



Begreifen, verstehen, gestalten – Potenziale und Anwendungsbereiche für die digitale Transformation

Demonstratoren im Industrie 4.0-Kontext

L. Dörr, S. J. Oks, J. Trezl, T. Reichenstein, S. G. Kousta, C. Lehmann

ZUSAMMENFASSUNG Industrie 4.0 bringt neben vielen Potenzialen auch eine erhebliche Komplexitätssteigerung mit sich. Um dieser effektiv zu begegnen, bieten Demonstratoren einen wertstiftenden Beitrag. Ihr Einsatz ermöglicht eine nutzerzentrierte Systementwicklung mit einhergehender Komplexitätsreduktion durch Modellierung und Simulation. Dieser Beitrag untersucht ihre Potenziale am Beispiel des Projektes „ConSensE“ mit Fokus auf Sensor technologien und deren Nachrüstung.

STICHWÖRTER

Mensch und Technik, Produktionsarbeit, Sensoren

Demonstrators in the context of Industry 4.0

ABSTRACT Industry 4.0 provides not only a large number of potentials, but also a considerable increase in complexity. Demonstrators offer a value-adding contribution to counter this effectively. Their utilization enables user-centered system development with an accompanying reduction in complexity through modeling and simulation. This article examines their potential in the case of the ConSensE project with a focus on sensor technologies and retrofitting.

1 Einleitung

Die im Kontext von Industrie 4.0 angestoßene digitale Transformation industrieller Wertschöpfung verändert die nationale sowie internationale Unternehmenslandschaft seit über einer Dekade immens [1, 2]. Indikatoren dafür sind der umfassende Einsatz digitaler Technologien und Systeme, der sowohl inner- als auch interbetrieblich gesteigerte Vernetzungsgrad sowie die sich daraus ergebende Komplexitätssteigerung in Fertigungsprozessen unter der Prämisse einer hybriden Wertschöpfungslogik. Diese bildet die Grundlage für umfassende Nutzenoptimierungen und Angebotserweiterungen. Konsumenten profitieren, zum Beispiel in Form von smarten Produkt-Service-Systemen (sPSS), aber auch von betriebs- und volkswirtschaftlichen Optimierungen durch unter anderem Geschäftsmodellinnovationen und ressourcenschonendere und nachhaltigere Produktionsverfahren [3]. Diese Potenziale und die damit einhergehenden Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen können allerdings nur dann umfänglich realisiert und ausgeschöpft werden, wenn die facettenreiche Komplexitätssteigerung – ausgelöst durch die Digitalisierung – lösungsorientiert adressiert wird. [4] haben die Teilbereiche der gesteigerten Komplexität nachfolgend aufgeschlüsselt: (1) Zunächst erhöht sich die allgemeine Anzahl der Systemkomponen-

ten signifikant und auch Systemgrenzen diffundieren zusehends, da vormals autarke Systeme ad hoc zu Systemen von Systemen (SoS) miteinander kombiniert werden. (2) Darüber hinaus wandeln sich lineare Wertschöpfungsprozesse und -ketten zu holistischen Wertschöpfungsnetzwerken in digitalen Ökosystemen. (3) Auch sind an industriellen Wertschöpfungsprozessen wesentlich mehr Stakeholder-Gruppen beteiligt, die mitunter konträre Erwartungshaltungen und Einstellungen zur vierten industriellen Revolution vertreten. (4) Schließlich fällt auch die zeitliche Komponente ins Gewicht, da sich Produktentwicklungs- und -lebenszyklen weiter verkürzen und die Steuerung und Überwachung von Produktionsprozessen hochgradig echtzeitrelevant wird. Diese Veränderungen wirken sich auf Unternehmen sowie deren Ökosystem weitgreifend aus und fordern Veränderungen in Bezug auf Geschäftsprozesse, Arbeitsgestaltung und Kompetenzanforderungen. Neben dem Technologie- und Komplexitätsmanagement ist es für traditionell produktorientierte Unternehmen darüber hinaus eine hochrelevante Aufgabe, sich umfassend gegenüber dem Dienstleistungsgeschäft zu öffnen, da die Entwicklung datengetriebener Services erhebliche Potenziale für Wertschöpfungs- und Dienstleistungsinnovationen bietet [5].

Die gesteigerte Komplexität und Dynamik stellen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) mit ihren limitierten

finanziellen und personellen Ressourcen vor große Herausforderungen. Da KMU im Gegensatz zu Großkonzernen meist nicht über Stellen oder Abteilungen verfügen, die sich singulär mit der digitalen Transformation befassen, müssen sie ihre Ressourcen zwischen dem Tagesgeschäft und der strategischen Weiterentwicklung balancieren. Da jedoch 99 % aller Unternehmen der deutschen Volkswirtschaft KMU sind und diese 43 % der Bruttowertschöpfung erwirtschaften [6], ist ein langfristiger und nachhaltiger wirtschaftlicher Erfolg ohne die systematische Digitalisierung dieses Unternehmenssegmentes nicht möglich. Bei der Entwicklung und Umsetzung einer Digitalisierungsstrategie sowie der Orchestrionierung des Werteverspredens von Dienstleistungen stellen die Anzahl, der Umfang und die Heterogenität der Technologien sowie ihr domänenübergreifender Charakter weitere Herausforderungen für KMU dar [7]. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Nachrüstung von Sensorik zur Erfassung von Zustandsdaten an bestehenden Maschinen und Anlagen zu (Retrofitting). Diese kann den Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen aufwandsreduziert und kosteneffizient verlängern. Jedoch erschweren die Vielfalt der marktverfügbarer Sensoren, die Präzisionsanforderungen an die zu generierenden Daten sowie die mangelnde Interoperabilität der Technologien und Infrastrukturen die Umsetzung dieser Bestrebungen [8, 9].

Exakt dieser Problemstellung widmet sich das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt ConSensE im Rahmen des Förderprogramms „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“. Neben der übergeordneten Zielstellung der Entwicklung einer umfassenden Sensordatenbank, um die Auswahl geeigneter Sensorik künstliche Intelligenz (KI)-gestützt für KMU zu erleichtern, entstanden in dem Projekt drei Demonstratoren mit unterschiedlichen Anwendungszwecken, die insbesondere Stakeholder- und nutzerzentrierte Gestaltungsprozesse von sensorikgestützten Industrie 4.0-Lösungen fokussieren und ermöglichen. Auf diesem Weg soll die gesteigerte Anzahl an involvierten und betroffenen Stakeholdern industrieller Wertschöpfungsprozesse adressiert werden, um Systeme so zu gestalten, dass über deren gesamten Entwicklungsprozess Repräsentanten dieser Stakeholder involviert werden können, um deren Partizipation und Mitbestimmung an der digitalen Transformation industrieller Wertschöpfung sicherzustellen. Daraus resultierend können höhere nutzerseitige Akzeptanz- und Adoptionsraten der Systeme erwartet und das Risiko der Technologieverweigerung verringert werden [10].

Dieser Fachartikel bietet einen wissenschaftlichen Beitrag zum Themenkomplex des Demonstratoreneinsatzes im Industrie 4.0-Kontext, wobei er insbesondere konkrete, praxisrelevante Implikationen für Entscheidungsträger in KMU formuliert. Er ist zu diesem Zweck folgendermaßen gegliedert: Nach der anschließenden Einführung in die Konzepte von Modellen, Simulationen und Demonstratoren wird in Unterkapitel 3 die Referenzarchitektur nach [11, 12] vorgestellt, unter deren Anwendung die drei Demonstratoren des ConSensE-Projektes entwickelt wurden. Daraufhin werden diese Demonstratoren mit ihren Zielstellungen, Konfigurationen und Anwendungsszenarien dargelegt. Unterkapitel 5 stellt die entstandenen Demonstratoren ins Verhältnis zu bereits bestehenden Lösungen, verortet sie im Bezug zu weiteren Konzepten und beschreibt ihre Kombinierbarkeit. Die anwendungsfokussierte Diskussion leitet dabei unter

anderem konkrete Handlungsempfehlungen für die mittelständische Praxis ab. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick.

