und insbesondere dem Ziel semantischer Interoperabilität analysiert und ggf. angepasst werden. Insbesondere die Verwendung der Modellelemente und deren Attribute sollten präziser definiert werden. Der Lehrstuhl bringt bereits die erkannten Verbesserungspotentiale in die Weiterentwicklung der VWS ein und trägt damit aktiv zur Überarbeitung der Spezifikationen bei.

Danksagung

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS19022 (BaSys4.2) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Neugierig geworden?

Weitere Informationen sind unter <https://github.com/eclipse-basyx/basyx-python-sdk> zu finden. Neben einer ausführlichen Dokumentation über die Funktionalitäten von Pyl40AAS, sind zusätzlich eine Installationsanleitung, Tutorials sowie Informationen zur Mitarbeit gegeben.

References

- [1] Boss, B., Bader, S., Orzelski, A., Hoffmeister, M., Hompel, M. T., Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. (2019). Verwaltungsschale. *Handbuch Industrie, 4*, 1-27. doi: 10.1007/978-3-662-45537-1_139-1
- [2] DIN SPEC 91345. (2016). Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). DIN: www.beuth.de
- [3] IEC 63278-1 ED1. (2022). Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure. IEC: www.iec.ch
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2020) Details of the Asset Administration Shell – Part 1: The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01. Abgerufen von: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html
- [5] Kuhn, T., Antonio, P. O., & Schnicke, F. (2021). Eclipse BaSys-Industrie 4.0 einfach machen! Das Open-Source-Betriebssystem für die Industrie 4.0. *atp magazin*, 63(10), 54-61.
- [6] Di Orio, G., Maló, P., Barata, J. (2019). NOVAAS: A Reference Implementation of Industrie4. 0 Asset Administration Shell with best-of-breed practices from IT engineering. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 5505-5512). IEEE. doi: 10.1109/IECON.2019.8927081.
- [7] Palm, F., Epple, U. (2017). openAAS-Die offene Entwicklung der Verwaltungsschale. In *Automation 2017: technology networks processes* (Vol. 2293, pp. 103-104).
- [8] IEC 62569-1. (2018). Allgemeine Regeln zur Erstellung von Produktspezifikationen – Teil 1: Grundsätze und Methoden. IEC: www.iec.ch
- [9] DIN SPEC 92000. (2020). Datenaustausch auf der Grundlage von Eigenschaftsausprägungsaussagen. DIN: www.beuth.de
- [10] GitHub, Inc. (2022). *SAP-archive / i40-aas-objects*. Abgerufen von: <https://github.com/SAP/i40-aas-objects>
- [11] GitHub, Inc. (2022). *SAP-archive / i40-aas*. Abgerufen von: <https://github.com/SAP/i40-aas>

[12] GitHub, Inc. (2020). *OPCUAniCT / coreAAS*. Abgerufen von: <https://github.com/OPCUAniCT/coreAAS>

[13] GitHub, Inc. (2022). *admin-shell-io / aasx-package-explorer*. Abgerufen von: <https://github.com/admin-shell-io/aasx-package-explorer>

[14] Python Software Foundation. (2022). *pyi40aas 0.2*. Abgerufen von: <https://pypi.org/project/pyi40aas/#history>

[15] International Electrotechnical Commission. (o.J.). *IEC 61360-4 - IEC/SC 3D - Common Data Dictionary (CDD - V2.0015.0002)*. Abgerufen von: <https://>

AUTOREN

Dr.-Ing. Torben Miny, (geb. 1989) ist seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University. Sein Fachgebiet liegt beim automatisierten Austausch von Informationen durch Modelltransformationen im Umfeld von Industrie 4.0. In diesem Zusammenhang beschäftigt er sich mit dem Thema VWS und Discovery und war an der Entwicklung des Python-SDK Pyl40AAS maßgeblich beteiligt. Er ist in diversen Arbeitsgruppen der Plattform Industrie 4.0, dem Fachausschuss GMA 7.20 sowie im DKE AK 931.0.14 aktiv.

Kontakt

Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik
RWTH Aachen University
Turmstraße 46
52064 Aachen
☎ +49 241 80 97703
@ t.miny@plt.rwth-aachen.de

Michael Thies, M. Sc. (geb. 1994) war von 2019 bis 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University und arbeitete im Fachgebiet der automatisierten Integration und Bereitstellung von industriellen Daten. Dabei untersuchte er unter anderem die praktische Nutzung der VWS und war maßgeblich an der Entwicklung des Pyl40AAS-Projektes beteiligt. Seit 2022 arbeitet er als Softwareentwickler im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs.

Sebastian Heppner, M. Sc. (geb. 1996) ist seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Informations- und

Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University. Zuvor forschte er im Rahmen seiner Masterarbeit an Konzepten zur Datenintegration in die VWS und arbeitete als studentische wissenschaftliche Hilfskraft seit Beginn mit an dem Python-SDK Pyl40AAS.

Igor Garmaev, M. Sc. (geb. 1996) ist seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University. Zuvor entwickelte er im Rahmen seiner Masterarbeit den Editor mit grafischer Oberfläche für VWS basierend auf dem Python-SDK Pyl40AAS. Während der Implementierung des Editors entwickelte er das Python-SDK Pyl40AAS mit.

Leon Möller (geb. 1995) ist Informatikstudent und seit 2018 studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University. Im Rahmen seiner Tätigkeit entwickelt er seit Beginn Pyl40AAS mit. In seiner Bachelorarbeit erforschte er in einem auf Pyl40AAS aufbauenden Projekt, wie mit OCL Instanzen von Teilmodell-Templates formal erstellt und validiert werden können.

Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert (geb. 1971) promovierte 2005 an der Ruhr-Universität Bochum am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik und arbeitete von 2005 bis 2020 bei BASF in den Bereichen Technical Expertise E&I, Manufacturing Technology Center HPPO und Operational Excellence and Smart Manufacturing Monomers. Seit 2020 leitet er den Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme der RWTH Aachen University mit dem Schwerpunkt Informationsverarbeitung, Automatisierung und Digitalisierung in der Prozess- und Werkstofftechnik.

Peer-Review: 17.12.2021

Orchestration of modular plants

Procedure and application for orchestration engineering

Anselm Klose, Julius Lorenz, TU Dresden; Lukas Bittorf, Semodia; Katharina Stark, Mario Hoernicke, ABB; Andreas Stutz, Siemens; Hannes Weinhold, Merck; Niclas Krink, Wolfgang Welscher, X-Visual Technologies; Manfred Eckert, Merck; Stefan Unland, SAMSON; Anna Menschner, Semodia; Polyana da Silva Santos, Evonik Operations; Norbert Kockmann, TU Dortmund; Leon Urbas, TU Dresden

In Modular Automation, the orchestration creates the link between process equipment assemblies (PEA) and processes towards operation. This paper presents a general methodology, so-called type-based orchestration, on how to design a fully functional modular process plant based on the module type package (MTP). In a number of discussion rounds, the steps were identified, generalized, and formulated as a method. Existing standards were applied to describe additional required information. The resulting phases and steps, as well as the practical application, have shown that a large part of the planning can be done using only the type-information of planned modules. The type-based orchestration is later completed with instance information. The methodology was tested against a modular distillation plant from the Technical University of Dortmund.

#modular automation #orchestration #module type package #digital twin

Orchestrierung von modularen Anlagen

Verfahren und Anwendung für das Orchestration Engineering

In der modularen Automation stellt die Orchestrierung die Verbindung zwischen Process Equipment Assemblies (PEA) und Prozessen zum Betrieb her. In diesem Beitrag wird eine allgemeine Methodik, die so genannte typenbasierte Orchestrierung, vorgestellt, wie eine voll funktionsfähige modulare Prozessanlage auf der Grundlage des Module Type Package (MTP) konzipiert werden kann. In einer Reihe von Diskussionsrunden wurden die Schritte identifiziert, verallgemeinert und als Methode formuliert. Bestehende Normen wurden herangezogen, um zusätzlich benötigte Informationen zu beschreiben. Die daraus resultierenden Phasen und Schritte sowie die praktische Anwendung haben gezeigt, dass ein großer Teil der Planung allein mit den Typinformationen der geplanten Module erfolgen kann. Die typbasierte Orchestrierung wird später durch Instanzinformationen ergänzt. Die Methodik wurde an einer modularen Destillationsanlage der Technischen Universität Dortmund getestet.

#modular automation #Orchestration #module type package #digital twin

1. Introduction

Modular automation is the key technology for flexible operation in the process industry [1]. Fully automated *process equipment assemblies* (PEA) with specified capabilities can be combined to form process plants [2]. To create operable plants, requirements from processes need to be matched with automation capabilities of PEAs [3]. This engineering process is part of the orchestration of modular plants. Stutz et al. [4] summarize orchestration as a central control mechanism which requests the execution of services and interprets the reply for further actions. So instead of signal-based control, orchestration operates on an interface of pre-defined functions and proceeds depending on the result received. Applied to modular process plants, this means the coordination of the capabilities of the PEAs to create the desired product, which needs to be planned first and can then be executed.

Within the standardization of modular automation (VDI/VDE/NAMUR 2658 [5]) the necessary interface and semantics for

this methodology are defined. Fully automated PEAs from various vendors implement these interfaces and are available for the operation with the process orchestration layer (POL).

The capabilities of the PEAs are encapsulated in *services*, which follow a standardized state machine [6]. The states of *services* provide the necessary request results for the orchestration. Drawing the similarities to web-services, modular automation enables the process industry to control modular process plants, creates an acceleration in plant design, and increases flexibility by decoupling the process control from individual equipment and signals from field level. Emphasizing the *module type package* (MTP) as type description, it can exploit the flexibility in the design of modular process plants. Only with an engineering approach which uses types can efforts for the exchange of different assets of the same type be minimized. The challenge is how the operation is designed and monitored at this higher level of abstraction.

In this work, an overall methodology for orchestration of modular plants is presented. The methodology covers the aspects of how to match services and process steps to create a functional process plant.

We begin with an overview of the state of the art for engineering of modular process plants. Existing approaches are put into context with the requirements from modular automation and a generalized approach for the orchestration engineering of modular process plants is derived. This approach is further refined by incorporating standards. The resulting methodology is then applied to a modular process plant to show its strengths and weaknesses.

2. State of the art

Bringing the *dependency inversion principle* (DIP) into process industries, the MTP is key enabler for the advantages of modular process plants. With the DIP, the direct dependence of assets and their use is decoupled by using an interface. This allows the use of the asset while only knowing how to interact with the interface [7]. For modular automation, this is applied in two main aspects:

- » Interfaces for functionalities on control and service module level are standardized and machine-readable
- » Functionalities are enriched with semantic annotations within the machine-readable information format

Following this principle, modular automation introduces a new standard for digital interaction in *Distributed Control Systems* (DCS). The MTP covers aspects for process monitoring such as the *human machine interface* (HMI), relevant process parameters, described as *DataAssemblies*, as well as aspects covering alarms, communication, and safety [5]. Previous work has compared the interaction of equipment and control system in the process industry [8], [9]. It has been shown that services are well suited for the application in modular plants [10]. The difference to digitalized signals in DCS lies in the additional semantic. In [11] it is explained that web-services need three levels of compatibility: protocol, syntax, and semantic. All three levels are addressed by the technical guideline [5], but only to the extent that data types and their usage is defined. As part of the interface description by the MTP, services provide capabilities and publish corresponding parameters [6]. On a higher level, services follow the principle of request and response [4], [12]. This principle is also known for skills in manufacturing industries [13]. For manufacturing industries, a general model is introduced by [14] and projected to the process industry by [15] which describes a basic hierarchy to model the dependency of skills or services. In both industries, this changes the interaction of the supervisory control, the orchestration. For interaction in operation, capabilities rather than specific components (resources/assets) are used, which is achieved in process industries with the MTP.

In [16], connection of engineering data to the MTP are stated and the use of types is highlighted. Examples for defined types are e.g. done by BioPhorum for stirred tank units (STU)

[17]. This specified interface can be used for the planning of the operation without knowledge of the physical instances, which later must be selected. The methodology for the choice of PEAs is proposed in two steps, starting with a technology match [18] and further the selection and configuration of specific PEAs [19].

However, the mapping of process steps to capabilities of PEAs in combination with a type-based approach requires an engineering methodology which allows this level of abstraction.

3. Requirements

Requirements for the POL, the implementation of the orchestration methodology and execution, were published as specification for potential POL systems in [20]. Current work has led to initial applications for the POL [21] or resulting modular plants [22], [23]. In addition to the functionalities, the orchestration engineering process has additional objectives that can be derived from the motivation of modular automation [2], [3], [5]:

- » Increasing the adaptability of process plants by a systematic, continuous engineering process
- » Helping to accelerate time-to-market for new products
- » Assets fulfilling a standardized interface for seamless integration and plug & produce
- » Increasing the efficiency by switching from batch to continuous operation

For adaptability as well as flexibility, the orchestration should be able to deal with changes in the modular plant. For acceleration, the reuse of existing data and standardized types should be incorporated. Together with the initial requirements for the functionalities, these aspects were taken up and integrated in the developed engineering process.

4. Methodology for orchestration

The methodology for orchestration is the result of multiple discussions with experts from industry and academia combining findings from research projects, namely ENPRO2.0 ORCA and ProRegional. Starting point was the available information of existing PEAs, their MTPs and a description of an example process. In these discussions, the available information was combined to create an operable plant. The resulting steps were differentiated into phases and structured in a logical manner to form a general methodology. The information needed for the steps of the methodology was later supported by existing standards and concepts. For evaluation purposes, the methodology was applied to other processes with different sets of MTPs.

For a better understanding of the abstraction using types, the associations between the assets and the process steps are visualized in Figure 1. Each physical asset must implement at least one type and each type has a defined set of

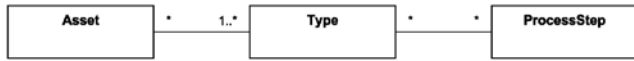


Figure 1: Representation of the association between asset, type, and process step in UML2.0.

capabilities. However, this association is not exclusive, i.e. it is theoretically possible that one asset could implement more than one type. Considering a reactor PEA with dosing capabilities, this PEA could fulfil both a reactor type as well as a dosing type. This very simple association influences the plant topology, which will be covered later. The association between type and process step is less specific and depends strongly on the capabilities of the type. A single process step does not need to be mapped exclusively to one type, since different types with their capabilities might be needed. Also, one type could fulfil more than one process step.

4.1 Orchestration phases

In process industries, the scope of operation is to produce a desired product by arranging and controlling the necessary process steps. Depending on the product, the individual steps and the required PEAs may vary. This means that the orchestration must be planned accordingly. Keeping this in mind and together with the summary for orchestration from [4], orchestration is split into an *engineering* and a *runtime* part. The phases of the orchestration methodology are integrated into the *NAMUR Asset Lifecycle* [24], as shown in Figure 2. Prerequisite for the orchestration is a product with a process structure in the form of defined process steps.

The main difference to conventional plant engineering is in the orchestration engineering phase. To fulfil the requirements, the engineering phase must provide flexibility whilst at the same time being efficient. This is achieved by applying the *dependency inversion principle*. The engineering phase starts with the *type-based engineering* (I), where, independent from physical assets, available capabilities are combined to fulfil the process steps. This mapping results in different configurations for the association of capabilities and process steps. With this allocation, limitations for the plant topology are stated, but not the topology itself. Considering the association between types and assets as shown in Figure 1, an asset could implement more than one type, so that the stated type-topology could be reduced to a fewer number of PEAs and vice versa. The result of the *type-based engineering* is a choice of needed types including their interconnection and intercorrelation, e.g. overlapping control loops or dependent variables. With the additional abstraction using types and not physical assets, this phase incorporates the general approach of the MTP.

Before operation of the plant and the transfer to the runtime, information such as addresses of variables or limitations for process or equipment must be specified and fitted in the plant setup. This is done in the phase of the instance-based engineering (II). With the choice of assets for the specified types, the plant topology gets determined and information of the selected assets are integrated.

As in conventional process plants, the actual operation is introduced by the commissioning of the plant (III). With

pre-automated and -tested PEAs, the commissioning on plant level is solely focused on the interaction of the individual PEAs and can be supported by virtual commissioning [25]. With successful commissioning, the actual operation of the plant can start (IV).

This general workflow for the orchestration methodology summarizes the four phases of the POL introduced in [20] which are:

1. *data import/export,*
2. *plant and PEA configuration,*
3. *process configuration,*
4. *monitoring, operation and execution.*

The latter is during operation (IV), while the first three phases are incorporated into the engineering (I & II).

The proposed structure for the orchestration methodology is sequential. However, results and findings from the *type-based* or *instance-based engineering* phases can be fed back into the *process structure* from the functional requirements of the *NAMUR Lifecycle*. This is considered when adapting the modular plants. Each adaptation or exchange of an asset influences the corresponding engineering phase. This means that every change must be considered in the instance-based engineering (II), adaptations, such as of the process structure, also result in changes in the type-based engineering (I). In the following sections, the individual steps of the engineering phases are described in detail.

4.2 Type-based engineering

During the orchestration, aspects from product (A), process (B), control (C), and capabilities (D) of the individual systems are considered. The steps to follow through this phase are shown in Figure 3.

In the representation as UML activity diagram, the initial and resulting documents are integrated (rectangles with wavy bottom) and supported by references (dashed notes connected to the phases). As shown in Figure 2, input for the *type-based engineering* phase is the *process structure* in the form of block diagrams [26] and a general recipe [27], additionally a collection of MTPs [5] is needed.

