

Industrie 4.0, Produktentwicklung

Nutzung von Industrie 4.0-Testumgebungen durch kleine und mittlere Unternehmen

Analyse der Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und KMU in Digitalisierungsvorhaben

D. Görzig, M. Luckert, T. Bauernhansl

David Görzig, MBE, Michael Luckert, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart
Tel. +49 (0)711 / 970-1995
E-Mail: david.goerzig@iff.uni-stuttgart.de

Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung im Rahmen des Forschungsprojektes „I4.0-Begleitforschung zur Mobilisierung kleiner und mittlerer Unternehmen“ unter dem Förderkennzeichen (01IS16020), das durch den Projektträger DLR Softwaresysteme in Berlin betreut wird. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Mit dem Ansatz der Industrie 4.0-Testumgebungen sollen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der kurzfristigen und agilen Entwicklung von digitalen Produkten durch Forschungseinrichtungen

unterstützt werden. Der vorliegende Beitrag definiert den Begriff der Industrie 4.0-Testumgebung und untersucht, wie dieses Konzept im Rahmen einer BMBF-Fördermaßnahme durch KMU genutzt wird. Hierzu werden die in den Projekten vergebenen Unteraufträge an die Forschungseinrichtungen untersucht.

Usage of industry 4.0 testbeds by SMEs

The Industrie 4.0 testbed approach aims to support small and medium-sized enterprises (SMEs) when cooperating with research institutions for the short-term and agile development of digital products. This paper defines the term „Industrie 4.0 Testbed“ and analyzes how SMEs use this approach as part of a BMBF funding measure. To this end, the subcontracts awarded to the research institutions in the projects will be examined.

1 Einleitung

KMU bilden einen zentralen Baustein der deutschen Wirtschaft. Sie erzielen circa ein Drittel des Umsatzes der Gesamtwirtschaft, bieten 61 % aller Beschäftigten Arbeit und tragen damit wesentlich zum Wohlstand in Deutschland bei [1]. Industrie 4.0 konfrontiert diese Unternehmen mit neuen Herausforderungen. Ausgelöst durch Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik kommt es technologieeitig zu einer zunehmenden Vernetzung über das Internet sowie zum Verschmelzen der physischen und der digitalen Welt [2]. Auf der Nachfrageseite wünschen sich Kunden immer häufiger Produkte, die personalisiert an ihre Wünsche angepasst werden können. Diese Veränderungen führen zu einem umfangreichen Wandel der Fabriken, wodurch der Innovationsdruck auf die Lösungsanbieter steigt [3]. Zahlreiche Studien zeigen, dass es KMU sowohl an der erforderlichen

Kapitalausstattung als auch an den notwendigen IT-Fachkräften und -Strukturen für die Umsetzung mangelt. Dies hemmt die Umsetzungsgeschwindigkeit [4, 5]. In Deutschland werden Forschungseinrichtungen wie Universitäten, Fachhochschulen und außeruniversitäre Einrichtungen als natürliche Partner des Mittelstands angesehen [5]. Sie verfügen bereits heute über die Infrastruktur und das Knowhow, um den Wandel in den KMU zu beschleunigen [6]. Bedingt durch die radikalen Umwälzungen der Digitalisierung hin zu immer agileren Entwicklungsprozessen verändert sich auch die Zusammenarbeit zwischen KMU und Forschungseinrichtungen. Um diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden, wurde das Konzept der Industrie 4.0-Testumgebung entwickelt. In diesen sollen KMU wesentlich kurzfristiger und zielgerichteter durch Forschungseinrichtungen unterstützt werden. Diese neue Form der Zusammenarbeit befindet sich jedoch noch immer im Entstehungsprozess. Industrie 4.0 Testumgebungen sollen daher im Folgenden näher definiert und ihre Nutzung durch KMU untersucht werden. Grundlage ist die Begleitung von 36 Projekten im Rahmen der Fördermaßnahme „Industrie4.0-Testumgebungen – Mobilisierung von KMU für Industrie4.0“. [7]