2 Modellierung, Simulation und Demonstratoren – eine konzeptionelle Einführung

Um die Interaktion von verschiedenen Stakeholdergruppen mit digitalen Technologien in unterschiedlichen Konfigurationen zu ermöglichen und um deren Funktionalitäten umfänglich zu vermitteln, sind die Konzepte der Modellierung und Simulation mittels eines Demonstrators ein probates Mittel. Modelle sind dabei abstrahierte Darstellungen von Originalen in vereinfachter Form, wobei verschiedene Vereinfachungstechniken wie die Abbildung in einer anderen Darstellungsform, das Auslassen irrelevanter Merkmale und die Dekomposition/Aggregation verwendet werden können [13]. Die Nutzung von Modellen bietet Potenziale zur Komplexitätsreduktion und ermöglicht eine umfassende Auseinandersetzung mit der originären Entität, insbesondere wenn nur wenige Exemplare dieser existieren oder die Kosten für den Betrieb außerhalb des eigentlichen Nutzungsszenarios nicht gerechtfertigt sind. Modelle sind auch für den Entwicklungsprozess zukünftiger Entitäten von großer Bedeutung, da sie Kreativität kanalisieren, Ideen instanziieren und die Leistungsfähigkeit des späteren Originals ermitteln, bewerten und optimieren können. Sie können dabei die Form von Prototypen einnehmen [14].

Während es sich bei einem Modell per se um eine statische Repräsentation einer originären Entität handelt, wird dessen Einsatz als Simulation bezeichnet. Die Ziele, die damit verfolgt werden, sind vielfältig. Sie umfassen die Gewinnung von Erkenntnissen über Eigenschaften, Verhalten und Kohärenz des Originals sowie die Erfassung oder Beeinflussung der Nutzerperspektive und -wahrnehmung. Simulationen können physisch oder virtuell stattfinden und in funktions- und nutzerzentrierte Anwendungen unterteilt werden [14]. Funktionszentrierte Simulationen dienen der Datengenerierung, technischen Bewertung und Verifizierung, während nutzerzentrierte Simulationen das menschliche Interaktionsverhalten fokussieren. Nutzerzentrierte Simulationen können wiederum in ihrer Zielstellung in analytisch/explorativ – um Erkenntnisse zu gewinnen, die sich auf das Nutzerverhalten mit der Entität und die Einstellung zu ihr beziehen – und integrativ/manipulativ – um das Verhalten und die Einstellung des Nutzers aktiv zu steuern – unterschieden werden. Somit können Entitäten und ihre Funktionalitäten erklärt und in einen Gesamtzusammenhang eingeordnet werden. Darüber hinaus können diese Simulationen dazu eingesetzt werden, um Nutzer aktiv in Entwicklungsprozesse einzubinden. Dabei können Open Innovation und Co-Kreationsmethoden eingesetzt werden, um Ideen von der Nutzerseite zu generieren oder um Evaluationen, auch hinsichtlich der wahrgenommenen Nützlichkeit, durchzuführen. Schließlich können Simulationen auch eingesetzt werden, um Personal zu schulen und zu qualifizieren, bevor es die originäre Einheit bedient und nutzt [15].

Modelle, an denen nutzerzentrierte Simulationen zu integrativen/manipulativen Zwecken durchgeführt werden, sind Demonstratoren. Dabei können sie Entitäten und Prozesse sowohl statisch als auch dynamisch repräsentieren und damit veranschaulichen [16]. Der Einsatz von Demonstratoren ermöglicht verschiedene Formen der Interaktion. Zum einen in einer eindimensionalen Interaktion zwischen dem Demonstrator und einer Person,

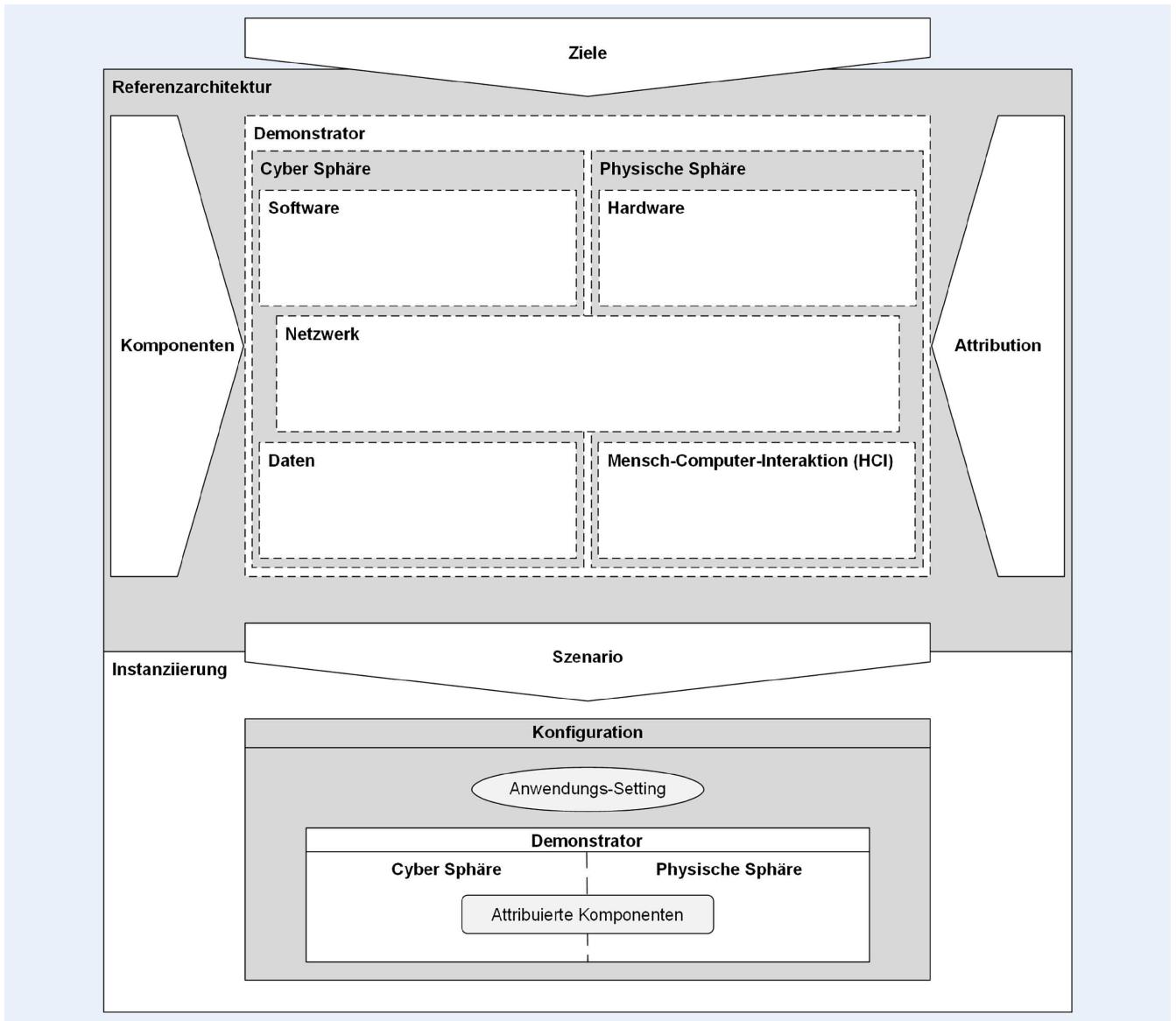


Bild 1. Konzeptionelle Struktur der Referenzarchitektur. Grafik: In Anlehnung an [11]

zum anderen in einer mehrdimensionalen Interaktion zwischen dem Demonstrator und mehreren Personen sowie zwischen diesen Personen untereinander. Typische Formen der eindimensionalen Interaktion sind Selbstlernkurse oder Schulungen, in denen Verfahren individuell erlernt werden. Mehrdimensionale Interaktionen liegen vor, wenn ein Demonstrator als Medium für den Wissenstransfer zwischen Ausbildern und Auszubildenden eingesetzt wird. Eine besondere Form der mehrdimensionalen Interaktion liegt vor, wenn ein Demonstrator eingesetzt wird, um die Interaktion heterogener Stakeholder-Gruppen zu ermöglichen. Der Demonstrator dient dann als sogenanntes Grenzobjekt, welches eine zentrale Referenz für die Benutzerinteraktion mit dem simulierten System ist, aber auch für die Interaktionen untereinander genutzt wird. Der Demonstrator schafft somit einen Interaktionsraum durch Grenzüberbrückung, da er die fixen Identifikationsmerkmale der modellierten und simulierten Entität aufweist, die für alle Gruppen homogen sind, aber variabel genug ist, um den Austausch heterogener Interpretationen zu erlauben. Demonstratoren können dadurch zur Steuerung der Akzeptanz neuer Tech-

nologien seitens der Nutzer eingesetzt werden [17]. Aufgrund dieser Merkmale und des Funktionsumfangs bietet die modell- und simulationsgestützte Anwendung von Demonstratoren insbesondere für die nutzerzentrierte Entwicklung von Industrie 4.0-Systemen große Potenziale, was auch bereits etablierte Konzepte, wie das Advanced Systems Engineering (ASE) Mobile Plug-In Labor [18], die Discover Industry Mobile Erlebniswelt [19] oder die Experimentier- und Digitalfabrik [20] belegen.