The product related information is only input for the following steps and is not changed during orchestration. The type descriptions (e.g. in the form of an MTP collection) are prepared in the phase of the functional clustering (D-1.) to create a representation of available capabilities. Similar capabilities, described in the types, are clustered and can optionally be structured as *SuperServices* (D-2.) as described in [28]. By doing this, differences in the naming of the capabilities can be resolved. A simple form of clustered capabilities could be a list of services. The clustered capabilities, and single capabilities can optionally be combined to form *AggregatedServices* (D-3.a), as described in [29], or *choreographed services* (D-3.b) as described in [30]. The previously mentioned steps do not necessarily need to be repeated for

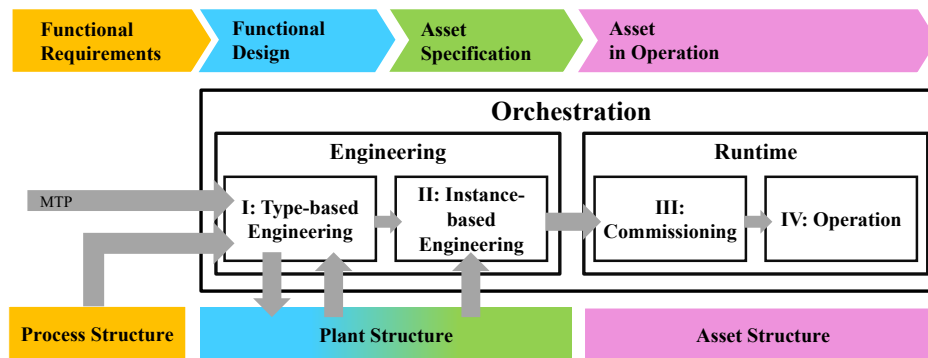


Figure 2: Overview of the phases (I-IV) of orchestration, integrated into the *NAMUR Asset Lifecycle*.

every orchestration, but only when additional information becomes available (e.g. new MTPs).

The first step of the orchestration starts with the design of the plant topology (C-1.). The result of step D-1. is mapped to the process steps described in the block diagram [26] to fulfil the general recipe. Result of this step is an extended process flow diagram which contains the general information for the product and the capabilities similar to [28]. In the next steps, the interaction of capabilities and process steps is modelled, starting with the procedural design (C-2.). Here, the capabilities are arranged to implement the individual process steps, including start-up and shut down of the plant. During the exception handling (C-3.), reactions to deviations of the intended process or the capabilities need to be engineered and integrated into the system behaviour. The result of these two steps is the *Operating Recipe* [31].

As described in [32], safety requirements for product and process are specified (B-1.) and are formulated together with the *Operating Recipe* as safety requirements for the plant (C-4.a). These requirements state how the safety measures must interact and which availabilities and process safety times must be met for the operation of the plant. The resolution is performed during the functional safety orchestration, as described in the safety-lifecycle [33]. Currently, the safety orchestration is not based on the type-description and is done during the instance-based engineering. With the general structure and connection of the required functions, the control design (C-4.b) is executed, which specifies the passing of the results of the functions, e.g. process values. In parallel, following the approach from [34], control-relevant interlocks need to be designed (C-4.c). The result of the two steps is an interface connection plan.

The steps before are based on capabilities of the type-description and are further translated into process specific service requirements (B-2.). This includes the general functionality, as well as service-parameters. At the latest with this step, it becomes clear whether the process can be implemented using the available capabilities. If this is not the case, the *Control* (C) aspects need to be re-evaluated, starting from C-1. As a final step, together with the set of *SuperServices*, *ChoreographedServices*, and *AggregatedServices*, suitable MTPs can be identified and specific types are chosen (D-4.). With this last step, the mapping of process steps to types is completed.

With the determination of needed types, boundary conditions for the automation and control of required PEAs are set.

4.3 Instance-based engineering

During the *instance-based engineering* (Figure 4) all necessary configurations of hardware and software are done to fit the process needs and to map the individual instance parameters, such as parameter limitations. The *instance-based engineering* phase translates the requirements and boundary conditions from the *type-based engineering* to the actual assets. Here, the transition is made from required capabilities to the actual services. Again, the association between assets, types and process steps is important. This means, the conducted specification during the *instance-based engineering* is not necessarily a 1:1 mapping process since required capabilities could be distributed over different types. Considered aspects are mainly capabilities (D), control (C). The workshops showed that the following topics are also of importance: visualization (E), alarms (F), historic plant data (G), and simulation (H). Product (A) and process (B) specific requirements for the operation of the plant were already formulated and resolved during the *type-based engineering* and influence the instance-based orchestration only with the generated documents (e.g. *Operation recipe*).

The phase starts with the creation of the needed software instances (D-1.) from the selected MTPs. Using the advantages of the type-based engineering, more than one software instance can be created from a single type.

Together with the software instances, the physical assets are combined to the actual plant topology (C-1.), where all physical and information connections are specified. *Operation recipe* and plant topology are inputs for the instance-based procedural design (C-2.a). Therefore, actual services from the selected MTP-software instances are mapped to the specified capabilities of the operation recipe. Like for the *type-based engineering*, the exception handling (C-3.a) is mapped to the selected services and the result is the so-called *Modular recipe* [31]. The same is done for the exchanged signals. With existing plant topology and the interface connection plan, the requirements for the instance-based control design (C-2.b) and interlock design (C-3.b) are set. Now, the requested PEA-spanning control loops are closed, and interlocks connected. Also, required transformations of the exchanged *ProcessValues* following [5] are specified. The result is a detailed signal plan for the exchange of variables in the modular plant.

With specification of the plant topology and the used instances, the operational safety requirements from the type-based

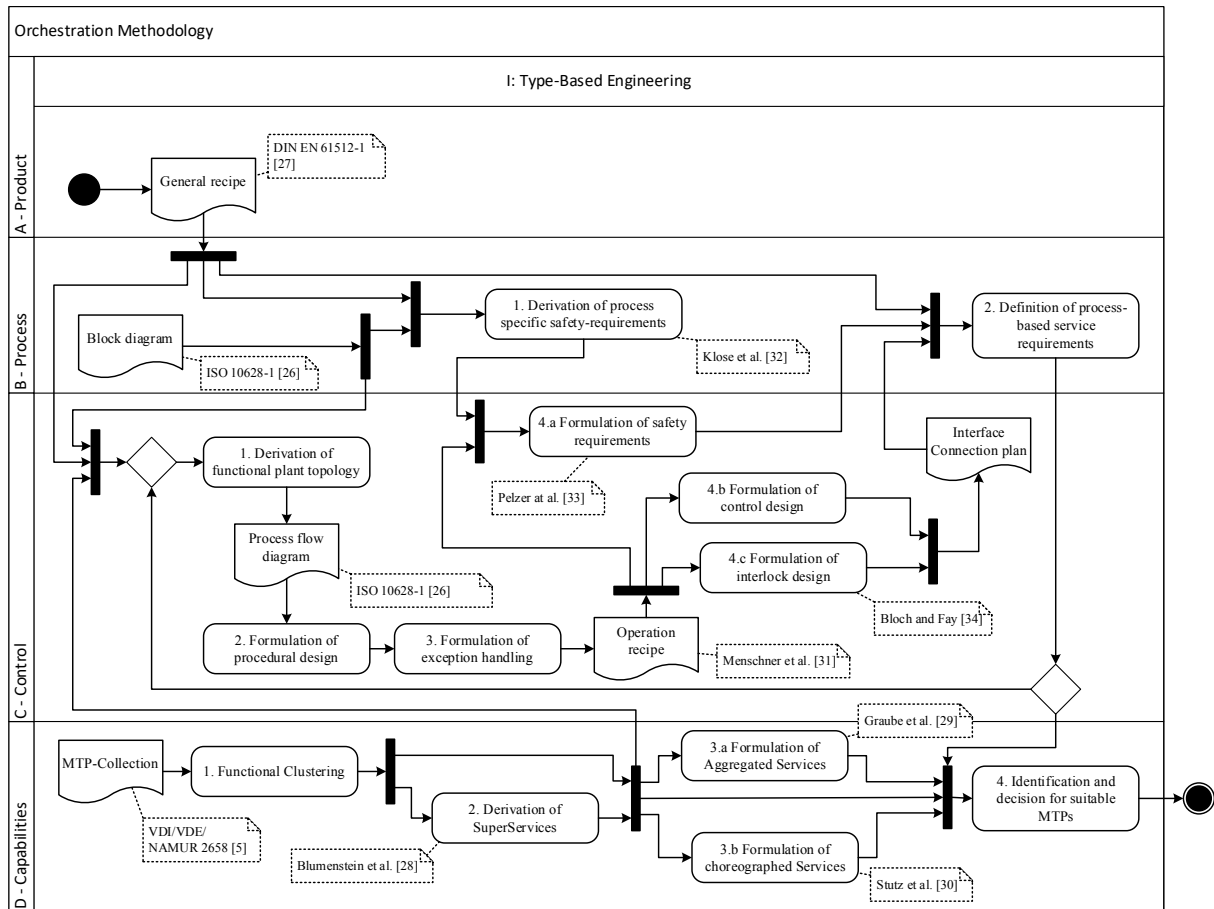


Figure 3: UML activity diagram to model the steps of the type-based engineering (I) of the overall orchestration methodology.

engineering can be picked up and matched with the safety capabilities of the assets. Specifically, this means that risks of process are matched with safeguards of the PEAs (C-2.c), e.g. using a causal network [35]. The resulting interconnection of safeguards of the PEAs is translated into an intermodular safety system during the functional safety orchestration (C-3.c).

In the additional aspects (E-H) the required configurations and connections are defined. These aspects are important for the operation of the plant and do not interfere with the control and execution of the defined *modular recipe*. The results of the specification of the additional aspects together with the modular recipe and specific signal plan are joined together in the last step, the setup of the runtime (C-4.). Here, the individual POL system creates an executable version of the results of both engineering phases. With this final step, the modular plant is set up and prepared for operation.

4.4 Orchestration runtime

The runtime of the orchestration has two phases: commissioning (III) and operation (IV) (see Figure 2). During commissioning, the engineering of the orchestration is tested, and the physical plant is prepared and tested. As shown in previous work [25], this process can be assisted by virtual commissioning using simulation models for the individual PEAs. After successful commissioning, the plant can be transitioned to the operational phase. During operation, all engineered

connections of services and signals are monitored, while operation recipes and possible exceptions are executed. To change individual aspects of the orchestration, the methodology must be repeated starting from the latest step effected by the desired change.

5. Application

As an example, a reaction with subsequent separation of the reaction product in a laboratory distillation plant is considered for an ideal process, although not every aspect of the orchestration method can be represented in full detail. A closer look is taken at the choice of types based on their capabilities as well as PEA-to-PEA communication.

We assume that the conceptual design for the process has already been finalized including a reaction with a succeeding separation step. The following requirements are formulated for the example process:

- » Two components A and B are necessary for the reaction to form the product C ($A + B \rightarrow C$)
- » For sufficient product quality, the educts need to fulfil a dosing ratio of 2:1 for components A:B

Additionally, an ideal mixture of all three components A, B and C and a reaction is assumed with $A + B \rightarrow C$ with a

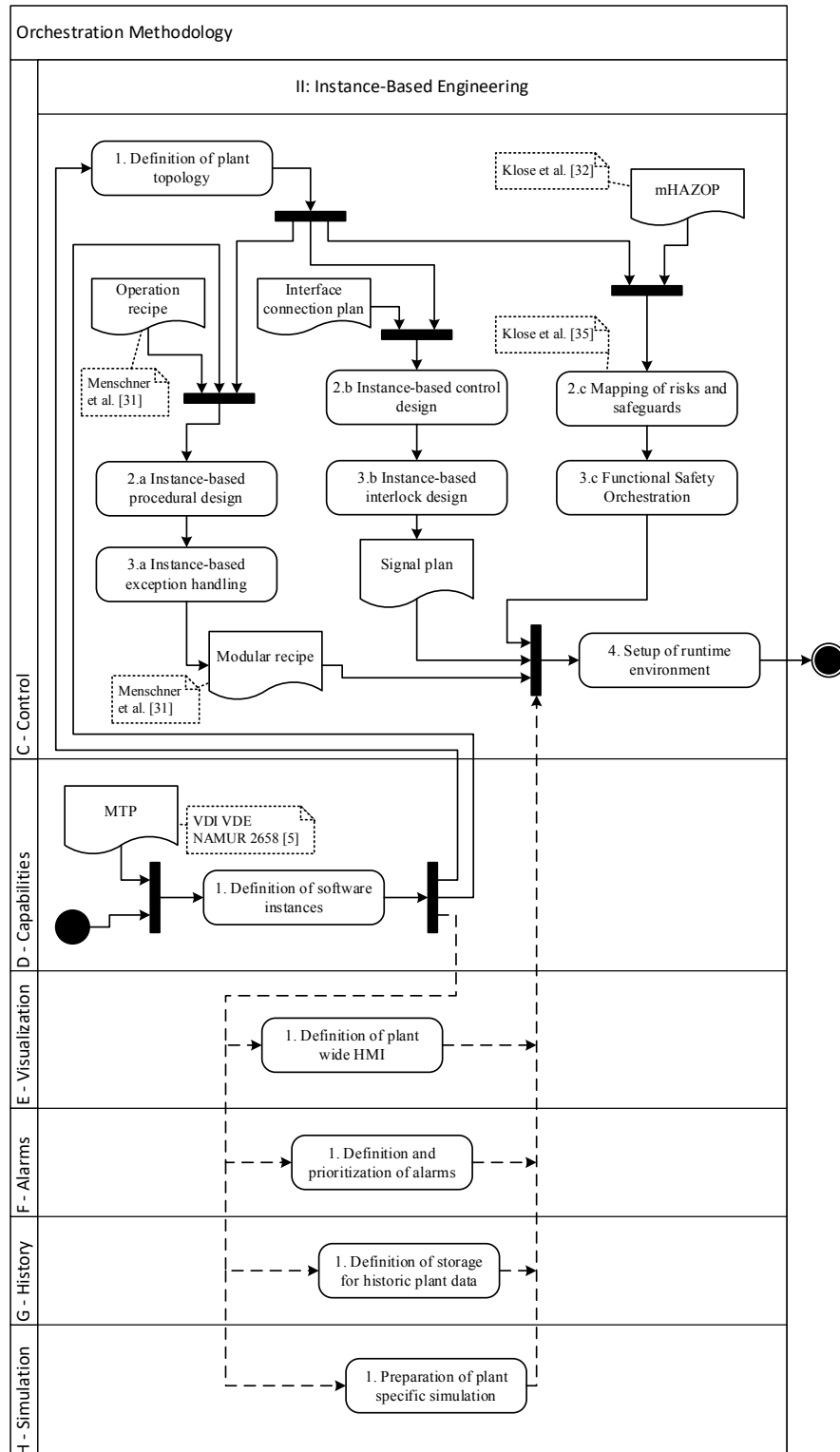


Figure 4: UML activity diagram to model the steps of the instance-based engineering (II) of the overall orchestration methodology.

conversion rate of 50%, where component C is the light key component in the system without forming an azeotrope.

5.1 Type-based engineering

At this point, a preliminary set of capabilities can be formulated (see Figure 3 I.D-1.). For the desired process, the following process steps are necessary: *Dose* (for component A), *Dose* (for component B), *React* and *Dose* for the reaction

block and *Distill* for the distillation block, summarized in a block diagram [26].

The functional plant topology (I.C-1.) is derived and the result as an extended, simplified process flow diagram is shown in Figure 5. Compared to the standard [26] the needed capabilities and required control loops (e.g. ratio control) are added. To simplify the example, only the normal operation is considered, where all capabilities need to be active

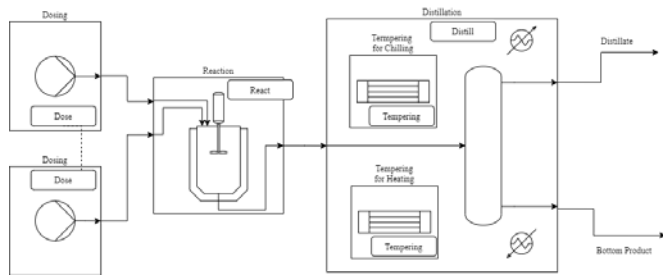


Figure 5: Functional plant topology based on the preliminary process flow diagram with required capabilities.

at the same time (I.C-2.). If the requested dosing ratio is left, the distillation needs to shut down (I.C-3.).

The *React* capability formulated here is in fact a *SuperService* for a reaction PEA according to [28]. When combining the abstract process-based service requirements with the functional clustering of available MTPs, it should be possible to iteratively choose the available types for this process coming to a first functional plant topology. Within the case study, the requirement arises to find one or more types fulfilling the functions *Dose* and *React*. In the fictional MTP-Collection, a type could be found matching the *React SuperService*, but it does not include the additionally required *Dose services* at the inlets. Hence, for feeding the reaction step, one or two types that contain these services are necessary. The appropriate type should be chosen with respect to the ratio control in the feed between component A and B.

According to concepts of [5], there are various possibilities to implement this ratio control. Two possible solutions are a choreographed service between Dose A and Dose B, or a controller for the ratio control located in the POL. Hereby, one Dosing-type communicates its actual measured mass flow via a *ProcessValueOut* to the POL, is being processed by a controller, and a determined setpoint for the mass flow of the second Dosing-type is communicated via a *ProcessValueIn* [6]. Another solution is a single Dosing-type with an integrated ratio controller for two outlets, where the total mass flow and the ratio between the two lines can be set as service parameters. However, the pros and cons of the solutions cannot be discussed further here and are partially addressed in [36].

For the case study, we use a PEA-type with integrated ratio control using a *ProcessValueIn*. The ratio control between the two feed streams can then be achieved by setting the service parameters.

Like the stated discussion, decisions for the choice of available types must be made.

5.2 Instance-based engineering

Resulting from the choice of PEAs, the specific information of the PEAs can be added. This is used to determine the process values that need to be connected for the ratio control (see Figure 6).

The required capabilities are implemented by the services of the selected types. The *React SuperService* is implemented by a *Mix*, *Temper*, and *ResidenceTime* service. After matching all operation ranges of the PEAs, it turns out that the Reaction PEA cannot continuously feed to the distillation column, hence, a buffer is necessary. This buffer is added as a new PEA between the Reaction and Distillation PEA and the *Dose service* is integrated in the *modular recipe*. The needed connections of *ProcessValues* from both Dosing PEAs and the Distillation PEA are formulated in a signal plan. With the specified recipe, the modular plant is ready for operation.

6. Discussion

The application of the methodology shows that with the abstraction, the orchestration of *services* is still an extensive task and in the current state, mainly based on individual signals.

For flexibility, the *dependency inversion principle* was applied with the definition of the phases and the use of type-specific aspects for as many steps as possible. This goes hand in hand with the decoupling of interfaces and assets, which should be assisted in practice. The development of such tools requires expertise from different domains. An approach to reduce complexity and apply this in the POL itself by utilizing *MicroFrontends* is presented in [37].