2 Wissenstransfer durch Industrie 4.0-Testumgebungen

Mit Industrie 4.0 hält das Internet der Dinge, Daten und Dienste Einzug in die Fabriken. Cyberphysische Systeme, wie etwa intelligente Maschinen, werden über ihren eigenen Produktlebenszyklus sowie über die gesamte Wertschöpfungskette vernetzt [2]. In der Folge werden bisherige Kerndisziplinen der deutschen Wirtschaft durch neue Fähigkeiten ergänzt, wie die Generierung und Analyse von großen Datenmengen [4]. Für KMU ist dieser Wandel aufgrund ihrer Ressourcenbegrenzung schwer zu bewältigen [5]. An deutschen Forschungsinstituten liegen in den relevanten Bereichen bereits umfassende Erfahrungen vor. Wichtigste Formen der bisherigen Zusammenarbeit sind gemeinsame Forschungsprojekte, Beratungsleistungen sowie die Nutzung der Infrastruktur der Einrichtungen [8]. Bisher werden die Angebote jedoch noch unzureichend von den Unternehmen genutzt. Die größten Hemmnisse für KMU liegen in den mangelnden organisatorischen Strukturen an den Forschungseinrichtungen, in Defiziten zur Transparenz des vorhandenen Leistungsangebots sowie in der unzureichenden Umsetzungsgeschwindigkeit. [9]

In der Vergangenheit bildete sich mit den Industrie-4.0-Applikationszentren bereits ein wichtiger Ansatz zur Überwindung der Barrieren zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen heraus. Hierbei handelt es sich um Umgebungen für die industrienähe Forschung, Entwicklung, Erprobung und Demonstration. Wichtiger Bestandteil der Applikationszentren sind klar definierte Angebote an die Unternehmen, die einen durchgängigen Charakter von der ersten Demonstration bis zur gemeinsamen Entwicklung von Prototypen haben. Aus organisatorischer Sicht bündeln die Zentren häufig die Aktivitäten und geben der langfristig ausgerichteten Zusammenarbeit zwischen Forschung und Unternehmen so einen Rahmen [10]. Mit dem Programm Mittelstand Digital hat das BMWi die bestehenden Kompetenzen und Infrastrukturen mehrerer bestehender Applikationszentren in bundesweit verteilten Mittelstand 4.0-Kompetenzzentren gebündelt, um Industrie 4.0 anschaulich zu machen und den Mittelstand bei der Umsetzung zu unterstützen [11]. Wesentliches Merkmal hierbei ist, dass KMU bereits in einem frühen Stadium der Digitalisierung adressiert werden.

Mit Industrie 4.0 ziehen immer mehr Ansätze aus der Softwareentwicklung in den klassischen Maschinenbau ein. In der Folge werden agile Entwicklungsansätze, und damit verbunden Umgebungen in denen die Ergebnisse schnell erprobt werden können, immer wichtiger [6]. Mit den Industrie 4.0-Testumgebungen wird diesem Aspekt Rechnung getragen. Hierbei handelt es sich um einen Bereich einer Forschungseinrichtung, in dem Produkte, Komponenten, Applikationen, Technologien und Prozesse mit Bezug zu Industrie 4.0 kurzfristig und agil entwickelt und getestet werden können. Die Industrie 4.0-Testumgebung bietet sowohl Kompetenzen aus dem Ingenieurwesen als auch aus der Informatik. Sie zielen auf einen unbürokratischen, kurzfristigen und projektbezogenen Zugang zu den Forschungseinrichtungen und sind für hohe Entwicklungsgeschwindigkeiten ausgelegt. Grundlagenforschung ist nicht Teil ihres Auftrags.