3 Demonstratoren systematisch gestalten – eine Referenzarchitektur

Um ein strukturiertes und systematisches Vorgehen für die Planung, Konstruktion und Anwendung der Demonstratoren im Rahmen des Projektes ConSensE sicherzustellen, wurde die Referenzarchitektur zur Demonstratorenentwicklung nach [11, 12] angewandt. Die konzeptionelle Struktur der im folgenden beschriebenen Referenzarchitektur ist in Bild 1 gegeben. Mittels der Referenzarchitektur wird sichergestellt, dass zum einen ein

möglichst großer Lösungsraum im Rahmen der Demonstratoren-gestaltung genutzt werden kann und zum anderen, dass dieser dabei aber so strukturiert ist, dass der Gestaltungsprozess systematisch und angeleitet durchgeführt werden kann. Dies bedeutet, dass die Auswahl der Komponenten und deren Attribution in der übergreifenden Konfiguration mit den Zielen und den Szenarien der Demonstratorenanwendung korrespondieren. In dieser Arbeit ergeben sich daraus die Instanziierungen der drei ConSensE-Demonstratoren (Bild 2–4). Eine Vergleichbarkeit der Anwendungsfälle ist damit gegeben.

Diese genutzte Referenzarchitektur basiert auf dem Konzept der cyber-physicalen Modellierung und Simulation (CPMS) und wurde insbesondere im Bereich der Gestaltung von Demonstratoren zur Veranschaulichung von industriellen cyber-physicalen Systemen (CPS) etabliert [21]. Im Kern bietet die Referenzarchitektur einen Gestaltungsraum, der sich in zwei Sphären unterteilt: Die cyber Sphäre vereint alle digitalen Komponenten, wie Software und Datenbanken, die physische Sphäre umfasst die Hardware sowie die Mensch-Computer-Interaktion des Demonstrators. Die Verbindung und Interaktion beider Sphären wird durch das überschneidende Gestaltungsfeld der Netzwerktechnologien sichergestellt, welches den andauenden Informationsaustausch zwischen digitalen und physischen Demonstratorenkomponenten regelt. Die Auswahl der im jeweiligen Demonstrator zu verbauenden Komponenten (Bild 1, Pfeil links) und deren Attribution (Bild 1, Pfeil rechts), wie Skalierbarkeit oder Modularität, ist in erster Linie abhängig von den anvisierten Zielen des Demonstratoreneinsatzes. Zielstellungen können unter anderem die nutzerzentrierte Systemgestaltung, die Mitarbeiterqualifizierung oder die Geschäftsmodellentwicklung sein. Entsprechend der jeweiligen Ziele der Demonstratoren werden geeignete Hardware- und Software-Module ausgewählt und attribuiert. Die Attribution der Komponenten erfolgt dabei in verschiedenen Kategorien und bestimmt die exakte Ausgestaltung der Module sowie des Gesamt-demonstrators. Auf stufenlosen Skalen können die Repräsentation (idealisiert-konkret), Komplexität (reduziert-volumfähig) und Skalierung (verkleinert-komplett) des Demonstrators im Vergleich zu dessen Original, das er modelliert und simuliert, festgelegt werden. Weitere Attributionsentscheidungen erfolgen bezüglich der Modularität, der horizontalen und vertikalen Integration, der Portabilität und der Konnektivität. Abschließend werden die Szenarien zum Demonstratoreneinsatz ausgearbeitet. Ein Szenario ist dabei immer durch das Setting bestehend aus dem Anwendungsfall und der verwendeten Methode (zum Beispiel Workshop, Rollenspiel, Präsentation) sowie den Nutzern, die sich wiederum in das Personal zur Demonstratorensteuerung und die Repräsentanten der Stakeholder-Gruppen aufteilen, gegeben. Somit kann zusammenfassend festgehalten werden, dass sich die konkrete Instanzierung eines Demonstrators immer aus der Konfiguration der Auswahl und Attribution der digitalen und physischen Komponenten im Einklang mit den Zielstellungen und den dafür geeigneten Szenarien ergibt.

4 Demonstratorenkonfigurationen im Projekt ConSensE

Um dem zuvor beschriebenen Komplexitätsanstieg und den weiteren Herausforderungen, die mit der digitalen Transformation industrieller Wertschöpfung einhergehen, zu begegnen, stellt der Einsatz von Demonstratoren ein probates und erprobtes Mit-

tel dar. Der übergreifende Anwendungsfall ist die Auswahl, Orchestrierung und Implementierung von Sensor technologien als Grundlage datengetriebener Wertschöpfungs- und Geschäftsmodelle. Nachfolgend werden die drei im Projekt ConSensE entwickelten und evaluierten Industrie 4.0-Demonstratoren vorgestellt, die spezifische Problemstellungen bei der Realisierung von Digitalisierungsstrategien, insbesondere in KMU, adressieren.

Demonstrator #1 „Industrie 4.0-Potenzialanalyse“

Bei der Realisierung von Industrie 4.0 in KMU aber auch in Großkonzernen geht es bei der Mehrheit der Maßnahmen und Projekte darum, bestehende Technologien, Prozesse und Geschäftsmodelle in das digitale Zeitalter zu überführen. Neben revolutionären Ansätzen und disruptiven Innovationen, die mit großen Ressourcenaufwänden einhergehen, sind es dabei die evolutionären Ansätze und inkrementellen Innovationen, die schnelle Erfolge mit kalkulierbarem Risiko ermöglichen. Somit bietet es große Potenziale, die bestehende Produktions- und Geschäftssituation zu analysieren, um Ansatzpunkte in Brownfield-Szenarien zu identifizieren, welche schnelle und aufwandsreduzierte Digitalisierungsmaßnahmen ermöglichen. Besonders in Wertschöpfungsnetzwerken, in denen Unternehmen langfristig und strategisch kooperieren, können gegenseitige Impulse eine Triebfeder für die Etablierung von Industrie 4.0-Konzepten sein.

Diesen Ansatz verfolgt Demonstrator #1, der die Vorteile digitalisierter Drucklufttechnik und -bereitstellung veranschaulicht. Der Demonstrator wurde mit der Zielstellung entwickelt, die Überwachungsmöglichkeiten an Druckluftanlagen mittels der Integration von Sensorik darzustellen. Hierbei können den druckluftnutzenden Unternehmen die Potenziale der Erfassung und Analyse der Zustands- und Energiedaten einer solchen Anlage veranschaulicht werden. Mittels der Verknüpfung von Kompressor-Hardware, Sensorik sowie der graphischen Darstellung von Prozessen und Zuständen, werden die erweiterten Service-Möglichkeiten demonstriert, welche durch die Sensorintegration erschlossen werden. Es wird ein einheitliches Verständnis zwischen dem Anwender und Bereitsteller hinsichtlich der Technologien, Prozesse und Wertschöpfungspotenziale geschaffen, sodass Herausforderungen und Potenziale gemeinsam diskutiert sowie Adaptionen des Geschäftsmodells evaluiert werden können. Die Hauptzielstellungen des Demonstrators sind demnach, zu zeigen, über welche Fähigkeiten das System verfügt, um gleichzeitig das Erwartungsmanagement zu steuern. Der Demonstrator fokussiert dabei exemplarisch die Potenzialanalyse bezüglich Komponenten und Services in der Drucklufttechnik.