Acceleration could be enabled by integrating existing standards into the engineering process. Using these standards helps in reuse and integration with engineering tools or in the development of new tools. Potential for acceleration also lies in the transition of the individual orchestration

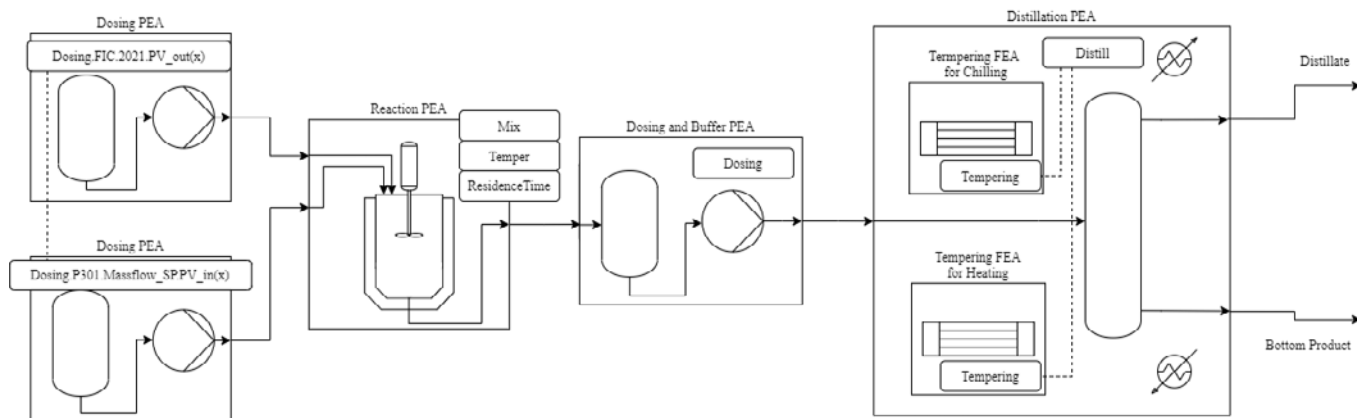


Figure 6: Display of the resulting plant topology with instance information.

phases from *type-based* to *instance-based engineering* as well as via commissioning to operation.

To evaluate the full extent of the benefits for this proposed engineering process further applications are needed.

Furthermore, additional research could lead to an overall improvement of the engineering process. One research aspect would be the improvement of the semantical description of services. To make greater use of the encapsulation of capabilities in *services*, designing them in a more abstract way could be beneficial. The difficulty here lies in the unknown usage of the *services* and the lack of descriptive models for the actual behaviour. The transferred information within the semantically described datatype of *services* and the MTP gains interest. At present, semantics of the information that is transferred cannot be standardized in an easy way. An approach to bring process engineering and automation closer together is made in [3] by bringing some more insights on the mapping of process steps and *services*. This development is also connected to the specification of assets. Elaborating the use of types also for equipment-specific aspects, the choice of assets as transition from type-based to instance-based engineering could become part of an integrated engineering workflow.

Additionally, to avoid unnecessary plant downtime, a coordination with connected safety systems is required [38]. Therefore, the procedural control resulting from the orchestration needs to be in sync with possible safety systems so that they can react to the active process steps. This aspect needs to be covered in the functional safety orchestration, and is currently analysed by the TaskForce Safety-MTP of the NAMUR AK 4.5. Furthermore, the design of intermodular safety systems is up to now an instance-based process. It is necessary to analyse how the benefits of the type-based approach can be applied during functional safety orchestration.

References

- [1] Bramsiepe, C., Sievers, S., Seifert, T., Stefanidis, G. D., Vlachos, D. G., Schnitzer, H., ... Schembecker, G. (2012). Low-cost small scale processing technologies for production applications in various environments—Mass produced factories. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51, 32-52. doi: 10.1016/j.cep.2011.08.005.
- [2] VDI 2776-1:2020. (2020). Verfahrenstechnische Anlagen - Modulare Anlagen - Grundlagen und Planung modularer Anlagen. VDI: www.vdi.de
- [3] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik Chemieingenieurwesen (GVC), VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). (2022). *Modulare Anlagen - Paradigmenwechsel im Anlagenbau: Zusammenspiel von Prozesstechnik und Automatisierungstechnik*. Retrieved from: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/modulare-anlagen>
- [4] Stutz, A., Fay, A., Barth, M., Maurmaier, M. (2020). Orchestration vs. Choreography Functional Association for Future Automation Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8268-8275., doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1961.
- [5] VDI/VDE/NAMUR 2658. (2020). Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie. VDI: www.vdi.de
- [6] VDI/VDE/NAMUR 2658-4. (2020). Entwurf, Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie - Modellierung von Moduldiensten. VDI: www.vdi.de
- [7] Martin, R. C., Grenning, J., Brown, S., Henney, K., Gorman, J. (2018). *Clean architecture: a craftsman's guide to software structure and design* (No. s 31, pp. 57-91). Prentice Hall.
- [8] Bloch, H., Fay, A., Knohl, T., Hoernicke, M., Bernshausen, J., Hensel, S., ... Urbas, L. (2017). A microservice-based architecture approach for the automation of modular process plants. In *2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE. doi: 10.1109/ETFA.2017.8247573.
- [9] Dorofeev, K., Wenger, M. (2019). Evaluating skill-based control architecture for flexible automation systems. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1077-1084). IEEE. doi: 10.1109/ETFA.2019.8869050.
- [10] Bloch, H., Grebner, T., Fay, A., Hensel, S., Menschner, A., Urbas, L., ... Ag, B. (2018). Orchestration of services in modular process plants. In *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 2935-2940). IEEE. doi: 10.1109/IECON.2018.8591300.
- [11] Sillitti, A., Vernazza, T., Succi, G. (2002). Service oriented programming: a new paradigm of software reuse. In *International Conference on Software Reuse* (pp. 269-280). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-46020-9_19.
- [12] Sheng, Q. Z., Qiao, X., Vasilakos, A. V., Szabo, C., Bourne, S., Xu, X. (2014). Web services composition: A decade's overview. *Information Sciences*, 280, 218-238., doi: 10.1016/j.ins.2014.04.054.
- [13] Dorofeev, K., Bergemann, S., Terzimehić, T., Grothoff, J., Thies, M., Zoitl, A. (2021). Generation of the orchestrator code for skill-based automation

7. Summary and outlook

This paper presents a methodology for the process of orchestration of modular process plants using the *module type package* (MTP). Focus is on a type-based approach to support the decoupling of physical assets and the engineering phases. The methodology, created with experts from industry and academia, integrates various concepts from modular automation and its phases. Furthermore, the methodology is integrated into the NAMUR Asset Lifecycle. In the methodology, the necessary steps to join information from process development and MTP to create a fully functional modular process plant are described. Performing the individual steps uses existing procedures, but also brings new development needs, e.g. the service-dependency as described in [34].

The proposed engineering process could also become relevant if the system is a hybrid process plant, combining modular and conventional process plants [39], or a conventional process plant, which is structured as described in [40].

Acknowledgements

The ProRegional research project (FKZ 03EWS001E) was funded under the Energy funding program by the German Federal Ministry of Economics and Climate Protection (BMWK) via the Project Management Agency Jülich on the basis of a resolution of the German Bundestag. The ENPRO2 ORCA research project (FKZ 03ET1517A) was funded under the Energy funding program by the German Federal Ministry of Economics and Climate Protection (BMWK) via the Jülich project management organization on the basis of a resolution of the German Bundestag.

- systems. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613728.
- [14] Pfrommer, J., Stogl, D., Aleksandrov, K., Navarro, S. E., Hein, B., Beyerer, J. (2015). Plug & produce by modelling skills and service-oriented orchestration of reconfigurable manufacturing systems. *at-Automatisierungstechnik*, 63(10), 790-800., doi: 10.1515/auto-2014-1157.
- [15] Bamberg, A., Urbas, L., Bröcker, S., Bortz, M., Kockmann, N. (2021). The Digital Twin–Your Ingenious Companion for Process Engineering and Smart Production. *Chemical Engineering & Technology*, 44(6), 954-961., doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.202000562>.
- [16] Rahm, J., Theißen, M., Klose, A., Soemers, M., Temmen, H., Schäfer, C., Urbas, L. (2021). Efficient Automation Engineering of Modular Process Equipment Assemblies Using the Digital Twin. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(12), 2081-2091., doi: 10.1002/cite.202100100.
- [17] BioPhorum. (2021). *Automated Facility Plug-And-Play - Stirred Tank Unit Interface Specification*. Retrieved from: <https://www.biophorum.com/download/automated-facility-stirred-tank-unit-interface-specification/>
- [18] Schindel, Polyakova, Harding, Weinhold, Stenger, Gruenewald, Bramsiepe. (2021). General approach for technology and Process Equipment Assembly (PEA) selection in process design. *CHEMICAL ENGINEERING AND PROCESSING-PROCESS INTENSIFICATION*, 159. doi: 10.1016/j.cep.2020.108223.
- [19] Harding, D., Polyakova, M., Nowara, D., Rech, S., Grünewald, M., Bramsiepe, C. (2021). New process function-based selection and configuration methodology for Process Equipment Assemblies (PEAs) exemplified on the unit operation distillation. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 168, 108531., doi: 10.1016/j.cep.2021.108531.
- [20] Klose, A., Merkelbach, S., Menschner, A., Hensel, S., Heinze, S., Bittorf, L., ... Urbas, L. (2019). Orchestration requirements for modular process plants in chemical and pharmaceutical industries. *Chemical Engineering & Technology*, 42(11), 2282-2291. doi: 10.1002/ceat.201900298.
- [21] Stutz, A., Maurmaier, M., Korner, c., Berenz, M. (2020). Der Process Orchestration Layer – Ein Überblick über die Gestaltungsmöglichkeiten für die prozessleittechnischen Systeme modularer Produktionsanlagen. In *Automation 2020: Shaping Automation for our Future, 1st ed., VDI Wissensforum GmbH, Ed. Düsseldorf: VDI Verlag, 2020*, pp. 823–842. doi: 10.51202/9783181023754-823.
- [22] Hoernicke, M., Stark, K., Wittenbrink, A., Bloch, H., Hensel, S., Menschner, A., ... Urbas, L. (2020). Automation architecture and engineering for modular process plants–approach and industrial pilot application. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8255-8260. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1966.
- [23] Bittorf, L., Kockmann, N., da Silva Santos, P, Stark, K., Hoernicke, M., Holm, T., Stutz, A., Eckert, M., Menschner, A., Klose, A., Merkelbach, S., Urbas, L. (2020). Demonstratoren für dienstgesteuerte modulare Prozesseinheiten und deren effiziente Orchestrierung. In *Automation 2020: Shaping Automation for our Future, 1st ed., VDI Wissensforum GmbH, Ed. Düsseldorf: VDI Verlag*, pp. 129–144.
- [24] Wiedau, M., von Wedel, L., Temmen, H., Welke, R., Papakonstantinou, N. (2019). Enpro data integration: extending DEXPI towards the asset lifecycle. *Chemie Ingenieur Technik*, 91(3), 240-255. doi: 10.1002/cite.201800112.
- [25] Klose, A., Schenk, T., Rosen, R., Botero, A., Schäfer, C., da Silva Santos, P., ... Urbas, L. (2021). Virtuelle Inbetriebnahme modularer Prozessanlagen: Fallstudien zur Validierung MTP-basierter Orchestrierungen. *atp magazin*, 63(04). doi: 10.17560/atp.v63i04.2542.
- [26] DIN EN ISO 10628-1. (2015). Schemata für die chemische und petrochemische Industrie - Teil 1: Spezifikation der Schemata (ISO 10628-1:2014). DIN: www.beuth.de
- [27] DIN EN 61512-1. (2000). Chargenorientierte Fahrweise - Teil 1: Modelle und Terminologie (IEC 61512-1:1997). DIN: www.beuth.de
- [28] Blumenstein, M., Stutz, A., Maurmaier, M. (2019). Rollenbasierte Entwurfsmethodik für modulare Anlagen auf Basis von sogenannten Super-Services. In *Automation 2019, 1st ed., VDI Wissensforum GmbH, Ed. Düsseldorf: VDI Verlag*, pp. 197–214.
- [29] Graube, M., Hensel, S., Iatrou, C. P., Klose, A., Mädler, J., Urbas, L. (2019). Rezeptgetriebene Prozessführung in modularen Anlagen: Konzepte und Erfahrungen aus dem P2O-Lab Dresden. In *gehalten auf der 20. VDI-Kongress AUTOMATION-Autonomous Systems and 5G in Connected Industries*.
- [30] Stutz, A., Fay, A., Barth, M., Maurmaier, M. (2021). Software patterns for the realization of automation service choreographies. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613201.
- [31] Menschner, A., Klose, A., Hensel, S., Urbas, L., Schäfer, C., Bittorf, L., Santos, P., Stutz, A., Stark, K. (2019). Von der Prozessbeschreibung zur modularen Anlage. In *Automation 2019, 1st ed., VDI Wissensforum GmbH, Ed. Düsseldorf: VDI Verlag*, pp. 287–300. doi: 10.51202/9783181023518-287.
- [32] Klose, A., Bramsiepe, C., Szmaj, S., Schäfer, C., Krink, N., Welscher, W., Urbas, L. (2019). Safety-lifecycle of modular process plants-information model and workflow. In *2019 4th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRs)* (pp. 509-517). IEEE. doi: 10.1109/ICSRs48664.2019.8987685.
- [33] Pelzer, F., Klose, A., Leon, S. V., Horch, A., Knab, J., Langehegermann, M., ... Urbas, L. (2021). Funktionale Sicherheit für modulare Anlagen: Entwurf eines Sicherheitslebenszyklusmodells. *atp magazin*, 63(09), 84-93. doi: <https://doi.org/10.17560/atp.v63i09.2552>.
- [34] Bloch, H., Fay, A. (2021). Modelling of service dependencies in modular process plants for the analysis of orchestrations. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613711.
- [35] Klose, A., Kessler, F., Pelzer, F., Rothhaupt, M., Kostiuik, D., Kabashi, A., ... Urbas, L. (2021). Representing Causal Structures in HAZOP Studies. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613357.
- [36] Ruede, T., Schäfer, C., Greve, C., Urbas, L. (2019). Dienstedesign und Rezepterstellung zur Orchestrierung einer granular modularen Laboranlage. In *Automation 2019, 1st ed., VDI Wissensforum GmbH, Ed. Düsseldorf: VDI Verlag*, pp. 269–286. doi: 10.51202/9783181023518-269.
- [37] Lorenz, J., Lohse, C., Urbas, L. (2021). MicroFrontends as Opportunity for Process Orchestration Layer Architecture in Modular Process Plants. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 01-04). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613474.
- [38] Klose, A., Pelzer, F., Etz, D., Strutzenberger, D., Frühwirth, T., Kastner, W., Urbas, L. (2021). Building blocks for flexible functional safety in discrete manufacturing and process industries. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-8). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613608.
- [39] Markaj, A., Fay, A., Hoernicke, M., Schoch, N., & Stark, K. (2021). Requirements and conceptual design for hybrid process plants. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE. doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613714.
- [40] Hoernicke, M., Stark, K., Schoch, N., Jeske, R., Markaj, A., Fay, A. (2022). Modular engineering of conventional plants: Using MTP for world-scale industry plants. *atp magazin*, 63(4), 62-68.

Anselm Klose, Dipl.-Ing. (born 1994) has been working as a research associate at the Chair of Process Control Systems/Process Systems Engineering group since 2018 and as Managing Director of the Process-to-Order Lab at TU Dresden since 2020. His research area includes safety analysis and orchestration of modular plants.

Contact

Chair of Process Control Systems/Process Systems Engineering
TU Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
☎ +49 351 463 34891
@ anselm.klose@tu-dresden.de

Julius Lorenz, Dipl.-Ing. (born 1996) has been working as a research associate at the Chair of Process Control Systems/Process Systems Engineering group at TU Dresden since 2019. His research interests include modular automation, open architectures, and innovative connectivity solutions for future automation applications.

Lukas Bittorf, M.Sc. (born 1992) is project manager at Semodia GmbH, a company offering services and products around modular automation, MTP and NOA. He works on customer and research projects.

Katharina Stark, M.Sc. (born 1979) is Senior Scientist at ABB Corporate Research in Ladenburg, Germany. Her research interests are workflows and tools in the area of automation engineering.

Mario Hoernicke, Dipl.-Ing (FH) (born 1984) is Senior Principal Scientist at ABB Corporate Research in Ladenburg, Germany. His research interest focusses on the development of new and innovative concepts for automation engineering.

Andreas Stutz (born 1990) is a research engineer in the Technology and Innovations department at Siemens AG in Karlsruhe. His focus lies on future architectures of automation in the process industry. He is an external Ph.D. candidate at the Helmut-Schmidt-University / University of the Federal Armed Forces Hamburg at the chair of Prof. Alexander Fay. His research deals with the application of service choreographies in distributed automation.

Hannes Weinhold (born 1990) works at Merck as a research engineer. His research interests include automated process synthesis and process development automation.

Niclas Krink, M.Sc. (born 1992) is a technical project manager at X-Visual Technologies GmbH. He works at the interface of process engineering and software development.

Wolfgang Welscher (born 1957) is the founder and CEO of X-Visual Technologies GmbH in Berlin, which develops and publishes innovative engineering software for the process industry. In his role as the CEO, he combines the process know-how of an engineer with many years of professional experience as a software developer.

Manfred Eckert (born 1964) is head of the Technology Solutions group in the Process Development Engineering at Merck KGaA in Darmstadt. His team is driving the digitalization for Lab and Production with the focus on modular automation MTP/POL technology at Merck worldwide.

Stefan Unland, Dipl.-Ing. (born 1965) is Head of ROLF SANDVOSS INNOVATION CENTER – Technology & Innovation, SAMSON AG in Frankfurt/Main. He is experienced in engineering of package units for thermal and testing applications. Current tasks include digitalization of plant engineering and further expanding the valves' decentralized intelligence.

Anna Menschner, Dipl.-Ing. (born 1987) is managing director of Semodia GmbH in Dresden. She has many years experience in the field of Module Type Packages (MTPs) and modular automation. Semodia GmbH offers services and products in the field of MTP for all stakeholders along the value chain. This enables a wide dissemination of the MTP in the industry.

Polyana da Silva Santos, M.Sc. (born 1978) has been working as Lead Engineer Process Control at Evonik in Marl since 2005. Her current focus is on MTP and automation of modular plants.