Um eine agile Entwicklung zu ermöglichen, verfügen die Testumgebungen sowohl über eine umfassende, technische Infrastruktur als auch über die notwendigen Kompetenzen, um Produkthanpassungen schnell und zielgerichtet zu erkennen und umzusetzen. Unter Infrastruktur werden in diesem Zusammenhang praxisnahe oder experimentelle Demonstrationsanlagen und die für deren Betrieb notwendige Komponenten verstanden [7, 12]. Mit der Fördermaßnahme „Industrie 4.0-Testumgebungen – Mobilisierung von KMU für Industrie 4.0“ werden Industrie 4.0-Testumgebungen für KMU leichter zugänglich gemacht, indem neben der Fördermaßnahme eine Begleitforschung für die Vermittlung geeigneter Industrie 4.0-Testumgebungen eingerichtet wurde [7].

Nach der Definition des Konzepts bleibt weiterhin unklar, welche konkreten Infrastrukturen und

Kompetenzen Industrie 4.0-Testumgebungen KMU anbieten sollten. Bisherige Projektvorstellungen konzentrieren sich vor allem auf die Vorstellung der umgesetzten Projekte [13]. Wie KMU das Konzept der Testumgebung aktuell nutzen, wird bisher in der Literatur nicht näher beleuchtet.

3 Gegenstand der Untersuchung

Gegenstand der Untersuchung sind die innerhalb der Fördermaßnahme „Industrie 4.0-Testumgebungen – Mobilisierung von KMU für Industrie 4.0“ durchgeführten 36 Projekte. In diesen Vorhaben arbeiteten jeweils ein KMU gemeinsam mit einer Industrie 4.0-Testumgebung an Problemstellungen bei der Entwicklung von Industrie-4.0-Produkten [7]. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die teilnehmenden Unternehmen und klassifiziert diese nach dem Alter der Unternehmen, der Anzahl der Mitarbeiter sowie nach der Branche. Bei der Brancheneinteilung wurde der Schlüssel nach WZ 2008 verwendet [14]. Die Unternehmen können dabei den Branchen Verarbeitendes Gewerbe (C); Handel, Instandhaltung und Reparatur von Fahrzeugen (G); Information und Kommunikation (J); Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen (M) sowie Erbringung von sonstigen Dienstleistungen (S) zugeordnet werden. Auffällig ist, dass mehr als 88 % der untersuchten Unternehmen weniger als 50 Mitarbeiter beschäftigen. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass es sich bei einem Drittel der untersuchten Unternehmen um Start-Ups mit einer Bestandsdauer von weniger als fünf Jahren handelt.