Um dies weitläufig, unter anderem im Rahmen von Vertriebs-tätigkeiten, zu ermöglichen, wurde der Demonstrator ortsbun-den ausgelegt. Der Aufbau ist robust und fahrbar und im Vergleich zu industriellen Druckluftanlagen stark herunterskaliert, was einen Einsatz auf Veranstaltung, wie Messen oder bei Kundenterminen, ermöglicht. Für den Betrieb wird lediglich eine Stromversorgung mit herkömmlicher Netzspannung sowie der Betrieb eines demonstratoreigenen WLAN, welches über einen WLAN Stick aufgebaut wird, benötigt. Die Komplexität des modularen Demonstrators ist somit reduziert, während die Sensorik originär ist. Das Cloud Dashboard zur Darstellung der Sensordaten und ausgewerteten Informationen ist Browser-basiert und kann folglich vielfältig eingesetzt werden. Des Weiteren ist ein

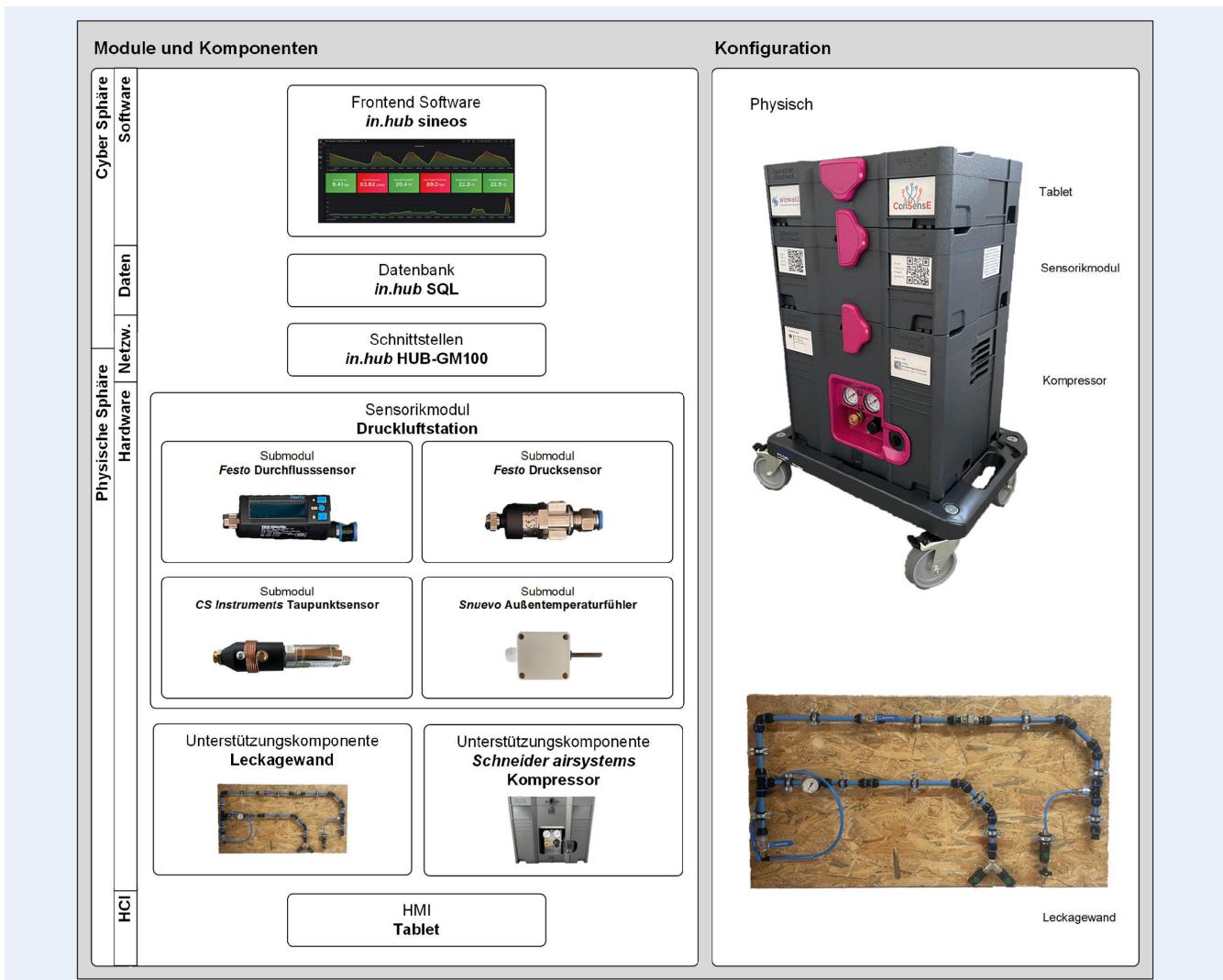


Bild 2. Demonstrator #1 „Industrie 4.0-Potentialanalyse“. Grafik: Eigene Darstellung

browser-basierter Zugriff auf die Leckageortung-Software möglich. Die Software ist exakt diese, die auch in der Unternehmenspraxis Anwendung findet. Anwender bekommen somit einen originalgetreuen Eindruck des möglichen Funktionsumfangs.

Die Hardware des Demonstrators besteht aus drei Modulen: Ein ölfreier Kompressor mit einem Druck von 8 bar ist fest in einem Systainer installiert, sodass die weiteren Module kompakt über diesem gestapelt und mit diesem verbunden werden können. Der Arbeitsdruck kann über einen Druckminderer reguliert werden, sodass der Anschluss verschiedener Verbraucher ermöglicht und weitreichende Modularität gewährleistet wird. Im Sensorikmodul sind Sensoren zur Erfassung des Drucks, des Volumenstroms, der Außentemperatur, des Taupunkts sowie des Stromverbrauchs verbaut. Die Sensoren verfügen über einen Analogausgang (4–20 mA). Somit können alle relevanten Werte zur Zustandsüberwachung einer modellierten Anlage erfasst werden. Die Sensorik ist an ein Internet of Things (IoT) Gateway über Bus-Connectoren angeschlossen, das die Übertragung und Verteilung der Daten an nachgelagerte Systeme ermöglicht. Aufgrund der internen Datenspeichers (7 GB) fungiert das Gateway als Daten-Logger, für den Fall, dass keine direkte Übertragung in die Cloud möglich sein sollte. Das Leckagemodul besteht aus ver-

schiedenen Leitungsverläufen, die auf einem Paneel montiert sind. Daraus resultierend kann eine Vielzahl industrietypischer Leckagen simuliert werden. Je nach Demonstrationszweck können der Kompressor und das Sensorikmodul ebenfalls ohne die Leckagewand genutzt werden.

Als Mensch-Maschine-Schnittstelle wird ein Tablet genutzt. Auf diesem werden die sensorbasierten Daten und Prozesse übersichtlich dargestellt, sodass relevante Informationen direkt ersichtlich sind. Die Module und Komponenten sowie die Konfiguration von Demonstrator #1 sind in Bild 2 dargestellt.

Der Demonstrator kommt in zwei Szenarien zum Einsatz. Im ersten Szenario (D#1-1) wird die Zustandsüberwachung an einer Druckluftanlage dargestellt. Die Echtzeitdaten des Stromverbrauchs, Volumenstroms, Taupunkts, Drucks und der Umgebungstemperatur werden gebündelt und grafisch aufbereitet. Ziel ist es, basierend auf diesen Daten vorausschauende Wartungsmaßnahmen zu ermöglichen. Im Gegensatz zu zyklisch geplanten Wartungsintervallen wird proaktiv auf den Zustand der Anlage reagiert. Der Demonstrator bildet dabei das Grenzobjekt, anhand dessen Anwender und Bereitsteller konkrete Anwendungspotenziale in der unternehmerischen Praxis eruieren. Dabei werden kundenspezifische Anforderungen hinsichtlich der Datenauswer-

tung und -darstellung erfasst. Darüber hinaus können potenzielle datengetriebene Dienstleistungen, deren Mehrwert und die Entwicklung nutzerzentrierter Geschäftsmodelle evaluiert werden. Im zweiten Szenario (D#1-2) werden die Auswirkungen von Leckagen an Druckluftanlagen dargestellt. Mit der Folge von hohen Energieverbräuchen sind Leckagen einer der größten Kostentreiber in druckluftbetriebenen Produktionsverfahren. Der Demonstrator ermöglicht es dazu, verschiedene typische Leckageformen, wie Löcher und Knicke in Schläuchen oder Undichtigkeiten an Ventilen zu simulieren. Dabei wird das Energieeffizienzmanagement mit energetischen und wirtschaftlichen Einsparungen fokussiert.

Die Leckagen werden zum einen mittels Ultraschalltechnologie manuell geortet. Zum anderen werden Messwerte ohne manuellen Messaufwand ermittelt, um den Wirkungsgrad der Anlage zu erhöhen und den Energieaufwand zu verringern. Somit werden Korrelationen von Leckageinformationen mit anderen Überwachungsdaten, wie Volumenstrom und Druck, identifiziert, um umfassende Einblicke in den Zustand der Kompressorstation zu erhalten. Dies zielt auf die potenzielle Entwicklung von präventiven Wartungsplänen auf Grundlage der erfassten Leckageinformationen ab, um Ausfallzeiten zu minimieren und die Effizienz der Kompressorstation zu optimieren.