Prof Norbert Kockmann (born 1966) is head of the Laboratory of Equipment Design at TU Dortmund University since 2011 after he had worked in industry and academia in different positions. His group develops smart miniaturized and modular process equipment with integrated sensors for sustainable process development in laboratories.

Prof Leon Urbas (born 1965) holds the professorship for Process Control Systems and is head of the Process Systems Engineering group at the TU Dresden. With his team, he conducts research on semantic models, discipline-integrating methods, and automation architectures for the digital transformation of the process industry.

Peer-Review: 18.12.2021

Using domain knowledge to improve machine learning

A survey of recent advances

Tim Rensmeyer, Samim Multaheb, Julian Putzke, Bernd Zimmering, Oliver Niggemann, Helmut Schmidt University Hamburg

Machine learning methods have achieved some impressive results over the past decade. However, this was in large part the result of utilizing large amounts of data and growing computational resources efficiently. To extend this recent success to domains where large quantities of high-quality data are not readily available, the field of informed machine learning has emerged, which aims at integrating preexisting knowledge into machine learning models. The aim of this paper is to provide an overview of the major new developments in this field and to discuss important open problems.

#machine learning #neural networks #domain knowledge

Nutzung von Fachwissen zur Verbesserung des maschinellen Lernens

Ein Überblick über die jüngsten Fortschritte

Methoden des maschinellen Lernens haben in den letzten zehn Jahren einige beeindruckende Ergebnisse erzielt. Dies war jedoch zum großen Teil das Ergebnis der effizienten Nutzung großer Datenmengen und wachsender Rechenressourcen. Um diesen jüngsten Erfolg auf Bereiche auszudehnen, in denen große Mengen hochwertiger Daten nicht ohne weiteres verfügbar sind, hat sich das Feld des Informed Machine Learning entwickelt, das darauf abzielt, bereits vorhandenes Wissen in maschinelle Lernmodelle zu integrieren. Ziel dieses Beitrags ist es, einen Überblick über die wichtigsten neuen Entwicklungen in diesem Bereich zu geben und wichtige offene Probleme zu diskutieren.

#Machine Learning #Neuronale Netze #Domänenwissen

1. Introduction

Over the past decade, neural networks have emerged as a very popular approach in many machine learning applications. This can be seen from the numbers of yearly IEEE machine learning publications with the keyword “Neural Network”, which increased from 21 in 2008 to 1161 in 2020. The rise in popularity has in large part been due to the ability of neural networks to utilize large datasets and computational resources much better than previous methods [1]. This scalability of neural networks to larger datasets by leveraging increasing computational resources has been the main driving force in the deep learning revolution and has yielded many impressive results for a variety of complex tasks where high-quality data is available in large quantities [1].

However, for many machine learning applications, gathering data is often demanding, e.g. for defect detection in production systems, where either a product has to be artificially damaged to gather data or one has to gather data over time for defects that arise naturally during production. Even where large amounts of high-quality data are available, neural networks have shown a significant susceptibility to outliers and additionally an inability to

robustly quantify their predictive uncertainty [2], which limits their applicability in safety-critical domains.

The challenges of limited or low-quality data and frail models, have given added momentum to the field of informed machine learning, which tries to integrate various forms of domain knowledge into machine learning methods, as these hybrid models often show significantly better performance in low data regimes and generally have higher robustness to outliers [3,4,5,6].

There are already well-written survey papers that broadly cover the field of informed machine learning[7]; our aim is to give a more detailed overview of promising recent algorithmic advances for integrating domain knowledge into machine learning models. Moreover, we aim to identify some key outstanding problems whose further investigation may lead to significant progress in the field of informed machine learning.

Determining what constitutes domain knowledge is beyond the scope of this paper. We focus on a few concrete and common forms of knowledge:

1. Knowledge in the form of physical or quantitative models

2. Knowledge about system structures such as component interactions
3. Knowledge about neural network parameters which might lead to a well-performing model

These points will be discussed in the three main sections Physics Informed Neural Networks, Graph Neural Networks and Bayesian Neural Networks. These topics are particularly relevant to cyber-physical systems and they have seen some major algorithmic advances in recent years. It may seem that explicit knowledge about neural network parameters is limited but it will be discussed how many forms of knowledge can be expressed in terms of model parameters.

In each section, the framework is introduced and then some interesting case studies are discussed to give a better idea about what problems the respective algorithms are applicable to and also to deliver a reference point on how to solve them. Each section contains at least one case study from a design or manufacturing background. The other case studies are chosen from a wide range of domains to give a broad overview about the range of possibilities of applying the respective techniques. At the end of each section, the individual advantages, disadvantages and open problems of the algorithms are discussed. A list of commonly used notations and acronyms is provided in table 1.

1.1 Physics informed neural networks

Differential equations play a significant role in modelling dynamic systems. In the case of controls engineering, their properties are analysed before designing a controller that manipulates the system behaviour in the desired manner (e.g. stabilizing it).

Nevertheless, in many cases, the parameters and the internal system states are only partially known. Physics informed neural networks (PINNs) offer one way to solve the problem of unknown parameters and system states, by estimating them based on recorded data of the system.

Generally differential equations can be written as

$$N_{\lambda}[\mathbf{x}] = 0 \quad (1)$$

where $\mathbf{x}(t, \mathbf{r})$ describes the state of the system at time t and (in the case of partial differential equations) location \mathbf{r} , N is some possibly nonlinear and time-dependent differential operator and $\lambda \in \mathbb{R}^n$ represents the unknown parameters of N . A typical example would be the excited damped oscillation differential equation

$$N_{\lambda}[x](t) = \ddot{x}(t) + 2d\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2x(t) - f(t) = 0 \quad (2)$$

that regularly arises in electrical components like RLC circuits or mechanical systems, where the damping ratio ($\lambda=d$), the undamped angular frequency ($\lambda=\omega_0$) or both ($\lambda=(d, \omega_0)^T$) could be unknown.

Any continuous function can be arbitrarily well approximated by a neural network [8]. In addition, modern deep learning libraries have recently made the evaluation of differential operators on neural networks straightforward. Raissi et al. [9]

Table 1: Common terminology.

Notations and Acronyms	
Bold case symbols	Vector valued quantities
\mathbf{x}	The state of a system
λ	The unknown parameters of a physical model
t	The time coordinate
\mathbf{r}	The spatial coordinates
i, j	Vector and matrix indices
Θ	The learnable model parameters
a, b	Nodes in a graph
h	The node features
k	The edge features
u	An independent stochastic variable
v	A dependent stochastic variable
PINN	Physics Informed Neural Network
GNN	Graph Neural Network
MPGNN	Message Passing Graph Neural Network
BNN	Bayesian Neural Network

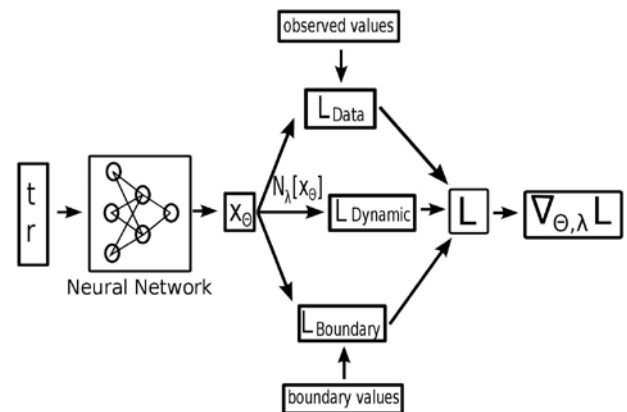


Figure 1: The gradient computation workflow for PINNs.

were the first to realize that these two facts make it possible to solve differential equations numerically with neural networks and stochastic gradient descent. The evolution of the state \mathbf{x} is approximated by a neural network with weights Θ , input (t, \mathbf{r}) and output $\mathbf{x}_{\Theta}(t, \mathbf{r}) \approx \mathbf{x}(t, \mathbf{r})$ which is trained using stochastic gradient descent through a loss function

$$L = L_{\text{Data}} + L_{\text{Dynamic}} + L_{\text{Boundary}} \quad (3)$$

where L_{Data} is based on the discrepancy between \mathbf{x}_{Θ} and some known values of \mathbf{x} ,

L_{Dynamic} is a loss due to violations of the differential equation, L_{Boundary} is based on some boundary conditions for the state of the system.

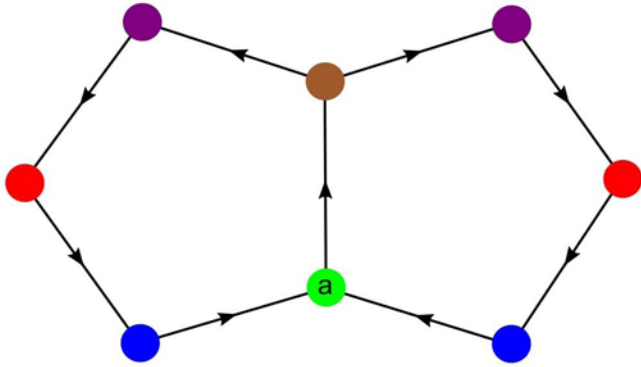


Figure 2: An illustration of a mathematical graph. Coloured are the zeroth, first, second, third and fourth order predecessors of node a.

If the differential equation represents an exact description of the system, the need for a data-based loss term is solely due to the unknown parameters λ which are treated as learnable parameters during gradient descent and are estimated in parallel to the weights of the network. If the differential equation is only an approximate description, the expected accuracy of the approximation can be taken into account by weighing the three loss terms appropriately.

As an example, suppose an RLC-circuit is undergoing a stress test where direct measurement of the components is not possible except for a few observations of the capacitor charge Q . However, the applied voltage $U(t)$ can be observed continuously.

Using PINNs it is straightforward to get an estimate of how parameters like the resistance change due to factors such as heating by solving the governing differential equation

$$N_R[Q](t) = L\ddot{Q}(t) + \frac{Q(t)}{C} + R\dot{Q}(t) - U(t) = 0 \quad (4)$$

and treating the resistance R as an unknown parameter. Since solving differential equations by gradient descent is very different from the usual numerical algorithms, this approach has some capabilities that classical methods do not exhibit.

For example, in a production setting, PINNs could potentially be used to monitor manufacturing processes for which boundary conditions are difficult to control precisely. This idea was tested by Zobeiry et al. [10], who used PINNs for fast modelling of heat transfer processes in a manufacturing task under a large range of possible boundary conditions. To do this they included the boundary conditions as input values of the neural network. By training the neural network in this way it was able to learn a numerical solution to the heat transfer equation for a large class of possible boundary conditions at once.

Another application where PINNs show great potential is for state estimation tasks, where they can be used to interpolate between measured values of a process in a way that is consistent with the governing dynamics of the process [4]. While in the original paper PINNs were introduced to handle prior information in the form of differential equations, nowadays any machine learning algorithm that leverages both data and a physical model is commonly referred

to as physics informed. These hybrid models are becoming increasingly popular for modelling complex phenomena, where accurate physical models cannot be derived and only limited data is available.

One of the most straightforward ways a physical model can be combined with a machine learning approach is to train the machine learning model to predict the difference between the empirically observed values of the system and the values predicted by the physical model. This is what was done in [5] by Zhao et al. to predict a critical heat flux phenomenon in a boiling system.

They compared a random forest and a neural network in combination with two methods based on domain knowledge and compared the predictive accuracy of those combinations and the standalone machine learning and physical models. One of the standalone physical models used was significantly weaker than the other.

Interestingly, not only did the hybrid models significantly outperform the standalone models, the inaccuracy of the weaker model was largely compensated for by the machine learning model, showcasing the potential potency of combining machine learning and physical models.

Lastly, any pre-existing quantitative knowledge about a system can be incorporated into a neural network model through a regularization term in the loss function. Networks that are trained in that way are also sometimes called physics-guided neural networks, a term that was introduced by Karpatne et al. in [6] where they used this method to model the temperature of a lake. More specifically, they used the known relationship between water temperature and density to enforce that the water density predicted indirectly by the model is monotonically increasing with depth. The resulting model significantly outperformed both purely physics- and data-based techniques and had a good consistency with the physical principle.

Overall, PINNs are a very useful framework for incorporating quantitative knowledge into neural network models which will often improve the model's accuracy and robustness, especially in the case of small datasets or data points far from the training dataset. However, there are some challenges when applying them.

As described, the loss function will often be composed of a model-based loss term and a data-based loss term that have to be weighted against each other. This is often a process of trial and error since no general principles are established on what an appropriate weighting might be.

Further, classical numerical methods for differential equations often come with theoretical guarantees that bound the error compared to the true solution, while physics informed neural networks currently still have to rely on empirical verification.

1.2 Graph Neural Networks

Many real-world instances can be described as graphs, including social networks, images, molecules and production systems. In particular, production systems provide an excellent example of the benefits of using graphs.

Usually, the input for a neural network in a production environment is sensor data. Before a conventional neural

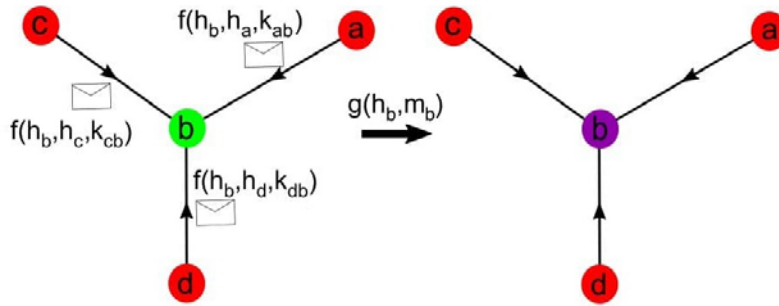


Figure 3: An illustration of the message passing update for node b .

network can make predictions, the raw data from the individual sensors has to be concatenated into a single vector.

The idea of using graph representations is to add a priori knowledge in the form of relationships between the sensors and corresponding components. By including this additional information explicitly, the space of learnable functions can be limited, which presumably will improve the performance and robustness of the learned model. Importantly, the extra information has to be provided by domain experts.

Mathematically, a graph $G = (V, E)$ is described by a set of nodes V and a set of edges E where $e_{ab} \in E$ denotes an edge pointing from node a to node b (Figure 2). It is common that the properties of each node a are encoded in a node feature vector h^a and properties of the relationships between nodes for each edge e_{ab} are represented by edge feature vectors k^{ab} .

The versatility of graphs to encode knowledge makes the development of machine learning algorithms that can make use of graph-structured information very desirable and has become a highly active area of research. One of the most promising learning frameworks is that of Graph Neural Networks (GNNs). While many different kinds of graph neural networks have been proposed, most modern GNNs fall under the category of either Message Passing Graph Neural Networks (MPGNNs) or Convolutional Graph Neural Networks. We limit ourselves here to message passing graph neural networks, since the framework also covers the most common types of graph convolutions. A more exhaustive review can be found in [11].

MPGNNs were introduced by Gilmer et al. in [12]. This approach makes use of a message passing layer consisting of two separate parts. In the first stage, a message m_b is computed for each node b through a layer specific message function f via

$$m_b = \sum_{a \in P(b)} f(h_b, h_a, k^{ab}) \quad (5)$$

where $P(b)$ denotes the set of first order predecessors of b in the graph. In the subsequent step the new node representation is calculated as

$$h_b \leftarrow g(h_b, m_b) \quad (6)$$

with a node update function g that may also vary between layers (Figure 3). After several message passing layers have been applied to a graph, the output is then often passed

through a fully connected neural network for the final prediction.

While message passing layers automatically make use of the local structural information in a graph, they do not make very good use of global properties of large graphs, since after n message passing layers, the node representation h_b can only take into account the nodes that are at most n steps apart in the graph. To circumvent this limitation, a master node that is connected to all other nodes is often added to the graph. Gilmer et al. then constructed a GNN according to this paradigm.

They tested the network on a molecular property prediction task with different ways to incorporate global graph features and significantly outperformed the other methods including other graph neural network types.

Domain knowledge can play an integral role in the construction of the graph representation. This was used in [13] by Owerko et al. for learning optimal power flow solutions for electricity grids. They modelled the buses in the grid as nodes and used custom matrix M to model the relative importance between them according to

$$M_{i,j} = \exp(-c|z_{i,j}|^2) \quad (7)$$

where $z_{i,j}$ is the impedance between the buses and c is a scaling factor. Connections below a certain threshold were completely cut off to induce sparsity. They combined two GNN layers, each followed by a nonlinear activation function with a final global layer. Their model convincingly outperformed a basic fully connected neural network.

Electric circuits in general have proven very amenable to GNNs due to their inherent graph-like structure. Because of this, they are also being investigated for the prediction of circuit properties and automated circuit design. Both of

Table 2: Advantages and disadvantages of Physics Informed Neural Networks.

Physics Informed Neural Networks	
Advantages	Disadvantages
Better generalization	Balancing of loss terms required
Higher accuracy	No theoretical guarantees
Better physical consistency	
Can solve for unknown parameters in differential equations	

these were studied by Zhang et al. in [14] for distributed circuit design in high-frequency domains. By taking the circuit parameters as input and predicting the desired properties, the trained model was able to speed up the simulation of these properties by four orders of magnitude. Further, by using their trained model to optimize the circuit parameters for the desired properties, the authors showed that their model could design circuits that outperformed human-designed circuits in that domain.

In conclusion, GNNs are a very flexible architecture for incorporating domain knowledge in the form of system structures and topologies, capable of improving the state of the art in many data-driven applications. There are some drawbacks though.

While many forms of data, such as images, can be represented as graphs, this also means that a general graph contains less specific information than, for example, an image would. This limits especially the expressiveness of graph convolutions when compared to convolutions on images or text, where there is generally a fixed number of neighbouring nodes and a notion of the relative position that nodes have with respect to each other.

As a consequence of this reduced expressiveness, it is often observed that stacking many graph neural network layers does not lead to the same improvement in model performance as it does for regular deep neural networks and best model performance is often reached with just two graph neural network layers [15].

1.3 Bayesian Neural Networks

Most complicated systems are in practice not perfectly predictable and can only be modelled probabilistically. In manufacturing these uncertainties may arise due to variations in environmental conditions like humidity and temperature, as well as limited accuracy of manufacturing machines or human errors; in logistics one is usually subjected to traffic variations which are highly uncertain due to the unpredictability of human behaviour.