Demonstrator #2 „Industrie 4.0-Systementwicklung“

Wie zuvor beschrieben, kann die Komplexitätssteigerung im Industrie 4.0-Kontext in Teilen auf den nummerischen Anstieg von beteiligten beziehungsweise betroffenen Stakeholder-Gruppen zurückgeführt werden. Diese gilt es, mit nutzerzentrierenden Co-Kreationsansätzen in Systemgestaltungsprozesse ganzheitlich zu integrieren. Auf diesem Weg können die Expertise der Stakeholder nach Open Innovation-Paradigmen genutzt, deren Akzeptanz von neuen Technologien und Arbeitsprozessen erhöht und etwaige Konflikte aufgrund heterogener Einstellungen und Erwartungshaltungen moderiert werden. Darüber hinaus geht es darum, das Personal an den neuen digitalen Systemen auszubilden. Aus diesen Anforderungen ergeben sich die Zielstellungen von Demonstrator #2. Im Anwendungsfeld der Sensoriknachrüstung fokussiert er die ganzheitliche Systementwicklung und -erweiterung mit einer Stakeholder-zentrierten Entwicklungs- und Testumgebung [22]. KMU werden dabei bezüglich der Interoperabilität verschiedener Kommunikations- und Sensortechnologien unterstützt. Dazu stellt der Demonstrator ein skaliertes industrielles Produktionssystem dar, in welchem Werkstücke ausgehend von einem Werkstücklager, durch verschiedene Stationen zur Bearbeitung transportiert werden, um schließlich sortiert zu werden. Die Modularität und die sich daraus ergebende Portabilität des Demonstrators ist für dessen Rolle als Grenzobjekt, von großer Bedeutung. Standardisierte Industrie-Hardware-Komponenten stellen eine konkrete und authentische Repräsentation des industriellen Produktionssystems dar, welches dadurch gleichzeitig eine nahezu vollständige Darstellung der Komplexität ermöglicht. Gleiches gilt für die Komponenten der cyber Sphäre. Diese vereint ein Assistenz-Dashboard und die Mixed Reality (MR)-Darstellung des Demonstrators als Webapplikationen. Als Backend-Software fungiert das Siemens TIA Portal. Eine zentrale SQL-Datenbank, enthält die generierten Daten, Benutzerprofile, vorkonfigurierte Szenarien und die verschiedenen Sensordaten. Die Übertragung erfolgt anhand des Protokolls Message Queuing

Telemetry Transport (MQTT). Die drahtlose Übertragung der Sensordaten erfolgt über Low Power Wide Area Network (LPWAN) und Radio Frequency Identification (RFID). Die Module und Komponenten, wie auch die Konfiguration des auf Experten mit entsprechenden technischen Ausbildungsständen ausgerichteten Demonstrators #2 sind in Bild 3 dargestellt.

Der Demonstrator wird maßgeblich in drei Szenarien angewandt, die den steigenden Industrie 4.0-Leveln nach [23] entsprechen. In Szenario (D#2-1) wird eine Qualitätskontrolle zur Erkennung von Produktionsfehlern dargestellt. Dazu kommen eine Kamera und ein kapazitiver Sensor zum Einsatz, welche Bilddaten und Auslösezeitpunkte des Bearbeitungstempels erfassen. Das Kamerabild wird von einem Klassifikationsmodell analysiert. In Szenario (D#2-2) steht die Zustandsüberwachung im Fokus, um eine hohe Verfügbarkeit von Anlagen, Maschinen und Motoren oder Aktoren sensorbasiert zu ermöglichen. Dazu kommen datenbasierte Methoden zum Einsatz, welche eine höhere Instandhaltungseffizienz ermöglichen sollen [24]. Am Demonstrator wird auch der Schwenkarm überwacht, wobei ein Vakuumsensor, ein Drucksensor und mehrere kapazitive Sensoren eingesetzt werden sowie deren jeweilige historische Daten zum Vergleich bei der Analyse. Basierend auf diesen Daten werden Trends oder anormale Muster erkannt, welche einen potenziellen Ausfall des Prozessmoduls zur Folge haben könnten. Das dritte Szenario (D#2-3) Asset Tracking ist das komplexeste, bei welchem die Werkstücke entlang des gesamten Produktionsprozesses getrackt werden. Durch eine geeignete Datenerfassung und -analyse können Unternehmen einen hohen Grad an Automatisierung in ihrer Produktion erreichen. Hierbei gilt es zu evaluieren, wann ein solcher Grad an Autonomie plausibel ist. Für das dargestellte Szenario wird eine Vielzahl von Sensoren benötigt sowie die Nutzung von RFID-Tags, wobei sowohl Daten der Produktions- und Handhabungsprozesse als auch der Werkstücke von Bedeutung sind [25]. Ein Beispiel des dieses Szenario mithilfe von ERC-721 Token erfolgreich umgesetzt hat ist von [26] beschrieben. Die Erfassung von Metadaten in Kombination mit den Daten der RFID-Tags trägt dazu bei, dass die Ausführungszeiten genauer prognostiziert werden können.

Demonstrator #3 „Industrie 4.0-Retrofit“

Die ressourcenschonende Gestaltung und Etablierung von Industrie 4.0-Systemen ist insbesondere für KMU häufig von gehobener Prämisse. Nur selten werden gänzlich neue Produktionsstränge geplant und umgesetzt; vielmehr überwiegen Brownfield-Szenarien, in denen digitale Technologien in vorhandene Infrastrukturen integriert werden müssen. Somit gilt es, bestehende Anlagen durch Nachrüstungen im Sinne des Retrofitting nach Industrie 4.0-Standards kompatibel zu machen. Demonstrator #3 adressiert aus diesen Gründen die Herausforderungen des Retrofittings alter Bestands- und Sondermaschinen durch die Umsetzung neuer Sicherheitsbestimmungen, zum Beispiel DIN EN ISO 16090-1 (2019). Diese etabliert die Reduzierung von Gefahren für Mensch und Umwelt durch technische Vorrichtungen, wie Laserschranken und Bremseinrichtungen für schwerkraftbelastete Achsen sowie die Nachrüstung von Sensorik zur Messung von Verbrauchs- und Energiedaten.

Die Struktur des Demonstrators basiert auf einer 18 Jahre alten Zylinderpresse. Zentrale Module, wie der Druckluftkompressor und der pneumatische Kolbenstangenzylinder, wurden

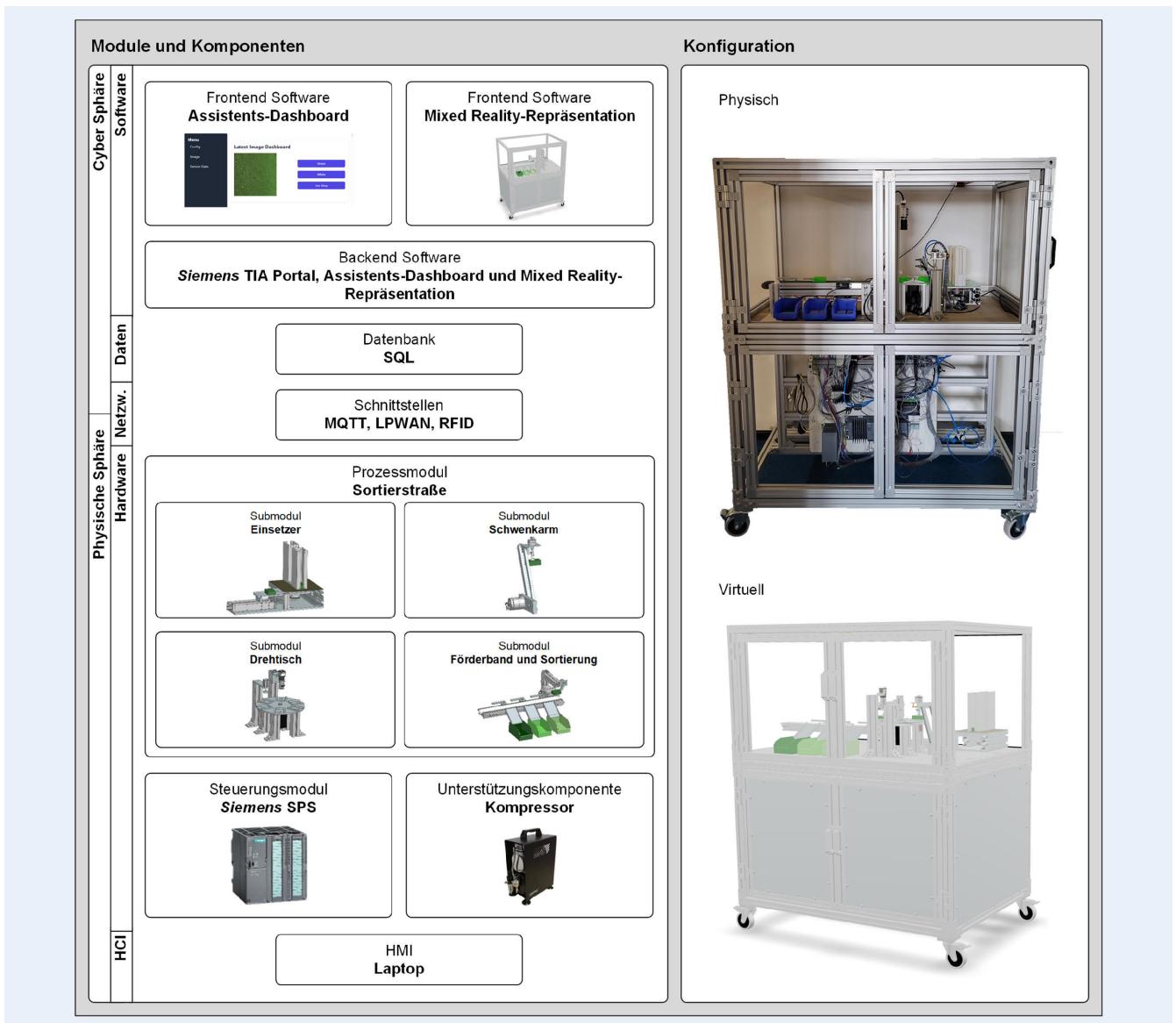


Bild 3. Demonstrator #2 „Industrie 4.0-Systementwicklung“. Grafik: Eigene Darstellung in Anlehnung an [7]

durch digitale Komponenten, wie eine elektrische Steuerung, Sensorik, eine Sicherheitsbremse und eine Tablet-basierte Mensch-Maschine-Schnittstelle erweitert. Die Hauptkomponente des Demonstrators ist ein pneumatischer Kolbenstangenzylinder, der die Pressbewegung überträgt. Der Pressstempel wird durch die Bewegung des pneumatischen Zylinders entlang der y-Achse verschoben, wodurch die Arbeitsweise der Zylinderpresse simuliert wird. Ein Kompressor stellt die Druckluft für das pneumatische System bereit. Zur Erfassung des Betriebsdrucks und der Beschleunigung der Führungsachse des Aktors wurden zwei branchentypische Sensoren genutzt. Zum einen ein Pt5504 Drucksensor und zum anderen ein DIS 11939 Beschleunigungssensor – beide mit Analogausgang. Diese sind an eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) angeschlossen. Um sicherzustellen, dass der Pressstempel in kritischen Situationen gemäß den geltenden Sicherheitsbestimmungen zuverlässig arretiert wird, ist eine pneumatische Sicherheitsbremse integriert. Im energielosen Zustand bewirken Federn, dass ein Klemmelement die Kolbenstange festhält. Bei Beaufschlagung des erforderlichen

Betriebsdrucks der Bremse wird das Klemmelement entsprechend gelöst. Das IoT Gateway fungiert als Schnittstelle, welche den Demonstrator via WLAN mit dem Internet verbindet. Zusätzlich dient es der Erfassung, Analyse und Verarbeitung von Maschinen- und Prozessdaten, wodurch es eine Brücke zwischen den erfassten Prozessdaten und der Maschinensteuerung bildet. Das Gateway kann aufgrund seines internen Datenloggers sowohl offline als auch online genutzt werden und ermöglicht somit einen orts- und netzunabhängigen Zugriff auf die Daten. Ergänzend dazu bietet es einen internen Webserver mit einem Cloud-Dashboard zur weiteren Datavisualisierung und -analyse. Dieser basiert auf einer SQL-Datenbank. Ein Tablet fungiert als Mensch-Maschine-Schnittstelle und ermöglicht die Visualisierung von Daten, Bedienung sowie die Aktivierung verschiedener Szenarien des Demonstrators.

Der Demonstrator bedient sich einer idealisierten und vereinfachten Darstellung, um das Thema des Retrofitting plakativ und greifbar darzustellen. Die Komplexität ist reduziert, um den Fokus auf elementare Aspekte zu richten. Im Vergleich zu einer

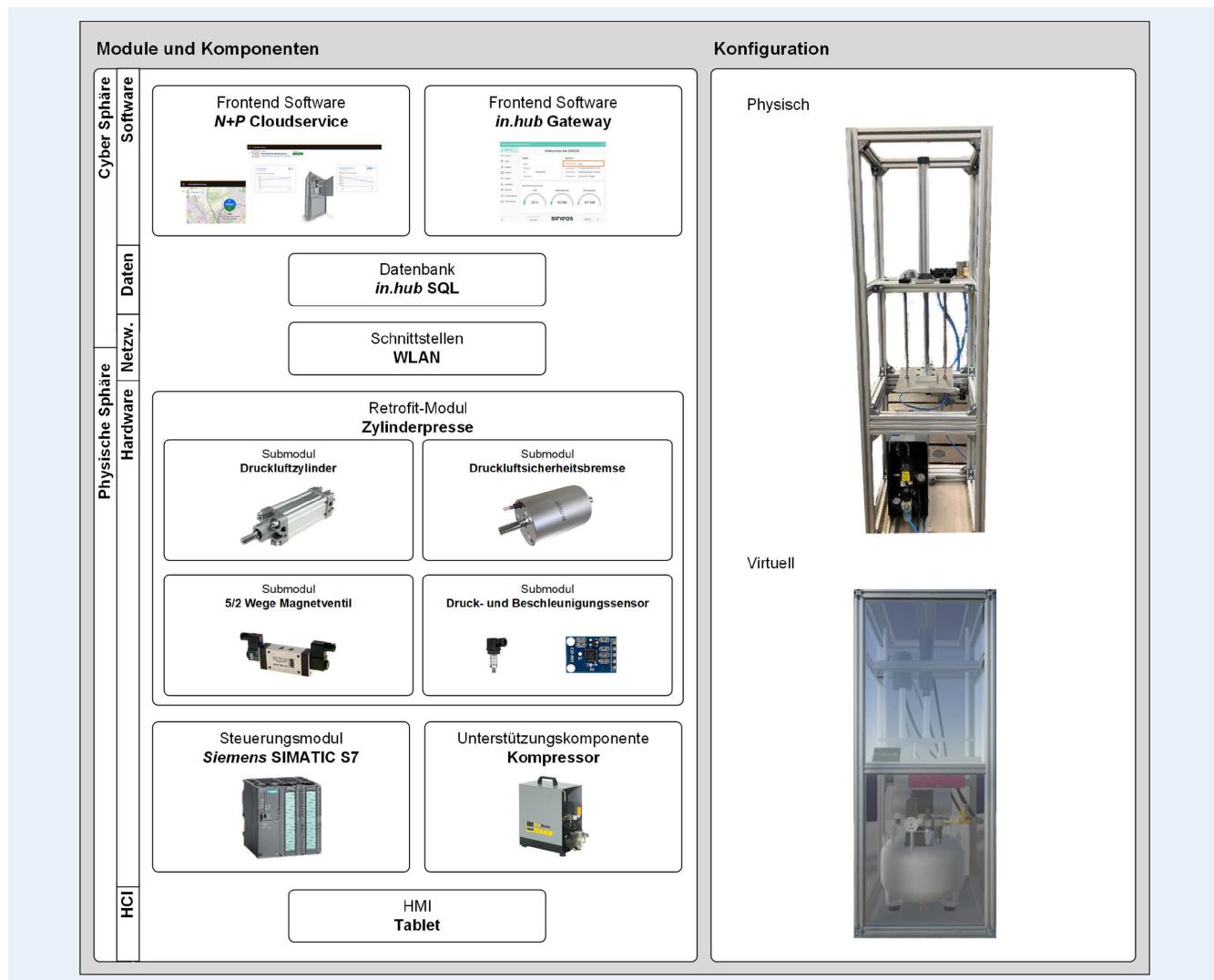


Bild 4. Demonstrator #3 „Industrie 4.0-Retrofit“. Grafik: Eigene Darstellung

realen hydraulischen Zylinderpresse ist die Skalierung für den mobilen, ortsbundenen Einsatz auf Messen und in Schulungen reduziert. Die horizontale Integration von Funktionen entspricht dem Ansatz horizontaler Prototypen im Systems-Engineering, um ein Gesamtverständnis der Systemarchitektur zu vermitteln, ohne in technische Einzelheiten zu gehen.