It is therefore often desirable not just to make a point estimate as a prediction but also to assess the uncertainty in the prediction. This applies especially to safety-relevant domains such as repair and overhaul, human-machine interaction, or medicine.

However, it is commonly the case that neural networks do not capture uncertainty very well and can sometimes make wrong predictions while simultaneously predicting a low level of uncertainty [2]. This is particularly the case on out-of-distribution data, which is in some aspects different than the data that the network was trained on [2].

Therefore, regulations in safety-relevant operations such as in aviation and automotives are difficult to meet with black-box neural networks. Traditionally, (computer-aided) mathematical and logical models are used in these domains to guarantee the safe operation of components. Examples include uncertainty estimation with mathematical turbulence models for aircraft parts [16] and finite element models for motor vehicle occupant safety [17].

However, machine learning and deep neural networks have proven to be potent methods for a variety of tasks, with unmatched accuracy [1]. The need for more robust neural

Table 3: Advantages and disadvantages of Graph Neural Networks.

Graph Neural Networks	
Advantages	Disadvantages
Good local feature extraction on graph structured data	Deep stacks not beneficial and consequently bad at global feature extraction
Superior performance on graph structured data compared to other machine learning methods	

network models with quantifiable uncertainty measures is therefore evident. Bayesian Neural Networks (BNNs) fulfil this requirement but do not come entirely without downsides. This topic, therefore, remains an active field of research.

One of the main reasons for the susceptibility of neural networks to out-of-distribution data and their poor generalization ability is the fact that neural network inference is generally done from a frequentist perspective of probability theory. In a frequentist setting, a single parameter vector for the neural network is learned that best predicts the training data. For neural networks, this approach very quickly runs into problems of overfitting and has to be counteracted by regularization techniques like weight decay or dropout.

In a Bayesian setting, a parametric probability density $p((\mathbf{v}, \mathbf{u}) | \boldsymbol{\theta})$ is used to model some target variable \mathbf{v} based on an input variable \mathbf{u} where a parameter vector $\boldsymbol{\theta}^*$ that leads to the best approximation of the true density $p((\mathbf{v}, \mathbf{u}))$ is unknown. One of the drawbacks of Bayesian statistics is that pre-existing knowledge about the best parameter vectors is assumed to exist in the form of a prior probability density

$$\boldsymbol{\theta}^* \sim p(\boldsymbol{\theta}) \quad (8)$$

A common point of critique for Bayesian methods is that there is often very little prior knowledge about the best parameter vectors for general-purpose neural networks. However, domain knowledge such as physical principles or (imperfect) simulations can be used to construct an informative task-specific prior density, as later examples will illustrate. The Bayesian approach is not limited to these forms of domain knowledge, but rather offers a framework for integrating various forms of knowledge into a model.

The pre-existing information is then refined through training data $D = ((\mathbf{v}_1, \mathbf{u}_1), \dots, (\mathbf{v}_n, \mathbf{u}_n))$ by using Bayes rule to calculate the posterior density

$$p(\boldsymbol{\theta} | D) = \frac{p(D | \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta})}{p(D)} = \frac{p(D | \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta})}{\int p(D | \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta}} \quad (9)$$

Unlike in the frequentist point of view, in Bayesian statistics there is always some uncertainty in the parameters. To model a new target variable \mathbf{v} given a new input \mathbf{u} one has to integrate over the posterior density to get $p(\mathbf{v} | \mathbf{u}, D)$ via

$$p(\mathbf{v} | \mathbf{u}, D) = \int p(\mathbf{v} | \mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}) p(\boldsymbol{\theta} | D) d\boldsymbol{\theta} \quad (10)$$

This integration over the posterior density makes Bayesian models much more robust to outliers, however it does not come without a cost.

For Bayesian neural networks, $p(\mathbf{v}|\mathbf{u},\Theta)$ is the output of a neural network with a high dimensional parameter vector Θ . This makes the entire Bayesian procedure analytically intractable and challenging to solve numerically. Nonetheless, many algorithms were developed to approximate the Bayesian procedure for neural networks [18].

For neural networks whose purpose is to model a physical process, one way to design a prior distribution over the weights is to train the network in the non-Bayesian point of view on data from a simulation that may make some idealized assumptions or have other imperfections. Since the simulation is not perfect, some uncertainty in the learned weights is then introduced resulting in the prior distribution over the weights. Afterwards, the inaccuracy of the simulation is partly compensated for by calculating the posterior distribution through real-world data.

This was done in [19] by Chen et al. to predict aspect ratio dependent etching depth for semiconductor production and showed good performance, especially when compared to a prior distribution that is usually chosen in the absence of domain knowledge.

A different incorporation of physical principles into BNNs is also possible. In [20] Yang et al. introduced a general framework on how to combine Bayesian with physics informed neural networks to generate uncertainty estimates and deal with noisy observations of a system described by a partial differential equation. To do this, the authors construct the prior density proportional to $\exp(-L_{Dynamics}(\Theta))$ where $L_{Dynamics}(\Theta)$ is a loss term based on the violation of the differential equation or boundary condition.

While BNNs have many theoretical advantages over regular neural networks, they have not yet been widely adopted in any domain. One of the main reasons for this is that both training and test time predictions generally require much more computation than regular neural networks. However, there have been some recent advances that approximate the integration over the posterior efficiently at test time by distilling the predictive distribution into a single neural network [21].

While these distillation methods could potentially enable the use of sophisticated but computationally expensive Bayesian methods for domains where fast predictions are necessary, like real-time system monitoring, they have, to our knowledge, only been applied to toy problem sets and their performance beyond these remains to be investigated. Another reason is that, at least in applications where no prior density over the weights can be constructed based on

Table 4: Advantages and disadvantages of Bayesian Neural Networks.

Bayesian Neural Networks	
Advantages	Disadvantages
Better quantification of uncertainty	Higher computational burden
Higher robustness to outliers	Cold posterior effect
Less prone to overfitting	

domain knowledge, the posterior density seems to be sub-optimal. This manifests in the form that, when the posterior density is artificially sharpened up to some degree, the predictive performance of the model increases [22]. This phenomenon is called the cold posterior effect whose origin seems to be an inadequacy of the prior density. It is not clear to what degree it will remain if the prior density is constructed through domain knowledge. Here, a carefully constructed prior density might be able to advance our understanding of the nature of the cold posterior effect and whether its origin really is due to inadequate prior densities.

2. Conclusion

Of the three algorithms discussed, graph neural networks are so far closest to widespread adoption, since if the data is appropriate their use has very few downsides. For Bayesian neural networks, the main downside of the high computational burden might at least to some degree be alleviated by the continuous increase of computational resources over time as well as further algorithmic advances, which could move them increasingly into the mainstream. The state of physics informed neural networks is currently mixed. Taken in the broader sense, they have few downsides but for solving for differential equations, it remains to be seen if they can extend their domain of usefulness beyond the niche applications they are currently utilized for, into the sphere that is currently occupied by the classical numerical solvers.

Finally, even though some open research problems have been mentioned, one further aspect is also worth consideration. While many techniques have now emerged that can make use of a specific form of domain knowledge, it is often the case that different forms of pre-existing knowledge exist. The different methods for harnessing the individual forms of knowledge can be very dissimilar or even somewhat contradictory. How to combine different forms of domain knowledge in machine learning, therefore, remains a challenging problem for the foreseeable future.

References

- [1] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press.
- [2] Goodfellow, I., Shlens, J., Szegedy, C. (2015). Explaining and Harnessing Adversarial Examples. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations*.
- [3] Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422-440.
- [4] Shi, R., Mo, Z., & Di, X. (2021, May). Physics-informed deep learning for traffic state estimation: A hybrid paradigm informed by second-order traffic models. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 35, No. 1, pp. 540-547).
- [5] Zhao, X., Shirvan, K., Salko, R. K., Guo, F. (2020). On the prediction of critical heat flux using a physics-informed machine learning-aided framework. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114540.

- [6] Karpatne, A., Watkins, W., Read, J., Kumar, V. (2017). Physics-guided Neural Networks (PGNN): An Application in Lake Temperature Modeling. *arXiv:1710.11431*.
- [7] Von Rueden, L., Mayer, S., Beckh, K., Georgiev, B., Giesselbach, S., Heese, R., ... Schuecker, J. (2019). Informed Machine Learning--A Taxonomy and Survey of Integrating Knowledge into Learning Systems. *arXiv preprint arXiv:1903.12394*.
- [8] Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 2(5), 359-366.
- [9] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E. (2017). Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. *arXiv:1711.10561*.
- [10] Zobeiry, N., Humfeld, K. D. (2021). A physics-informed machine learning approach for solving heat transfer equation in advanced manufacturing and engineering applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 101, 104232.
- [11] Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., Philip, S. Y. (2020). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 32(1), 4-24.
- [12] Gilmer, J., Schoenholz, S. S., Riley, P. F., Vinyals, O., Dahl, G. E. (2017). Neural message passing for quantum chemistry. In *International conference on machine learning* (pp. 1263-1272). PMLR.
- [13] Owerko, D., Gama, F., Ribeiro, A. (2020). Optimal power flow using graph neural networks. In *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 5930-5934). IEEE.
- [14] Zhang, G., He, H., Katabi, D. (2019). Circuit-GNN: Graph neural networks for distributed circuit design. In *International conference on machine learning* (pp. 7364-7373). PMLR.
- [15] Liu, M., Gao, H., Ji, S. (2020). Towards deeper graph neural networks. In *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining* (pp. 338-348).
- [16] Mishra, A. A., Iaccarino, G. (2017). Uncertainty estimation for reynolds-averaged navier-stokes predictions of high-speed aircraft nozzle jets. *AIAA Journal*, 55(11), 3999-4004.
- [17] Yang, K. H., & Chou, C. C. (2015). Mathematical models, computer aided design, and occupant safety. In *Accidental Injury* (pp. 143-182). Springer, New York, NY.
- [18] Goan, E., Fookes, C. (2020). Bayesian neural networks: An introduction and survey. In *Case Studies in Applied Bayesian Data Science* (pp. 45-87). Springer, Cham.
- [19] Chen, C. H., Parashar, P., Akbar, C., Fu, S. M., Syu, M. Y., Lin, A. (2019). Physics-prior Bayesian neural networks in semiconductor processing. *IEEE Access*, 7, 130168-130179.
- [20] Yang, L., Meng, X., Karniadakis, G. E. (2021). B-PINNs: Bayesian physics-informed neural networks for forward and inverse PDE problems with noisy data. *Journal of Computational Physics*, 425, 109913.
- [21] Malinin, A., Mlodozieniec, B., Gales, M. (2019). Ensemble distribution distillation. *arXiv preprint arXiv:1905.00076*.
- [22] Izmailov, P., Vikram, S., Hoffman, M. D., Wilson, A. G. G. (2021). What are Bayesian neural network posteriors really like?. In *International conference on machine learning* (pp. 4629-4640). PMLR.

AUTHORS

Tim Rensmeyer studied Mathematics at the Cristian-Albrechts University of Kiel. After graduating with a master's degree in 2021, he joined the Institute of Automation Technology at the Helmut Schmidt University in Hamburg. His current research focuses on making machine learning systems more data-efficient and robust with a particular interest in energy grids and molecular systems.

Contact

Helmut Schmidt University
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg
@rensmeyt@hsu-hh.de

Samim Ahmad Multaheb studied Mechanical Engineering at the Hamburg University of Applied Sciences. He received his master's degree in Production Technology and Management in 2018. Before joining the Institute of Automation Technology at the Helmut Schmidt University in Hamburg, he worked in medical AI research. His current research is focused on finding underlying physical mechanisms in cyber-physical systems with deep learning.

Julian Putzke studied Mechanical Engineering at the Hamburg University of Applied Sciences. After graduating,

he worked as a Mechanical Engineer in the tobacco industry and joined the Institute of Automation Technology at the Helmut Schmidt University in Hamburg in 2021. His current research focuses on planning problems for Cyber-Physical Production Systems.

Bernd Zimmering studied Automation Technology at the Hamburg University of Applied Sciences. After his graduation in 2017, he was employed in the beverages industry until he has joined the Institute of Automation Technology at the Helmut Schmidt University in Hamburg in 2020. His research fields are machine learning, as well as control & automation of production systems.

Prof. Oliver Niggemann gained his doctorate in 2001 at the University of Paderborn. He then worked for seven years in leading positions in the industry. From 2008–2019 he had a professorship at the Institute for Industrial Information Technologies (inIT) in Lemgo/Germany. Until 2019 he was also deputy head of the Fraunhofer IOSBINA which works in industrial automation. In 2019, he took over the university professorship "Computer Science in Mechanical Engineering" at the Helmut Schmidt University in Hamburg/Germany. There, he does research at the Institute for Automation Technology IfA in the field of artificial intelligence and machine learning for cyber-physical systems.

GETEILTES WISSEN IST BESSERES WISSEN

Mehr als 950 eBooks, ePaper und eJournals:
FACHWISSEN AUS UNSEREN THEMENBEREICHEN.

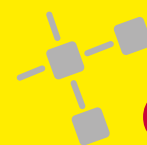


Die Multi-User-Lizenz Mediendatenbank für Ihre internen Netzwerke.

Perfekt für Unternehmen, Hochschulen und Bibliotheken.

Mehr erfahren? Rufen Sie uns einfach an: +49 201 82002-26

Oder schreiben Sie uns: leserservice@vulkan-verlag.de



SciFo

Peer-Review: 10.11.2021

Industrielles Transfer-Lernen

Von der Wissenschaft in die Praxis

Benjamin Maschler, Hannes Vietz, Universität Stuttgart; Hasan Tercan, Christian Bitter, Tobias Meisen, Bergische Universität Wuppertal; Michael Weyrich, Universität Stuttgart

Trotz hoher Lösungspotenziale des maschinellen Lernens für gängige Probleme der Automatisierungstechnik finden sich in der Praxis wenig Anwendungsbeispiele. Um der Ursache hierfür auf den Grund zu gehen, zeigen die Autoren anhand von vier beispielhaften Anwendungsfällen die Hürden für konventionelles maschinelles Lernen auf und benennen Lösungsansätze mittels industriellem Transfer-Lernen. Zum großflächigen Einsatz derartiger Ansätze, fehlt es an Voraussetzungen, deren Schaffung jedoch anders als beim konventionellen maschinellen Lernen grundsätzlich möglich ist. Der Artikel schließt mit einer Betrachtung dieser Voraussetzungen und macht Vorschläge, wie sie zu erfüllen sind.

#Transfer-Lernen #Kontinuierliches Lernen #Industrielle Anwendung

Industrial transfer learning

From science to practical applications

Despite the considerable potential of machine learning for solving common problems in automation technology, there are few examples of its application in practice. In order to examine the reasons for this, we looked at four practical cases, and present possible solutions involving industrial transfer learning. However, various preconditions must be met for the large-scale use of such approaches. The article concludes with a discussion of these prerequisites and offers suggestions about how they could be fulfilled.

#transfer learning #continual learning #industrial application

1. Einleitung

In den letzten Jahren haben datengetriebene Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) beeindruckende Erfolge erzielen können: Von der meisterhaften Beherrschung immer komplexerer Spiele über übermenschliche Spracherkennungs- und -synthese-Leistungen bis hin zur Bild- und Objekterkennung, bspw. von einzelnen Personen in großen Menschenmengen, scheint kaum etwas nicht automatisierbar. Auch für industrielle Anwendungsfälle wurden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen immer neue, bahnbrechende Fortschritte vermeldet. Man könnte meinen, die autonome Fabrik sei zum Greifen nahe.

In der industriellen Praxis findet diese Entwicklung jedoch wenig Widerhall. Die produktive Nutzung von KI beschränkt sich bisher häufig auf Nischen und viele der theoretisch möglichen Anwendungen werden bisher nicht in der Breite realisiert. Ziel dieses Beitrags ist es daher, Gründe für die zögerliche Nutzung von datengetriebener künstlicher Intelligenz zu beschreiben und mögliche Lösungsansätze auf Basis von Industrial Transfer Learning aufzuzeigen. Die dazu verwendeten, anwendungsnahen Beispiele sollen eine Übertragung in die Praxis erleichtern.

2. Herausforderungen: KI-basierte Produktionsautomatisierung

Das Grundprinzip datenbasierter KI ist es, mittels mathematischer Verfahren automatisiert Muster in Datensätzen zu erkennen. Diese Muster können dann als abstraktes Modell verstanden und genutzt werden, bspw. um das Systemverhalten unter veränderten Umgebungsbedingungen simulativ zu „erproben“. Zentrale Voraussetzung für die Nutzbarkeit eines solchen Modells ist, dass dessen Vorhersagen präzise genug sind. Dies hängt zu einem wesentlichen Teil von den verwendeten Daten ab, die bspw. ausreichend vielfältig sein müssen, so dass ein Algorithmus beschreibende und allgemein gültige Muster in ihnen finden kann.

Aktuelle Arbeiten basieren sehr häufig auf künstlichen neuronalen Netzen, die ausgehend von der Annahme eines repräsentativen, großen Datensatzes eines Anwendungsfalls trainiert werden. Diese Annahme ist jedoch in der industriellen Produktion oft nicht gültig:

Zum einen ist die Beschaffung einer ausreichenden Datenbasis problematisch (s. Abbildung 1, Buchstabe A). Die in der industriellen Produktion genutzten Anlagen und Prozesse zeichnen sich durch eine hohe Vielfalt bei kleiner Stückzahl

aus. Es stehen damit typischerweise nur wenige Quellen für einen Datensatz zur Verfügung. Diese Zahl wird weiter reduziert durch geringe Kooperationsbereitschaft, bspw. aus rechtlichen oder wettbewerblichen Gründen sowie sicherheitstechnische Bedenken und technische Inkompatibilitäten [1]. Hinzu kommt, dass die minimal benötigte Datenmenge meist nicht bekannt ist.

Zum anderen zeichnen sich eine Vielzahl industrieller Prozesse durch eine hohe Dynamik aus (s. Abbildung 1, Buchstabe B). Gründe dafür sind u. a. sinkende Stückzahlen und damit verbunden häufigere Produktwechsel, Anlagenverschleiß, wechselnde Umgebungsbedingungen oder auch Rohstoff- bzw. Halbzeugeigenschaften. Einmal erstellte, zu diesem Zeitpunkt ausreichend gute Datensätze verlieren also gemeinsam mit den damit trainierten Algorithmen mit der Zeit ihre Gültigkeit, weil der betrachtete Prozess sich von ihnen weg entwickelt [2, 3]. Ab wann sich Prozess und Datensatz zu sehr unterscheiden, ist ebenfalls meistens nicht bekannt.