Der Demonstrator kann in zwei Szenarien verwendet werden: Im ersten Szenario (#3-1) werden Retrofitting-Maßnahmen vorgestellt. Dazu gehört die Zustandsüberwachung des Demonstrators in Form der Prozess- und Maschinendaten und die Umsetzung von Sicherheitsbestimmungen für schwerkraftbelastete Achsen. Es wird über ein Tablet erörtert, wo die zusätzliche Sensorik und die pneumatische Sicherheitsbremse im Demonstrator platziert und im übrigen System integriert werden können. Ferner erfolgt eine Erläuterung des Mehrwerts dieser Daten aus Sicht eines Maschinenbetreibers. Das zweite Szenario (#3-2) umfasst vier unterschiedliche Fehlerszenarien: (1) Abrupter Druckverlust durch Öffnung eines zusätzlichen Druckventsils, (2) Simulation einer schleifenden Führung, (3) eine nicht geöffnete Sicherheitsbremse und (4) eine fallende, schwerkraftbelastete Achse. Zur Behebung der jeweiligen Fehlerszenarien werden über

ein Tablet effektive Lösungsmaßnahmen angezeigt, welche die Nutzer Schritt für Schritt durch den Instandhaltungsprozess führen.

5 Diskussion

Nachfolgend werden die erlangten Erkenntnisse aus dem individuellen und vernetzten Einsatz der drei zuvor beschriebenen Demonstratoren dargelegt und in Implikationen für die Praxis und Wissenschaft überführt. Anschließend werden die Demonstratoren exemplarisch mit bereits etablierten Industrie 4.0-Veranschaulichungskonzepten ins Verhältnis gesetzt, um eine Standpunktbestimmung bezüglich derer Potenziale und Anwendungsbereiche durchzuführen. Generell ermöglichen die Demonstratoren aus dem Projekt ConSensE ein vertieftes Verständnis von spezifischen Anwendungsfällen im Kontext von Industrie 4.0, wobei der Fokus auf technologische Aspekte der Auswahl und Implementierung von Sensorik sowie der darauf aufbauenden datengetriebenen Wertschöpfung liegt. Diese spezifizierte Ausrichtung ermöglicht eine tiefgreifende Auseinandersetzung mit den Potenzialen und Herausforderungen von Industrie 4.0-Systemen

Tabelle 1. Gegenüberstellung der ConSensE Demonstratoren mit Referenzkonzepten.

ConSensE Demonstratoren				Referenzkonzepte		
	#1 „Industrie 4.0-Potenzialanalyse“	#2 „Industrie 4.0-Systementwicklung“	#3 „Industrie 4.0-Retrofit“	ASE Mobiles Plug-In Labor	Discover Industry Mobile Erlebniswelt	Experimentier- und Digitalfabrik
Primäre Zielgruppe	Entscheidungsträger in KMU	Systemingenieure/Stakeholder in der Produktion	Systemingenieure	Entscheidungsträger in KMU	Schüler	Auszubildende/Studierende
Vorausgesetzte Expertise	●	●	●	●	●	●
Durchgängigkeit der Wertschöpfungskette	●	●	●	●	●	●
Anschlussfähigkeit weiterer Industrie 4.0 Technologien	●	●	●	●	●	●
Repräsentation	●	●	●	●	●	●
Virtualisierung	○	●	●	●	●	●
Komplexität	●	●	●	●	●	●
Modularität	●	●	●	●	●	●
Portabilität	●	●	●	●	●	○
Finanzierlicher Ressourcenbedarf	●	●	●	●	●	●

Die Kategorie ist ○ nicht, ○ gering, ● teilweise, ● umfangreich, ● vollständig erfüllt.

und eröffnet eine systematische und nutzerzentrierte Herangehensweise an den gesamten Entwicklungsprozess digitaler Systeme. Ein zentrales Merkmal des Vorgehens ist die inhärente Agilität. Sie ermöglicht zeiteffiziente und iterative Gestaltungs- und Implementierungsprozesse bei gleichzeitiger finanzieller Ressourcenschonung. Dies ist besonders relevant, wenn flexibel auf volatile Anforderungen und Entwicklungen reagiert werden muss. Insbesondere für die Stakeholder-Fokussierung sowie die vertrauensvolle Kooperation zwischen Akteuren in Wertschöpfungsökosystemen eröffnet der Demonstratoreneinsatz einen geschützten Interaktionsraum. Die ConSensE Demonstratoren können dabei einen wertvollen Beitrag zur Komplexitätsreduktion leisten: Demonstrator #1 im Rahmen der Potenzialanalyse, Demonstrator #2 bei der Komponentenauswahl und Systemgestaltung und Demonstrator #3 beim Retrofitting in Brownfield-Umgebungen. Im Rahmen des Co-Kreationsansatzes kann darüber hinaus die Interoperabilität der Demonstratoren genutzt werden, sodass eine integrierte, phasenverknüpfende Industrie 4.0-Etablierung insbesondere in KMU unterstützt werden kann. Die gezielte Integration von Nutzern in den Entwicklungsprozess, begleitet von einem aktiven Austausch mit ihnen, bildet das Fundament einer nutzerzentrierten Entwicklungsstrategie. Diese durchgängige Interaktion ermöglicht nicht nur eine umfassende Berücksichtigung der Bedürfnisse und Anforderungen der Zielgruppen, sondern fördert auch ein tiefgreifendes Verständnis ihrer Perspektiven und Präferenzen. Durch diesen Dialog wird ein partnerschaftliches Verhältnis

zwischen Entwicklern und Nutzern geschaffen, dass die Akzeptanz der Lösungen verbessert und das gegenseitige Vertrauen stärkt.

Die Verwendung der ConSensE Demonstratoren lässt sich auch mit bereits bestehenden Konzepte zur Modellierung und Simulation von Industrie 4.0-Szenarien wertstiftend kombinieren. **Tabelle 1** bietet dazu eine Zusammenfassung und Gegenüberstellung der Ausgestaltungen der ConSensE Demonstratoren mit einer Auswahl projektexternalen Veranschaulichungskonzepte, die nachfolgend prägnant erläutert werden. Das mobile Plug-In Labor für das Advanced Systems Engineering ist ein Konzept des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswissenschaften und Organisation IAO. Es zielt darauf ab, Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Automobilbranche, der Elektroindustrie sowie der Medizintechnik Lösungen für Themenstellungen des Advanced System Engineering (zum Beispiel durchgängige digitale Produktionsprozesse) zu präsentieren. Der Container unterstützt somit die Demonstration innovativer Technologien und Prozesse der digitalen Transformation mittels erlebbarer und interaktiver Anwendungsfälle [18]. Ein weiteres Konzept ist der „Discover Industry“ Truck, der für Schüler den Erstkontakt mit den Realitäten der digitalen Transformation ermöglicht. An fünf Arbeitsstationen interagieren sie mit industrielle Produktentstehungsprozessen und lösen in Gruppen verschiedene Aufgaben, wie einen Industrieroboter zu programmieren oder Prozesse in einer Smart Factory zu steuern. Ziel ist es, die Digitalisierung und ihre

Tabelle 2. Erkenntnisse aus dem Projekt.

Erkenntnisse aus dem Projekt		
Potentialanalyse	Nutzung bestehender Demonstratoren	<ul style="list-style-type: none"> Nutzung großer Demonstratoren wie das Mobile-Plug In Labor oder des DISCOVER INDUSTRY Trucks zur Inspiration
Systementwicklung	Zielgruppe	<ul style="list-style-type: none"> Definition der Zielgruppe Auseinandersetzen mit deren Bedürfnissen und Herausforderungen
	Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Methodisches Vorgehen definieren bspw. nach Oks et al. 2019
	Finanzielle Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> Prüfen von Möglichkeiten zur Förderung Skalierung der Komponenten
	Virtueller Schatten	<ul style="list-style-type: none"> Überprüfung der Kompatibilität der Komponenten mittels virtuellem Engineering
	Systemkompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> Durchgängigkeit und Kommunikationsfähigkeit von Hardware und Software berücksichtigen
Implementierung	Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Agile Methoden, um flexible auf Änderungen zu reagieren Kontinuierlicher Abgleich zwischen virtuellem und physischem Objekt
Nutzung	Nutzerintegration	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierliche Nutzerbeteiligung zur Erhöhung der Akzeptanz

Berufsbilder in den Ingenieurwissenschaften sowie der Informatik für Jugendliche erlebbar zu machen und sie für Ausbildungen und Studien in MINT-Bereichen zu bestärken [19]. Die Experimentier- und Digitalfabrik verfolgt Ausbildungszwecke, jedoch im langfristigen und professionellen Kontext der Aus- und Weiterbildung. Sie bilden Produktionstechnologien zumeist im originären Maßstab ab. Dabei steht das Erlernen des zielgerichteten und betriebssicheren Umgangs mit diesen Technologien im Fokus. Dazu werden Nachbauten originärer Anlagen und Arbeitsplätze genutzt, um mit einem hohen Detailgrad sowie realen Arbeitsbedingungen eine geeignete Ausbildungsumgebung zu schaffen [27].