Diese Herausforderungen erschweren eine breitere, praktische Nutzung von datenbasierten KI-Ansätzen in der Produktionsautomatisierung. Die nachfolgenden Beispiele dienen der detaillierten Veranschaulichung dieser Problematiken.

2.1 Szenario 1: Selbstlernende Roboter

Die Automatisierung von Fügeprozessen durch Roboter erfordert eine präzise Führung von Bauteilen entlang einer Trajektorie. Reinforcement Learning bietet das Potenzial, Regelstrategien für dynamische Umgebungen, in denen beispielsweise die Position der Bauteile stark variiert, zu erlernen [4, 5]. Reinforcement Learning ist ein Lernparadigma des maschinellen Lernens, welches zum Ziel hat, einen KI-Agenten zur Lösung einer bestimmten Problemstellung zu trainieren. Unter einem KI-Agenten ist in diesem Kontext ein lernendes System zu verstehen (z. B. in Form eines künstlichen neuronalen Netzes), das selbständig eine Lösungsstrategie erlernt, ohne vorher explizit dafür programmiert worden zu sein. Das Training des Agenten erfolgt dabei in Trial-and-Error-Manier durch das Ausprobieren verschiedenster Lösungsmöglichkeiten.

Eine zentrale Herausforderung im Einsatz solcher Agenten ist daher, dass diese Erfahrungen sammeln müssen, um ein Verständnis der Aufgabe aufzubauen und anschließend hieraus Lösungswege abzuleiten. Die benötigte Erfahrung, in Form von tausenden von Iterationen, sind zeit- und kostenintensiv, sodass ein Training an realen Robotern meist nicht durchführbar ist. Darüber hinaus muss ein Reinforcement Learning Agent auch negative Erfahrungen sammeln können, was im Kontext der Robotik Kollisionen mit potenzieller Beschädigung von Hardware bedeutet.

Um sowohl Zeit zu sparen als auch Sach- und ggf. Personenschäden zu vermeiden, bieten Simulationen eine kostengünstige Alternative zur Sammlung von Erfahrungen. Eine große Herausforderung hierbei ist jedoch, dass sich Simulationen aufgrund von Abweichungen zu realen Prozessen (der sogenannten Simulation-to-Reality-Lücke) nur bedingt für das Training von Agenten eignen (s. Abbildung 2).

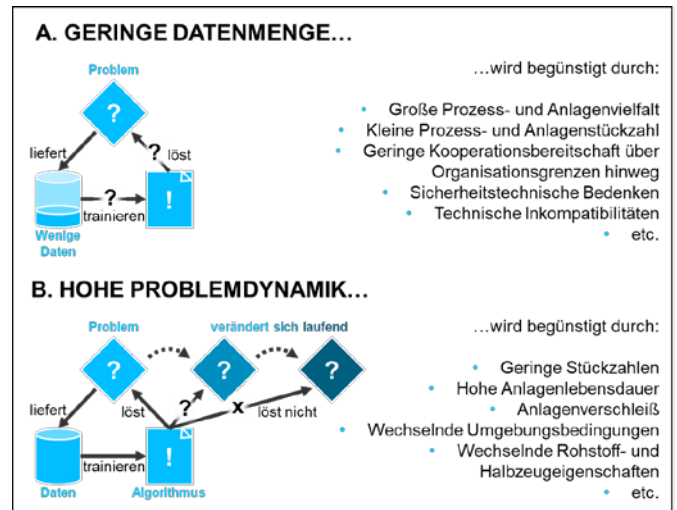


Abbildung 1: Herausforderungen für datenbasierte KI-Ansätze in der Produktionsautomatisierung.

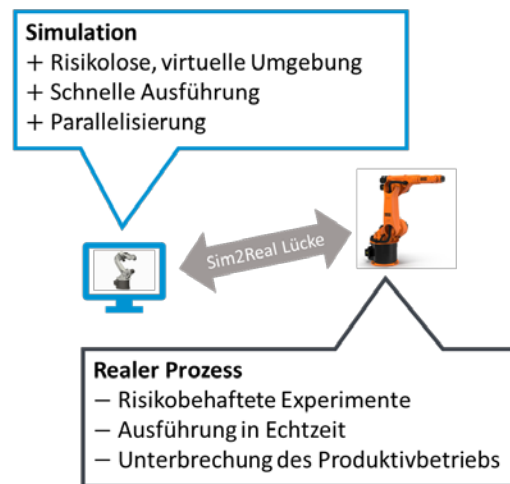


Abbildung 2: Vorteile von Simulationen für die Entwicklung von Reinforcement Learning Agenten gegenüber einem Training im realen Prozess.

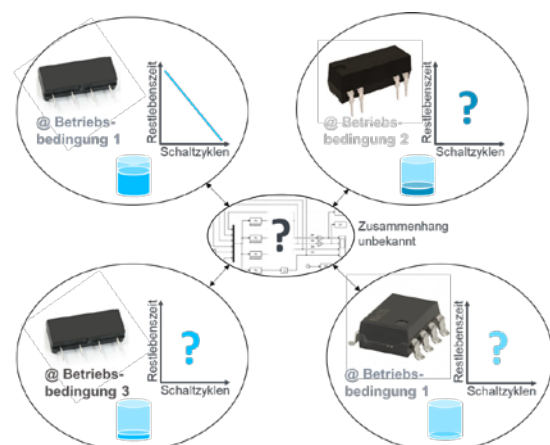


Abbildung 3: Fehlen ausreichend spezifischer physikalischer Modelle als Problem der datenbasierten Verschleißvorhersage.

2.2 Szenario 2: Verschleißvorhersage

Der rechtzeitige, also weder zu späte noch zu frühe, Austausch verschlissener Komponenten kann Ausfälle vermeiden und entsprechend Ausgaben reduzieren, erfordert

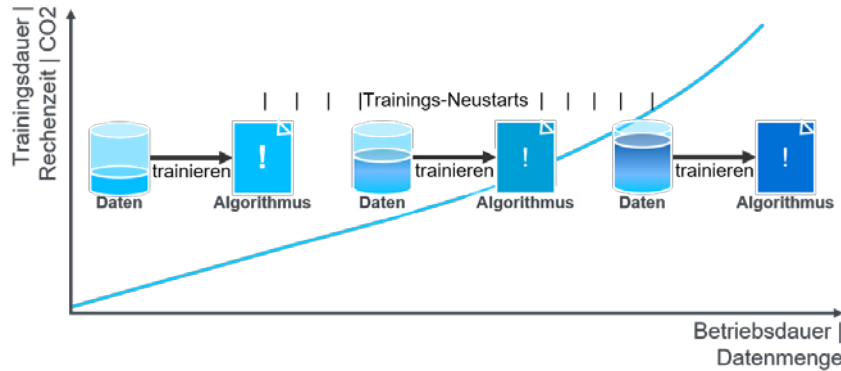


Abbildung 4: Über die Zeit stark ansteigender Trainingsaufwand als Problem der visuellen Objektdetektion.

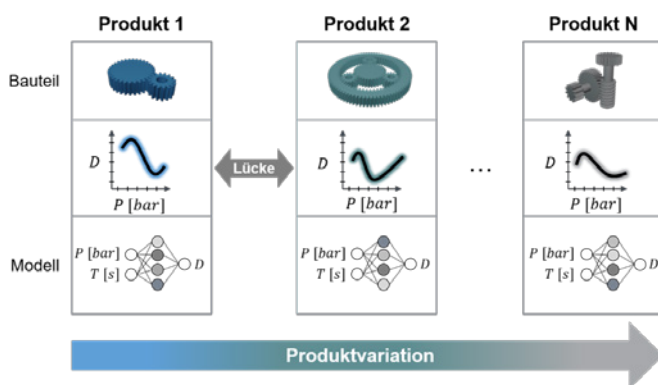


Abbildung 5: Predictive Quality im Spritzguss auf Basis der Maschinenparameter Druck und Zeit.

jedoch eine präzise Vorhersage des optimalen Zeitpunkts. Datengetriebenes maschinelles Lernen bietet das Potenzial, für die jeweils vorliegenden Einsatzbedingungen angepasste Verschleißvorhersagen für Predictive Maintenance zu ermöglichen, ohne dass man die physikalischen Zusammenhänge verstehen und modellieren muss.

Voraussetzung dafür sind große Mengen vielfältiger, passgenauer und gelabelter Trainingsdaten, die somit möglichst für die vorliegenden Einsatzbedingungen auch Komponentenausfälle enthalten sollten. Diese Bedingungen sind in der Praxis jedoch schwer zu erfüllen: Aufgrund der hohen Kosten werden Ausfälle gerne vollständig vermieden und die Vielfalt an bspw. Anlagen, Herstellern und Einsatzbedingungen erschwert die Findung ähnlicher Szenarien selbst bei Standardkomponenten mit sehr hohen Stückzahlen (s. Abbildung 3).

2.3 Szenario 3: Visuelle Objektdetektion

Für autonom agierende, fahrerlose Transportsysteme ist die korrekte Wahrnehmung der Umgebung essenziell. Insbesondere wenn sie ein gleichberechtigter Teil eines komplexen Produktionsumfeldes sind und nicht nur Zug-artig in ausgewiesenen Flächen operieren. Durch datengetriebenes maschinelles Lernen können Kameradaten dazu verwendet werden, ihre Umgebungen wahrzunehmen. Angefangen von einfacher Hindernisdetektion bis zur Lokalisierung und Trajektorienplanung existiert eine Vielzahl von Anwendungen, die auf visueller Objekterkennung basieren.

Moderne Produktionsumgebungen sind jedoch stetig im Wandel. Eine trainierte KI muss sich der verändernden Umgebung anpassen und immer neu trainiert werden, um zuverlässig zu funktionieren. Durch die wachsende Datenmenge und neuen Trainingsdurchläufe steigen die Trainingskosten und der Energiebedarf über den Lebenszyklus einer KI immer weiter an (s. Abbildung 4).

2.4 Szenario: Qualitätsvorhersage in der Fertigung

Die Vorhersage der finalen Produktqualität noch während der Produktion kann Ausschuss verringern oder über einen frühzeitigen Produktionsabbruch zumindest Zeit und Kosten sparen. Datengetriebenes Deep Learning bietet das Potenzial, auf die jeweils vorliegenden Einsatzbedingungen angepasste Qualitätsvorhersagen zu ermöglichen, ohne die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen und modellieren zu müssen. Grundlage hierfür ist das Training neuronaler Netze auf einer repräsentativen Datenbasis bestehend aus historischen Prozess- und Qualitätsdaten.

Eine große Herausforderung besteht darin, dass Fertigungsprozesse kontinuierlichen Veränderungen unterliegen, wie z. B. der Herstellung neuer Produkte, sodass zuvor trainierte Modelle nicht mehr ausreichend genaue Vorhersagen liefern können. Infolgedessen müssen die Modelle stets auf neuen, im realen Umfeld sehr kostspieligen Beobachtungen trainiert werden, sobald sich die Prozesse ändern. Darüber hinaus tendieren künstliche neuronale Netze dazu, altes Wissen beim Lernen neuer Sachverhalte zu vergessen – ein Phänomen, das Forscher auch *Catastrophic Forgetting* nennen.

3. Lösungsansätze: Wissenstransfer in der Produktion

Ein allgemeiner Lösungsansatz für die in Kapitel 1 beschriebenen Probleme datenbasierter KI in der Automatisierungstechnik ist der (Teil-)Aufgaben übergreifende Wissenstransfer. Hierdurch kann über verschiedene Szenarien hinweg ein vollständig(-er)-es Modell des zu lösenden Problems erstellt und immer wieder dynamisch ohne vollständiges Neutrainieren angepasst werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über in diesem Zusammenhang relevante Begrifflichkeiten.

In der Wissenschaft wird diesbezüglich grundsätzlich zwischen zwei Lösungsfamilien unterschieden: *Transfer Learning*, das

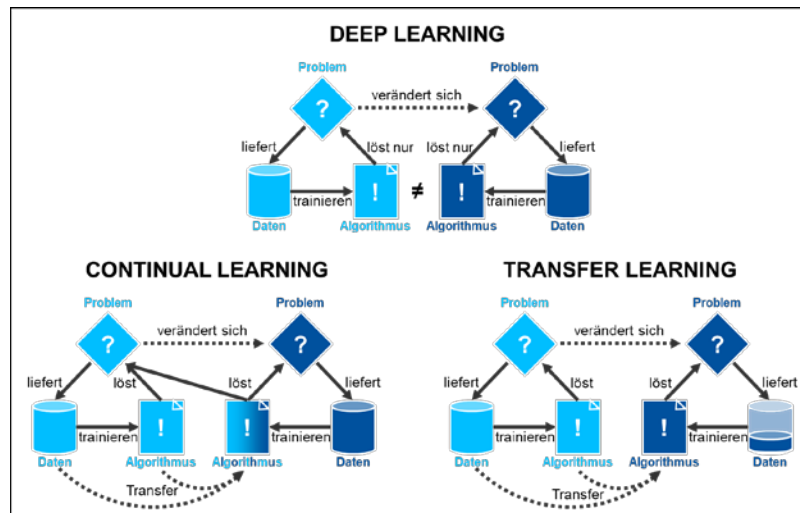


Abbildung 6: Schematische Gegenüberstellung verschiedener Lernverfahren mit und ohne Wissenstransfer.

lediglich auf das bessere Lösen eines neuen Zielproblems abzielt, und *Continual Learning*, dass das Lösen eines neuen Zielproblems unter Beibehaltung der Lösungsfähigkeit bereits erlernter Quellprobleme zum Gegenstand hat (s. Abbildung 6). In der Praxis stellt sich diese theoretische Unterteilung jedoch vielfach als unpassend heraus, da sowohl die Generalisierungsfähigkeiten des Continual Learnings als auch die Spezialisierungsfähigkeiten des Transfer Learnings notwendig sind, um aus verschiedenen Teilproblemen Allgemeingültiges zu extrahieren und anschließend auf den vorliegenden Anwendungsfall anzupassen [6]. Der

Überbegriff des *Industrial Transfer Learnings* soll dies auch sprachlich repräsentieren. Weitere Konzepte des kooperativen, maschinellen Lernens wie Federated Learning oder Few bzw. One Shot Learning werden in diesem Kontext zwar immer wieder genannt, beschäftigen sich jedoch primär mit anderen Fragestellungen. Dies bedeutet nicht, dass sie prinzipiell nicht zur Lösung der vorgenannten Probleme geeignet seien, sondern lediglich, dass sich die damit bezeichneten Methoden in Bezug auf diese Probleme ebenfalls als Transfer oder Continual Learning interpretieren lassen.

Tabelle 1: Wissenstransfer-Glossar.

Begriff	Beschreibung
Continual Learning (deut.: Kontinuierliches Lernen)	Lern-Algorithmus nutzt Wissenstransfer von Quell-Problem(e) auf Ziel-Problem, um anschließend Quell- und Ziel-Probleme besser lösen zu können.
Federated Learning (deut.: Föderales Lernen)	Lern-Algorithmus nutzt Wissenstransfer zwischen dezentralen Clients und zentralem Server, um gemeinsam verschiedene Varianten eines Problems zu lösen ohne die zugrunde liegenden Daten auszutauschen.
Few Shot Learning (deut.: Lernen mit wenigen Versuchen)	Sammelbegriff für Lern-Algorithmen, deren Ziel es ist die Menge an benötigten Trainingsdaten zu minimieren. Methodiken des Continual- und Transfer-Learnings werden häufig dazu verwendet.
Industrial Transfer Learning (deut.: Industrielles Transfer-Lernen)	Lern-Algorithmus nutzt Wissenstransfer von Quell-Problem(e) auf Ziel-Problem, um Lernaufgaben im industriellen Kontext robuster, genauer oder dateneffizienter lösen zu können. Es kann dabei sowohl Continual als auch Transfer Learning zum Einsatz kommen.
Lern-Algorithmus	In Software abgebildetes, mathematisches Verfahren, das aus Daten zielgerichtet allgemeine(-re) Zusammenhänge zur Lösung eines konkreten Problems ableiten kann.
Problem	Lernaufgabe, die sich durch Format und Art von Ein- und Ausgangsdaten sowie die Ein- und Ausgang verbindenden Zusammenhänge charakterisiert.
Quell-Problem	Problem, das dem Lernalgorithmus bereits bekannt ist und von ihm gelöst werden kann.
Transfer Learning (deut.: Transfer-Lernen)	Lern-Algorithmus nutzt Wissenstransfer von Quell-Problem(e) auf Ziel-Problem, um anschließend Ziel- Problem besser lösen zu können.
Wissenstransfer	Austausch von verknüpften Informationen hoher Komplexität, wobei die Form abstrakt, d.h. nicht menschlich nachvollziehbar, sein kann.
Ziel-Problem	Problem, das dem Lernalgorithmus bisher unbekannt ist und von ihm noch nicht gelöst werden kann.

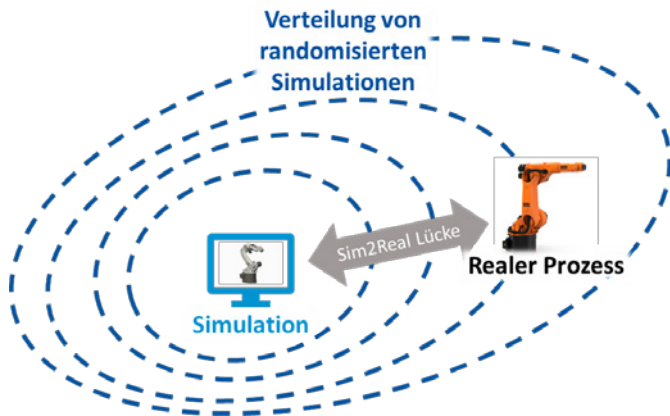


Abbildung 7: Überwindung der Simulation-to-Reality Lücke mit Domain Randomization.

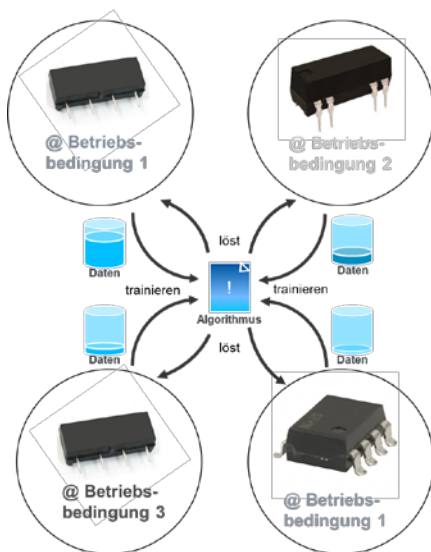


Abbildung 8: Szenarienübergreifendes Lernen für effiziente datenbasierte Verschleißvorhersage auf kleinen Datensätzen.

Sowohl Transfer als auch Continual Learning sind nicht grundsätzlich auf Deep-Learning-Methoden beschränkt. Aufgrund des erheblichen Potenzials von Deep Learning sowie dessen besonderer Empfindlichkeit gegenüber den in Kapitel 1 beschriebenen Problemen werden wir uns im Folgenden jedoch auf Deep-Learning-basierte Ansätze beschränken.

3.1 Szenario 1: Selbstlernende Roboter

Die Überbrückung der Simulation-to-Reality-Lücke, also der Abweichungen einer Simulation von dem realen Prozess, ist die grundlegende Herausforderung im Einsatz von simulativ vortrainierten KI-Agenten. In vielen Fällen ist der naheliegende Lösungsansatz in Form einer Verbesserung der Simulation durch Prozessexperten nicht umsetzbar. Eine Alternative und eine deutlich effizientere Herangehensweise bietet das sogenannte *Domain Randomization* [7]. Hierbei werden Parameter der Simulation zufällig geändert und die entstehenden Simulationsumgebungen anschließend für das Training verwendet. Obwohl die generierten Simulationen von dem realen Prozess sehr stark abweichen können, führt das Training auf einer Verteilung von Simulationen

zu einer erhöhten Robustheit eines KI-Agenten gegenüber Parameterabweichungen. So ist es möglich, einen KI-Agenten auf einen realen Prozess zu übertragen, auch wenn die exakten Bedingungen des realen Prozesses im Training nicht gesehen wurden (s. Abbildung 7).

Wie in [8] gezeigt wurde, beschränkt sich das benötigte Prozesswissen für die erfolgreiche Anwendung von Domain Randomization auf die qualitative Auswahl der zu variierenden Parameter. Zudem erlauben die gesenkten Anforderungen an die Genauigkeit neben einer schnelleren Entwicklung geeigneter Simulationsumgebungen auch eine Effizienzsteigerung im Training von KI-Agenten durch erhöhte Simulationsgeschwindigkeiten.

3.2 Szenario 2: Verschleißvorhersage

In einer ersten Implementierung von Continual-Learning-Ansätzen für die Verschleißvorhersage wurde in [9] eine Regularisierungsmethode auf einem Turbinendatensatz angewandt. Regularisierungsmethoden zeichnen sich dadurch aus, dass sie beim Lernen des Ziel-Problems eine Veränderung von für die Lösung des Quell-Problems besonders wichtigen Parametern erschweren. Dadurch wird der Lern-Algorithmus gezwungen, Parametersätze zu suchen, die beide Probleme lösen können. Aus mathematischen Gründen ist der Wechsel von einem Regressions- zu einem Klassifizierungsproblem notwendig, sodass statt einer konkreten Restlebensdauer (bspw. „728 Stunden“) eine Zustandsklasse (bspw. „kritisch“) prädiziert wird. In der Studie konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit von Regularisierungsmethoden für Verschleißvorhersage-Probleme belegt werden (s. Abbildung 8).

In [3] wurden darauf aufbauend mehrere unterschiedliche Regularisierungsmethoden anhand der Verschleißvorhersage von Lithium-Ionen-Akkus verglichen. Der Anwendungsfall zeichnet sich durch eine hohe Varianz möglicher Nutzungsszenarien und ein immer noch unzureichendes Verständnis der konkreten physikalischen (Verschleiß-)Prozesse aus. In der Studie konnte belegt werden, dass Regularisierungsmethoden eine deutliche Steigerung der Vorhersagegenauigkeit erreichen, wobei jedoch die Ähnlichkeit und Reihenfolge der einzelnen (Teil-)Probleme einen erheblichen Einfluss haben.

In einer noch laufenden Studie wird ein anderer Ansatz zur Verschleißvorhersage von Kugellagern verwendet: Die in [10] vorgestellt Transfer-Learning-Architektur orientiert sich an der erfolgreichen Strategie von Bilderkennungsalgorithmen. Eine nicht-problemspezifische Merkmalerkennung reduziert die Daten auf das Wesentlichste. Anschließend werden über eine auf Clustering basierte Ähnlichkeitserkennung vergleichbare Quell-Probleme identifiziert, von denen die Parameter des Lernalgorithmus oder Trainingsdaten übernommen werden können, um den Lernprozess zu beschleunigen oder trotz geringer Datenmengen überhaupt erfolgreich abzuschließen. Vorläufige Ergebnisse deuten auf eine breite Anwendbarkeit des beschriebenen Ansatzes hin.

3.3 Szenario 3: Visuelle Objektdetektion

In [9] wurde aufgezeigt, dass Continual Learning nicht nur mit speziell für diesen Zweck kreierte Daten funktioniert,

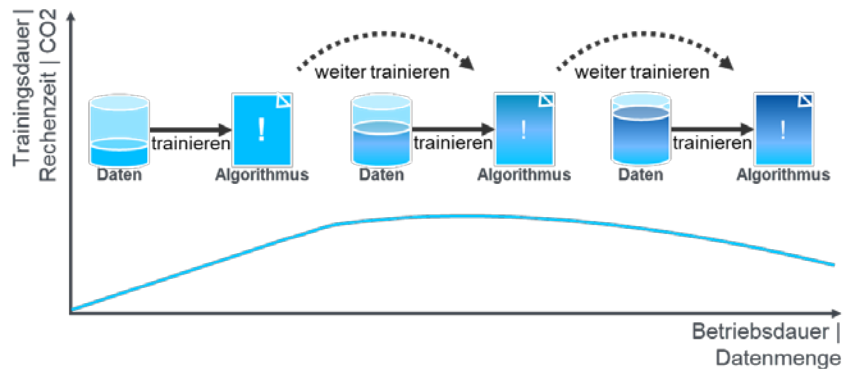


Abbildung 9: Continual Learning ermöglicht ein effizientes Weitertraining mit den neuen Daten, anstatt erneut mit allen Daten zu trainieren.

sondern auch mit praktisch relevanten Industriedaten im Bereich der Verschleißvorhersage ein Weiterlernen ermöglicht. Anders als in der visuellen Objektdetektion bleibt jedoch die Struktur des KI-Modells in der Verschleißvorhersage über dessen Lebenszyklus gleich. So soll beispielsweise immer die verbleibende Lebensdauer bestimmt werden, unabhängig davon wie oft das KI-Modell weiter trainiert wurde. Die Struktur eines KI-Modells der visuellen Objektdetektion verändert sich allerdings, wenn bspw. ein neues Objekt dazugelernt wird. Auch die Art der Daten unterscheidet sich: Bei der Verschleißvorhersage werden Zeitreihendaten genutzt, wogegen die Objektdetektion meist auf einem einzelnen Kamerabild durchgeführt wird. Regularisierungsmethoden funktionieren unabhängig von der Art der Daten, allerdings nicht unabhängig von der Struktur des KI-Modells.

Ein vielversprechender Lösungsvorschlag für die visuelle Objektdetektion ist *Learning Without Forgetting* (LwF) [11], bei dem das KI-Modell während des weiteren Trainings durch eine Regularisierung dazu gezwungen wird, einen Kompromiss zwischen dem Neulernen und dem Behalten von früher Gelerntem zu finden. Die mit akademischen Testdatensätzen durchgeführte Studie erzielte vielversprechende Ergebnisse und konnte ebenfalls eine Einsparung von Berechnungszeiten berichten, ohne diese genauer zu Quantifizieren. In einer sich derzeit in der Durchführung befindlichen Studie wird untersucht, inwieweit Regularisierungsmethoden wie LwF geeignet sind, in einem industriellen Einsatzumfeld messbar zu einer Einsparung von Rechen- und Speicherressourcen und damit Kosten beizutragen.

3.4 Szenario 4: Predictive Quality im Spritzguss

Der Einsatz von Continual-Learning-Verfahren in Predictive Quality Anwendungen ermöglicht es, einen Lern-Algorithmus kontinuierlich für neu auftretende Prozessvariationen nutzen zu können [2, 12]. In [13] wird dies für den Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur Prozessauslegung im Spritzguss experimentell untersucht. Im Anwendungsfall ist es das Ziel, ein neuronales Netz zur Regression der Deformation von Kunststoffbauteilen auf Basis verschiedener Maschinenparameter, u. a. von Druck und Zeit, zu trainieren und für Qualitätsvorhersagen zu nutzen. Eine zentrale Herausforderung für das Modelltraining ist, dass sich die Zusammenhänge in den Prozessdaten mit jeder neuen gefertigten Bauteilvariation ändern.

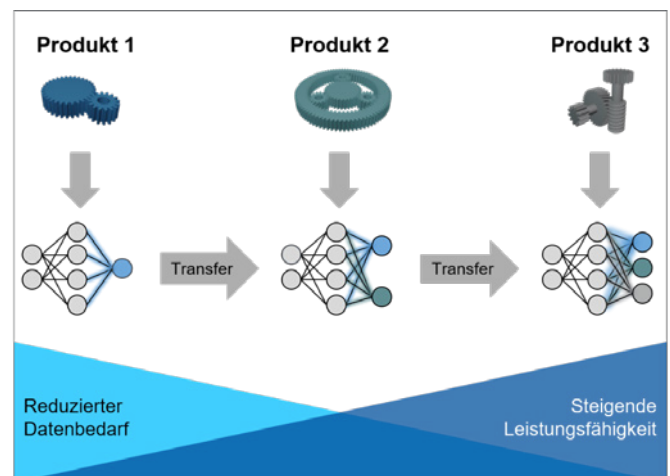


Abbildung 10: Continual Learning eines künstlichen neuronalen Netzes zur Qualitätsabschätzung im Spritzguss.

Als Lösungsvorschlag wird eine Kombination aus Continual Learning (Regularisierungsmethode) und Transfer Learning (Transfer von Netzstrukturen) eingesetzt, mit der es möglich ist, das neuronale Netz über mehrere Bauteilvariationen daten- und ressourceneffizient zu trainieren. Die Untersuchungen zeigen einerseits, dass das Netz beim Erlernen neuer Variationen sein bisheriges Wissen nicht vergisst („Lernen ohne zu Vergessen“). Andererseits sorgt der Wissenstransfer dafür, dass das Training des Netzes mit der Zeit immer dateneffizienter geschieht, sodass hierfür weniger kostspielige Prozessdaten benötigt werden. Die gewonnenen Ergebnisse bestätigen das große Potenzial, neuronale Netze für Qualitätsvorhersagen in der Produktion nachhaltig und effizient über Prozessveränderungen hinweg trainieren zu können (s. Abbildung 10).

4. Insights: Von der Wissenschaft in die Praxis

Auch Industrial Transfer Learning ist aktuell von einem großflächigen Einsatz in der industriellen Praxis weit entfernt. Damit dies nicht so bleibt, sondern die zuvor beschriebenen Potenziale tatsächlich realisiert werden können, sind aus Sicht der Autoren verschiedene Maßnahmen nötig:

In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung wäre eine bessere Vergleichbarkeit der publizierten Ansätze,

beispielsweise durch einheitliche, aber realitätsnahe Benchmark-Datensätze, wünschenswert. Dies würde die Übertragbarkeit von Ergebnissen über die Grenzen einzelner Pilotprojekte hinweg erleichtern. Thematisch besteht darüber hinaus eine Leerstelle im Bereich der Ähnlichkeitsbewertung. Es ist naheliegend, dass Wissenstransfer umso besser funktioniert, umso ähnlicher sich die betrachteten Probleme sind – welche Aspekte hier eine Rolle spielen und wie man diese messen und damit nutzbar machen könnte, ist jedoch bisher nicht näher erforscht worden. Dies scheint auch in den vielfach eher Grundlagen-orientierten Forschungsschwerpunkten begründet zu sein.

Auch auf Seiten der zukünftigen Anwender in der Industrie sind Aufgaben zu erledigen, die man unter dem Oberbegriff der Automatisierung des Industrial Transfer Learning Workflows zusammenfassen kann. Zentral ist die automatische Erkennung einer Prozessveränderung, die ein erneutes Training rechtfertigt – bspw. in Folge von Produktwechsel, Anlagenverschleiß oder wechselnden Umgebungsbedingungen. Dieses Training muss anschließend ähnlich des AutomationML-Ansatzes vollautomatisch ablaufen können und dabei auch die Hyperparameteroptimierung sowie Variation synthetischer Trainingsdaten ohne menschlichen Eingriff umfassen. Und schließlich werden Frameworks und Toolboxes benötigt, die in die bestehenden Unternehmensinfrastrukturen eingebettet werden können und von der Integration neuer Datenquellen über die Modell-Verwaltung bis hin zur Definition neuer vom Lern-Algorithmus

zu lösenden Problemen eine umfassende Unterstützung der Nutzer gewährleisten. Weitere Synergien ließen sich über eine Verknüpfung mit den Konzepten des intelligenten Digitalen Zwillinges [14] oder des intelligenten Rekonfigurationsmanagements [15] realisieren.

5. Fazit

Von einem flächendeckenden Einsatz von KI kann in der industriellen Praxis bisher keine Rede sein. Es fehlt dafür unter anderem an Lösungen zum robusten Umgang mit geringen Datenmengen und hohen Dynamiken. Die beschriebenen Szenarien zeigen hierfür Lösungswege mit Hilfe von Industrial Transfer Learning auf.

Ein Vorteil liegt dabei in der Verzahnung von Simulation und Realität durch *Sim2Real Transfer Learning*, das nachweislich die Robustheit von KI-Agenten steigert und somit Kosten für Experimente in der Realität senkt. Hier zahlt sich aus, dass Simulationen schon lange als zentrale Methode bei der Entwicklung und Entscheidungsunterstützung im Betrieb genutzt werden.

Zu beachten ist, dass der Einsatz von Industrial Transfer Learning mit technischen und organisatorischen Veränderungen einhergehen muss. So müssen bspw. entsprechende Infrastrukturen in Form von dezentralen Speicher- und Rechenkapazitäten geschaffen sowie neuartige Protokolle zum Daten- und Modellaustausch entwickelt werden.

Referenzen

- [1] Deloitte. (2018). *Realising the economic potential of machine-generated, non-personal data in the EU: Report for Vodafone Group*. Abgerufen von: https://www.vodafone.com/content/dam/vodcom/files/public-policy/Realising_the_potential_of_IoT_data_report_for_Vodafone.pdf
- [2] Tercan, H., Guajardo, A., Meisen, T. (2019). Industrial transfer learning: Boosting machine learning in production. In *2019 IEEE 17th international conference on industrial informatics (INDIN)* (Vol. 1, pp. 274-279). IEEE..
- [3] Maschler, B., Tatiyosyan, S., Weyrich, M. (2021). Regularization-based Continual Learning for Fault Prediction in Lithium-Ion Batteries. *arXiv preprint arXiv:2107.03336*.
- [4] Meyes, R., Tercan, H., Roggendorf, S., Thiele, T., Büscher, C., Obdenbusch, M., ... Meisen, T. (2017). Motion planning for industrial robots using reinforcement learning. *Procedia CIRP*, 63, 107-112.
- [5] Scheiderer, C., Mosbach, M., Posada-Moreno, A. F., Meisen, T. (2020). Transfer of Hierarchical Reinforcement Learning Structures for Robotic Manipulation Tasks. In *2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)* (pp. 504-509). IEEE.
- [6] Maschler, B., Weyrich, M. (2021). Deep transfer learning for industrial automation: a review and discussion of new techniques for data-driven machine learning. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(2), 65-75.
- [7] Tobin, J., Fong, R., Ray, A., Schneider, J., Zaremba, W., Abbeel, P. (2017). Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to the real world. In *2017 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)* (pp. 23-30). IEEE.
- [8] Scheiderer, C., Dorndorf, N., Meisen, T. (2021). Effects of Domain Randomization on Simulation-to-Reality Transfer of Reinforcement Learning Policies for Industrial Robots. In *Advances in Artificial Intelligence and Applied Cognitive Computing* (pp. 157-169). Springer, Cham.
- [9] Maschler, B., Vietz, H., Jazdi, N., Weyrich, M. (2020). Continual learning of fault prediction for turbofan engines using deep learning with elastic weight consolidation. In *2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)* (Vol. 1, pp. 959-966). IEEE.
- [10] Maschler, B., Knodel, T., Weyrich, M. (2021). Towards deep industrial transfer learning for anomaly detection on time series data. In *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 01-08). IEEE.
- [11] Li, Z., Hoiem, D. (2017). Learning without forgetting. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(12), 2935-2947.
- [12] Tercan, H., Guajardo, A., Heinisch, J., Thiele, T., Hopmann, C., Meisen, T. (2018). Transfer-learning: Bridging the gap between real and simulation data for machine learning in injection molding. *Procedia Cirp*, 72, 185-190.
- [13] Tercan, H., Deibert, P., Meisen, T. (2022). Continual learning of neural networks for quality prediction in production using memory aware synapses and weight transfer. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(1), 283-292.
- [14] Maschler, B., Braun, D., Jazdi, N., Weyrich, M. (2021). Transfer learning as an enabler of the intelligent digital twin. *Procedia CIRP*, 100, 127-132.
- [15] Maschler, B., Müller, T., Löcklin, A., Weyrich, M. (2021). Transfer Learning as an Enhancement for Reconfiguration Management of Cyber-Physical Production Systems. *arXiv preprint arXiv:2105.14730*.

Benjamin Maschler, M.Sc. (geb. 1990) studierte Erneuerbare Energien und Nachhaltige Elektrische Energieversorgung in Stuttgart und Kapstadt. Anschließend war er von 2017 bis 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme der Universität Stuttgart. Im Rahmen seiner Promotion entwickelte er eine Architektur für industrielles Transfer-Lernen. Aktuell arbeitet er bei Trumpf SE & Co KG an der Entwicklung und Einführung automatisierter Systemtests.