6 Fazit & Ausblick

Dieser Beitrag gibt einen fundierten Einblick in die Bedeutung von Demonstratoren für die digitale Transformation industrieller Wertschöpfungsketten und -ökosysteme im Kontext von Industrie 4.0. Das BMBF-geförderte Projekt ConSensE adressiert dabei die spezifischen Bedürfnisse von KMU mit der Bereitstellung von drei Demonstratoren, um Komplexitätsreduziert die ganzheitliche und integrierte Systementwicklung nutzerzentriert zu unterstützen. Zusammenfassend bieten die Ergebnisse des Projekts ConSensE wichtige Erkenntnisse für KMU sowie die Forschung zu der Rolle von Demonstratoren in der Digitalisierung. Sie zeigen, dass Demonstratoren eine effektive Möglichkeit darstellen, komplexe Zusammenhänge zu begreifen, Potenziale im Industrie 4.0 Kontext zu verstehen und die digitale Transformation erfolgreich zu gestalten. **Tabelle 2** fasst dazu abschließend die wichtigsten Erkenntnisse des Projektes in den Phasen der Ausgestaltung der Demonstratoren zusammen.

FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (02J19B062, 02J19B063, 02J19B067) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

L iteratur

- [1] Böhm, M.; Müller, S.; Krcmar, H. et al.: Digitale Transformation in ausgewählten Ländern im Vergleich. In: Oswald, G.; Krcmar, H. (Hrsg.): Digitale Transformation, S. 73–85. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018
- [2] Dör, L.; Fliege, K.; Lehmann, C. et al.: A Taxonomy on Influencing Factors Towards Digital Transformation in SMEs. Journal of Small Business Strategy 33 (2023), Nr. 1
- [3] Ebersbach, M.; Dör, D. M.; Bauernhansl, T.: Umsetzungsfortschritt digitaler Geschäftsmodelle/Progress in implementing digital business models. wirtschaftstechnik online 114 (2024), 01–02, S. 28–32
- [4] Oks, S. J.; Jalowski, M.; Zansinger, N. et al.: Die Rolle von Industrie 4.0-Demonstratoren in der digitalen Transformation. Eine Standpunktbestimmung am Portable Industrial Demonstrator for Cyber-Physical Systems (PID4CPS). In: Wilbers, K. (Hrsg.): Lernfabriken an beruflichen Schulen. Gewerblich-technische und kaufmännische Perspektiven, S. 119–157. Berlin: epubli 2021
- [5] Schymanietz, M.; Jonas, J. M.; Mösllein, K. M.: Exploring data-driven service innovation—aligning perspectives in research and practice. Journal of Business Economics 92 (2022), Nr. 7, S. 1167–1205
- [6] Statistisches Bundesamt: Kleine und mittlere Unternehmen. Internetadresse: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Unternehmen/Kleine-Unternehmen-Mittlere-Unternehmen/_inhalt.html#233754
- [7] Koustas, S. G.; Reichenstein, T.; Oks, S. J. et al.: Demonstrating industrial smart product-service systems: Industry 4.0 maturity through stakeholder-oriented development and testing. Procedia CIRP 120 (2023), S. 1268–1273
- [8] Trabert, T.; Doerr, L.; Lehmann, C.: The struggle of sensor-based digital servitization: analysis and perspectives for organizational digital

- transformation in SMEs. European Journal of Innovation Management 27 (2023), Nr. 9, S. 52–72
- [9] Wagner, M.; Alaluss, M.; Langheinrich, J. et al.: Prozessüberwachung mittels maschineninhärenter Sensoren/Transparency improvement in hollow embossing rolling of metallic bipolar plates – Process monitoring by using machine-inherent sensors. wt Werkstatttechnik online 114 (2024), 01–02, S. 15–20
- [10] Stergiou, G.; Kavakli, E.; Kotis, K.: Towards a technology acceptance methodology for Industry 4.0. Procedia Computer Science 219 (2023), S. 832–839
- [11] Oks, S. J.; Jalowski, M.; Fritzsche, A. et al.: Cyber-physical modeling and simulation: A reference architecture for designing demonstrators for industrial cyber-physical systems. Procedia CIRP 84 (2019), S. 257–264
- [12] Oks, S. J.: Industrial Cyber-Physical Systems. Advancing Industry 4.0 from Vision to Application. Wiesbaden: Springer Gabler 2024
- [13] Zeigler, B. P.; Sarjoughian, H. S.: Guide to Modeling and Simulation of Systems of Systems. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer 2013
- [14] Sokolowski, J. A.; Banks, C. M. (Hrsg.): Modeling and Simulation Fundamentals. Theoretical Underpinnings and Practical Domains. Hoboken, United States: Wiley 2009
- [15] Schenk, M.; Straßburger, S.; Kißner, H.: Combining Virtual Reality and Assembly Simulation for Production Planning and Worker Qualification. In: Zäh, M.; Reinhart, G. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005), München, 22.–23.-09.2005, S. 411–414. München: Utz 2005
- [16] Moultrie, J.: Understanding And Classifying The Role Of Design Demonstrators In Scientific Exploration. Technovation 43–44 (2015), S. 1–16
- [17] Fox, N. J.: Boundary Objects, Social Meanings and the Success of New Technologies. Sociology 45 (2011), Nr. 1, S. 70–85
- [18] Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO: Mobiles Plug-In Labor für das Advanced Systems Engineering – Fraunhofer IAO. Internetadresse: <https://www.iao.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsbereiche/cognitive-engineering-and-production/mobiles-plug-in-labor-fuer-das-advanced-systems-engineering.html>. Zugriff am 13.03.2024
- [19] coaching4future: DISCOVER INDUSTRY – COACHING4FUTURE. Internetadresse: <https://www.coaching4future.de/angebote/discover-industry>. Zugriff am 13.03.2024
- [20] Technische Universität Chemnitz: Experimentier- und Digitalfabrik (EDF). Internetadresse: <https://www.tu-chemnitz.de/mb/FabrPlan/edf.php>
- [21] Choaib, M.; Garouani, M.; Bouneffa, M. et al.: Automated Decision Support Framework for IoT: Towards a Cyber Physical Recommendation System. In: Proceedings of the 25th International
- [22] Reichenstein, T.; Koustas, S. G.; Roßner, A. et al.: Toward a structured concept for purpose-driven modeling of a digital shadow in manufacturing. Procedia CIRP 119 (2023), S. 816–821
- [23] Schuh, G.; Anderl, R.; Dumitrescu, R. et al.: Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (acatech STUDY). Munich 2020
- [24] Lee, Y. O.; Jo, J.; Hwang, J.: Application of deep neural network and generative adversarial network to industrial maintenance: A case study of induction motor fault detection. In: 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Boston, MA, 11.12.2017 – 14.12.2017, S. 3248–3253. IEEE 2017
- [25] Fernandez-Carmes, T. M.; Fraga-Lamas, P.: A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0. IEEE Access 6 (2018), S. 25939–25957
- [26] Koustas, S. G.; Jalowski, M.; Reichenstein, T. et al.: A blockchain-based IIoT traceability system: ERC-721 tokens for Industry 4.0. Procedia CIRP 120 (2023), S. 1280–1285
- [27] Steffen, M.; Frye, S.; Deuse, J.: Vielfalt Lernfabrik *. Morphologie zu Betreibern, Ziel-gruppen und Ausstattungen von Lernfabriken im Industrial Engineering. wt Werkstatttechnik online 103 (2013) 3, S. 233–239

**Luca Dörr, M. Sc.**

Foto: Daniel Reiche
luca.doerr@hhl.de
 Tel. +49 341 / 9851-864

Dr. Sascha Julian Oks

Prof. Dr. Claudia Lehmann
 LF Gruppe Lehrstuhl für Digitale Innovation
 in Dienstleistungsbranchen
 HHL Graduate School of Management Leipzig
 Jahnallee 59, 04109 Leipzig
www.hhl.de

Jonas Trezi, M. Sc.

Professur Arbeitswissenschaft
 und Innovationsmanagement
 Technische Universität Chemnitz
 Str. der Nationen 62, 09111 Chemnitz
www.tu-chemnitz.de

Tobias Reichenstein, M. Sc.

FAPS -Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
 und Produktionssystematik
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 Egerlandstr. 7, 91058 Erlangen
www.faps.fau.de

Spyridon Georg Koustas, M. Sc.

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik,
 insbesondere Innovation und Wertschöpfung
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 Lange Gasse 20, 90403 Nürnberg

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)