Kontakt

Universität Stuttgart
Institut für Automatisierungstechnik und
Softwaresysteme (IAS)
Pfaffenwaldring 47, Raum 1.115
70550 Stuttgart
☎ +49 711 685 67295
✉ hannes.vietz@ias.uni-stuttgart.de

Hasan Tercan, M.Sc. (geb. 1988) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technologien und Management der digitalen Transformation und Leiter der Forschungsgruppe „Industrial Deep Learning“. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit der Entwicklung und Umsetzung von Verfahren des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz in realweltlichen Domänen wie Produktion und Automotive.

Christian Bitter, M.Sc. (geb. 1993) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technologien und Management der digitalen Transformation der Bergischen Universität Wuppertal. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit dem dateneffizienten Erlernen von Handlungsstrategien durch

die Kombination von Verfahren aus den Themengebieten Reinforcement Learning und Transfer Learning.

Hannes Vietz, M.Sc. (geb. 1994) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme der Universität Stuttgart. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit dem synthetisieren von Trainingsdaten und dem Einsatz von Transfer Learning zur Senkung des Datenbedarfs von Methoden des maschinellen Lernens.

Prof. Dr.-Ing. Tobias Meisen (geb. 1981) ist Professor für „Technologien und Management der digitalen Transformation“ an der Bergischen Universität Wuppertal. Er ist außerdem Institutsleiter des In-Instituts für Systemforschung in der Informations-, Kommunikations- und Medientechnik (SIKOM) und stellvertretender Vorsitzender des Interdisziplinären Zentrums für Datenanalyse und Maschinelles Lernen (IZMD). Zuvor war er Juniorprofessor und Geschäftsführer des Lehrstuhls für Informationsmanagement im Maschinenbau an der RWTH Aachen.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Michael Weyrich (geb. 1967) ist Leiter des Instituts für Automatisierungstechnik und Softwaresysteme (IAS) der Universität Stuttgart. Zuvor war bereits Univ.-Professor in NRW, sowie wiss. Direktor am Automotive Center Südwestfalen sowie dem Zentrum für Sensortechnik. Er hat 10 Jahre Industrieerfahrung bei Mercedes-Benz und Siemens Seine Hauptforschungsgebiete sind Methoden und Tools zur Komplexitätsreduktion von Software in der Automatisierungstechnik. Außerdem ist er der Vorsitzende der VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik und Mitglied im Präsidium des VDE.

Inserentenverzeichnis

aaa all about automation Fachmesse für Industrieautomation 2022, Chemnitz	9
Beckhoff Automation GmbH & Co.KG, Verl	4. Umschlagseite
MEORGA MSR-Spezialmesse Wirtschaftsregion Südwest 2022, Ludwigshafen	3
Pepperl+Fuchs SE, Mannheim	7
Automation Guide	95

Teilbeilage

MEORGA GmbH MSR-Spezialmessen Prozess- und Fabrikautomation,
Nalbach

Das nächste atp magazin
erscheint am 16.09.2022

Hauptbeiträge zu den Themen:

IT-/OT-Security
Cybersecurity
Firewall-, Dioden- und andere Barrierenkonzepte
Verification of Request (VoR) in der Automatisierung

www.atpinfo.de +++ www.atpinfo.de +++ www.atpinfo.de

Impressum

Verlag:

Vulkan-Verlag GmbH
Friedrich-Ebert-Str. 55
45127 Essen
Telefon +49 201 820 02-0
Fax +49 201 820 02-40
Internet: www.vulkan-verlag.de

Geschäftsführer: Jürgen Franke

Spartenleiter: Simon Meyer

Herausgeber:

Dr. Dr. h.c. Attila M. Bilgic, Dr. Felix Hanisch, Dr. Gunther Kegel, Dr.-Ing. Jörn
Oprzynski, Dr.-Ing. Thomas Steckenreiter, Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich

Beirat:

Prof. Dr. Julia Ahrlinghaus, Dr.-Ing. Kurt D. Bettenhausen, Prof. Dr.-Ing. Christian
Diedrich, Dr.-Ing. Dagmar Dirzus, Dr. Heinrich Engelhardt, Prof. Dr.-Ing. Alexander
Fay, Prof. Dr.-Ing. Georg Frey, Christian Gülpen, Dr.-Ing. Thomas Hauff, Tim-Peter
Henrichs, Dr.-Ing. Thomas Holm, Dr.-Ing. Alexander Horch, Prof. Dr.-Ing. Jens
Jäkel, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jasperneite, Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert, Nikolaus
Krüger, Dipl.-Ing. Hartmut Manske, Dipl.-Ing. Gerald Mayr, Dr. Jörg Neidig, Dr.
Wilhelm Otten, Dr.-Ing. Josef Papenfort, Michael Pelz, Prof. Dr.-Ing. Martin
Ruskowski, Dipl.-Ing. Thomas Scherwies, Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller, Dr. Marco
Ulrich, Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Organschaft:

Organ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und der
NAMUR (Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie).

Chefredakteur Science

Prof. Dr.-Ing. Mike Barth
Telefon + 49 7231 28-6475
E-Mail: mike.barth@hs-pforzheim.de

Chefredakteur Industry

Dr. Thomas Tauchnitz
Telefon + 49 172 6974259
E-Mail: atp@tautomation.consulting

Redaktion:

Simon Meyer (verantwortlich)
Telefon + 49 201 820 02-32
E-Mail: s.meyer@vulkan-verlag.de

Jonas Völker

Telefon + 49 201 820 02-50
E-Mail: j.voelker@vulkan-verlag.de

Klaudia Mazur

Telefon + 49 201 820 02-75
E-Mail: k.mazur@vulkan-verlag.de

Verantwortlich für den Anzeigenteil:

Andreas Sicking
Telefon: +49 2903-3385-70
E-Mail: a.sicking@vulkan-verlag.de

Es gelten die Preise der Mediadata 2022

Anzeigenverwaltung:

Martina Mittermayer
Telefon +49 201 820 02-60
E-Mail: m.mittermayer@vulkan-verlag.de

Satz:

Daniel Klunkert, Cornelia Langaso, Vulkan-Verlag GmbH
Sylvia Kierdorf, agentur emscherpuls

Bezugsbedingungen:

atp magazin erscheint monatlich mit Doppelausgaben im
Januar/Februar, Juni/Juli und November/Dezember.

Bezugspreise:

Der Jahres-Abonnementpreis beinhaltet den Bezug des gedruckten Hefts sowie
eine Einzellizenz für das ePaper und das Online-Archiv der Jahrgänge seit 2008.

Abonnement: 595 €

Einzelausgabe (Heft): 62 €

Einzelausgabe (ePaper): 59 €

Die Preise enthalten bei Lieferung in EU-Staaten die Mehrwertsteuer, für das
übrige Ausland sind sie Nettopreise. Bestellungen sind jederzeit beim Leserservice
oder bei Buchhandlungen im In- und Ausland möglich. Bei Neubestellungen
gelten die zum Zeitpunkt des Bestelleingangs gültigen Bezugspreise. Die
Abonnementgebühren werden im Voraus in Rechnung gestellt oder bei Teilnahme
am Lastschriftverfahren bei den Kreditinstituten abgebucht. Bitte teilen Sie
Änderungen von Adressen oder Empfängern bis spätestens sechs Wochen vor
Gültigkeit dem Leserservice mit.

Abonnement-/Einzelheftbestellung:

Leserservice atp
Friedrich-Ebert-Straße 55
45127 Essen
Telefon: +49 201 82 002-26
Telefax: +49 201 82 002-40
leserservice@vulkan-verlag.de

Druck:

AC medienhaus GmbH, Ostring 13, 65205 Wiesbaden-Nordenstadt

Die atp wurde 1959 als „Regelungstechnische Praxis – rtp“ gegründet.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind
urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist
eine Verwertung ohne Einwilligung des Verlages strafbar.

ISSN : 2190-4111

eISSN : 2364-3137

Bildhinweise:

Titel: Nikola Bilic – stock-adobe.com,
Vera Kuttelvaserova – stock-adobe.com
Seite 2: ra2 studio – stock-adobe.com, chesky – stock-adobe.com
Seite 8: Jan Bürgermeister/VDI Wissensforum GmbH
Zahlen/Fakten: Man As Thep – stock-adobe.com, anatolir – stock-adobe.com
Aufmacher: Nikola Bilic – stock-adobe.com,
Vera Kuttelvaserova – stock-adobe.com
Seite 20: Photocreo Bednarek – stock-adobe.com
Seite 28: Harald Schnauder
Seite 40: sikov – stock-adobe.com

AKTORIK

Stellantriebe, Ventile, Klappen

**SAMSON AKTIENGESELLSCHAFT**

Weismüllerstraße 3
60314 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel.: +49 69 4009-0
Fax: +49 69 4009-1507
E-Mail: samson@samsongroup.com
Internet: www.samsongroup.com

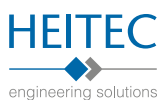
DATENBASIERTE SERVICES

Industrie 4.0

**SAMSON AKTIENGESELLSCHAFT**

Weismüllerstraße 3
60314 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel.: +49 69 4009-0
Fax: +49 69 4009-1507
E-Mail: samson@samsongroup.com
Internet: www.samsongroup.com

Simulation (Digital Twin),
Industrie 4.0

**HEITEC AG**

Güterbahnhofstraße 5
91052 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 9131 877 0
Fax.: +49 9131 877 199
E-Mail: info@heitec.de
Internet: www.heitec.de/de/start

MESSTECHNIK/SENSORIK**Pepperl+Fuchs SE**

Lilienthalstraße 200
68307 Mannheim
Deutschland
Tel.: +49 621 776- 0
Fax: +49 621 776- 1000
E-Mail: info@de.pepperl-fuchs.com
Internet: www.pepperl-fuchs.com

Radar, Füllstand, Druck,
Grenzstand

**VEGA Grieshaber KG**

Am Hohenstein 113
77761 Schiltach
Deutschland
Tel.: +49 7836 50- 0
FAX: +49 7836 50- 201
E-Mail: info.de@vega.com
Internet: www.vega.com

NOA & MTP**WAGO Kontakttechnik GmbH
(nach Schweizer Recht) & Co. KG**

Hansastraße 27
32423 Minden
Telefon: +49 571 887 – 0
Fax: +49 571 887- 844169
E-Mail: info.de@wago.com
Internet: www.wago.com

LEITSYSTEMTECHNIK

Engineering, Inbetriebnahme

**HEITEC AG**

Güterbahnhofstraße 5
91052 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 9131 877 0
Fax.: +49 9131 877 199
E-Mail: info@heitec.de
Internet: www.heitec.de/de/start

SAFETY & SECURITY**infoteam Software AG**

Am Bauhof 9
91088 Bubenreuth
Deutschland
Tel.: +49 9131 78 00-0
Telefax: +49 9131 78 00-50
E-Mail: info@infoteam.de
Internet: www.infoteam.de

Safety & Security
IoT & IIOT

**Klippon Engineering UK Ltd. – A
Weidmüller brand**

Centurion Court Office Park Meridian
East Meridian Business Park
LE19 1TP Leicester, GB
Telefon: +49 5231 1428 615
E-Mail: klippon-engineering@weidmu-
eller.com
Internet: www.klippon-engineering.
com/en/

Alle Firmeneinträge finden Sie auch online im Automation Guide auf www.atpinfo.de/Markt

Weitere Informationen zu unserem Automation Guide und anderen Formaten erhalten Sie bei **Andreas Sicking, Tel. +49 2903-3385-70, a.sicking@vulkan-verlag.de**

Gerne erstellen wir Ihnen auch ein individuelles Angebot.

Dr. Gunther Kegel, ZVEI-Präsident und CEO der Pepperl+Fuchs SE, macht deutlich, warum der Digital Twin und die Verwaltungsschale für die Elektrifizierung der Industrie so wichtig sind:

Wir müssen erneuerbare Energie effizienter nutzen!

Gerade der Krieg in der Ukraine und der Versuch Putins, Gaslieferungen als Druckmittel einzusetzen, zeigt noch einmal deutlich: Deutschland und viele andere Länder Europas müssen schneller als bisher geplant aus fossilen Energieträgern aussteigen und auf erneuerbare, elektrische Energiequellen umstellen.

Die Herausforderungen für Deutschland und viele andere europäischen Länder, die einen großen Teil der Energie in fossiler Form importieren, lautet also: In 2045 mit deutlich weniger Energie auszukommen ohne dabei zu Deindustrialisieren und/oder eine stark schrumpfende Wirtschaftsleistung akzeptieren zu müssen. Wir müssen also unsere erneuerbaren Energien deutlich effizienter verwenden. Der Weg zur Energieeffizienz ist die konsequente Elektrifizierung und Digitalisierung aller Wirtschaftssektoren – die *All Electric Society*!

In der Industrie führt die konsequente Elektrifizierung und Digitalisierung zu großen Effizienzgewinnen. Können wir beispielsweise unterschiedliche Sektoren, die Energie gewinnen oder verbrauchen, koppeln, lassen sich Energiebedarf und Angebot, präzise und dynamisch aufeinander abgleichen. Dieser Abgleich reduziert z. B. die Anforderungen an die Spitzenlastfähigkeit der Netze signifikant. Für die Kopplung aller Sektoren ist Elektrifizierung und Digitalisierung dabei die grundlegende Voraussetzung.

Dabei muss diese Digitalisierung der Referenzarchitektur RAMI 4.0 folgen und die genormte Verwaltungsschale, der Digitale Zwilling, stellt statische, azyklisch-dynamische und zyklisch-dynamische Daten aus dem Bereich der Komponenten,

Systeme, Maschinen und Anlagen (Shopfloor) bereit, auf die datengetriebene Geschäftsmodelle bzw. Applikation aus dem Officefloor zugreifen können, ohne jedes Mal die notwendige Digitalisierung des Shopfloors partikulär und proprietär mit aufzubauen. Die neuen Applikationen können ohne Einschränkung auf die Gesamtheit aller genormten Digitalen Zwillinge zugreifen. Aus dem Shopfloor entsteht ein offenes, genormtes *Industrial Metaverse*.

Ohne diese konsequente Digitalisierung des Shopfloors sind viele Applikationen bis hin zu neuen datengetriebenen Geschäftsmodellen nicht möglich und große Energieeffizienzpotenziale könnten so nicht gehoben werden. Der Schwerpunkt der Arbeit muss jetzt der Aufbau der Digitalen Zwillinge und die Formulierung der verschiedenen Teilmodelle der Verwaltungsschale und deren Normung und Standardisierung sein.

Viel Arbeit – packen wir's an!

ZUR PERSON

Dr. Gunther Kegel

Seine berufliche Laufbahn begann Dr. Gunther Kegel nach dem Studium der Elektrotechnik und Promotion an der TU Darmstadt bei der Pepperl+Fuchs SE in Mannheim und ist heute Vorstandsvorsitzender. Er ist darüber hinaus Präsidiumsmitglied des VDE und Mitglied in verschiedenen Aufsichtsratsgremien und Beiräten. Er ist Vorsitzender des Ausstellerbeirats der HANNOVER MESSE sowie Mitherausgeber des *atp* magazins. Im Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) ist er seit 1998 Mitglied des Gesamtvorstandes und seit Oktober 2020 ZVEI-Präsident.





ecoMetals Day
Pioneers of Sustainability



SAVE THE DATE
21.09.2022 | Messe Düsseldorf
ecoMetals Day

UNBEDINGT VORMERKEN
Der nachhaltigste Termin in diesem Jahr!

DIE INTERNATIONALE KONFERENZ ZUR GRÜNEN TRANSFORMATION



GREEN ENERGY

Die Stahlproduktion wird elektrisch? Ja! Richtig ist: Stahl und Metalle werden künftig mit erneuerbarer Energie produziert. Wir präsentieren, wie die Branche die Energiewende konkret umsetzt.



GREEN METALS

Produce clean, act circular, transform to Green. Lassen Sie sich inspirieren von nachhaltigen Best-in-class-Lösungen entlang der metallurgischen Wertschöpfungskette.



GREEN STEEL

Der Weg zu grünem Stahl ist noch weit. Die Pioniere der Branche zeigen Ihre Dekarbonisierungspläne. Von thyssenkrupp über Salzgitter und SHS bis zu ArcelorMittal, voestalpine und Tata Steel.



GREEN TRANSFORMATION

Reduce, reuse, recycle! Der Umstieg auf erneuerbare Energien ist zugleich auch der Einstieg in die Circular Economy. Doch der gelingt nur mit einem radikal neuen Wertschöpfungsansatz.



GREEN AUTOMATION

Die Digitalisierung ist der Booster der Dekarbonisierung. Wir demonstrieren wie Digitalisierung bestmöglich als Enabler für die grüne Transformation eingesetzt wird.



HYDROGEN

All you need is Wasserstoff! Führende Gasexperten erläutern, in welchen Etappen H₂ als grünes Gas via Direktreduktion die Branche zur vollständigen Dekarbonisierung führen wird.

CLOSING THE LOOP OF METAL CIRCULARITY

300+ TEILNEHMER



Messe Düsseldorf,
Kongressbereich (CCD Ost)

stahl-punkt.de/ecometals

WEIL ES EINE NEUE NACHHALTIGE WERTSCHÖPFUNGS-DENKE BRAUCHT

VERANSTALTER



PARTNER



Das Steuerungssystem für die Prozessautomatisierung: PC-based Control



Vollumfängliche Automatisierung aller Prozesse und Anlagen

- Integration aller Steuerungsfunktionen auf einer Hard- und Softwareplattform
- Steuerungs- und Kabelredundanz erhöht die Anlagenverfügbarkeit
- umfangreiches Portfolio an Komponenten für den Explosionsschutz
- EtherCAT-Module mit eigensicheren Schnittstellen für den direkten Anschluss von Feldgeräten bis aus Zone 0/20
- Unterstützung branchentypischer Standards wie NAMUR, HART und FDT/DTM
- nahtlose Einbindung von MATLAB®/Simulink® und Labview in TwinCAT
- TwinCAT MTP zur Modularisierung von Anlagen

ACHEMA
2022

Halle 11.1, Stand C53



Scannen und
alles über PC-based
Control für die
Prozessindustrie
erfahren

New Automation Technology

BECKHOFF