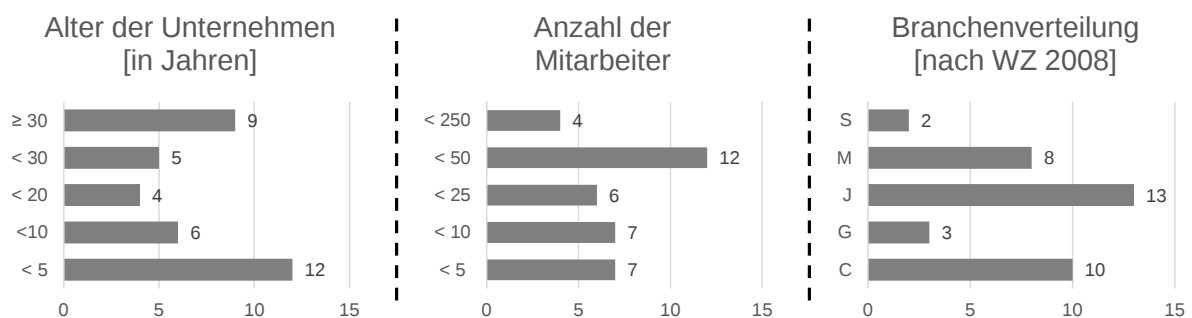


Abbildung 1: Auswertung der teilnehmenden Unternehmen

4 Datenerhebung

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Daten wurden in einem mehrstufigen Prozess aufgenommen. In einer Vorstudie wurde zunächst eine stichprobenartige Befragung der Unternehmen vorgenommen und dabei die drei Bedarfsgruppen Infrastruktur, Kompetenzen und Netzwerk identifiziert. Infrastruktur enthält Hard- und Software wie Werkzeugmaschinen oder Simulationssoftware sowie entsprechendes Personal zur Bedienung während der Tests. Unter Kompetenzen werden Wissen und Fertigkeiten verstanden, welche die Testumgebung den Unternehmen für die Situation kreativ und selbst organisiert bereitstellt [15]. Hierzu zählen beispielsweise die Anbindung einer Werkzeugmaschine über OPC UA (OLE for Process Control Unified Architecture) oder die Service- und Softwareentwicklung. Die dritte Gruppe umfasst den Zugriff auf das Partnernetzwerk der Testumgebungen. In vielen Fällen benötigen die Unternehmen eine branchenspezifische Rückmeldung zu ihren Produkten. Hierfür werden von den Testumgebungen zum Beispiel Foren und Veranstaltungen für die Diskussion der Ergebnisse organisiert. Diese Aktivität nimmt aufgrund der Ausrichtung der untersuchten Fördermaßnahme eine untergeordnete Rolle ein.

Jedes begleitete Projekt wurde danach eingeordnet, welche Kompetenzen, Infrastrukturen und Netzwerkaktivitäten durch die Testumgebungen in die Projekte eingebracht wurden. Im ersten Schritt der Analyse wurden die Antragsunterlagen der Projekte untersucht. Besonderes Augenmerk lag hier auf den Arbeits- und Finanzierungsplänen sowie den beigefügten Angeboten der Testumgebungen. Die Leistungen der Testumgebungen an die Unternehmen wurden danach den in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellten Klassen zugeordnet.

Um die Projekte auch bei unterschiedlicher Größe untereinander vergleichbar zu machen, wurde der prozentuale Anteil der einzelnen Leistungen am Auftrag an die Testumgebungen berechnet. Berechnungsgrundlage waren die veranschlagten Kosten. Durch diesen Ansatz konnten Bedarfe an Infrastruktur, Kompetenzen und dem Partnernetzwerk vergleichbar aufgenommen werden. Weiterhin

wurde die Häufigkeit der Nachfrage nach einzelnen Leistungen erfasst. Im zweiten Schritt erfolgten Interviews mit den Unternehmen, in denen die aufgenommenen Daten diskutiert und gegebenenfalls angepasst wurden. Hierbei zeigten sich teilweise nicht im Angebot aufgeführte Aktivitäten.

Tabelle 1 Auswertung der nachgefragten Infrastruktur in Aufträgen an Industrie 4.0-Testumgebungen

Infrastruktur	Häufigkeit	Prozentuale Häufigkeit in allen Projekten
Werkzeugmaschinen	13	36%
Sensoren, Aktoren, Embedded Systems	9	25%
Server / Cloud / Plattformen	6	17%
Montagearbeitsplatz	4	11%
Kommunikationstechnologie	3	8%
Roboter	1	3%
Sonstige Betriebsmittel	1	3%
Verfahrenstechnische Anlagen	0	0%
Additive Fertigungsverfahren	0	0%
Fahrerloses Transportsystem (FTS)	0	0%
Planungs- und Simulationswerkzeuge	0	0%

5 Ergebnisse

Zunächst werden projektbezogene Erkenntnisse aus der Zusammenarbeit mit den Testumgebungen vorgestellt. Danach werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Nutzung der Infrastruktur, der Kompetenzen sowie des Partnernetzwerkes der Testumgebungen präsentiert. Hierzu werden die gesammelten Daten der Aufträge an die Testumgebungen ausgewertet.

5.1 Allgemeine Nutzung der Testumgebung

Der Fokus von Industrie 4.0-Testumgebungen liegt auf inhaltlich abgegrenzten Entwicklungen mit hoher Geschwindigkeit und der Durchführung effizienter Tests dieser Entwicklungen. Demnach konzentrieren sich die begleiteten Projekte auf ein klar definiertes Projektziel mit einem Umfang von durchschnittlich 185 000 Euro. Die Laufzeit der Vorhaben liegt bei durchschnittlich 10,3 Monaten und befindet sich damit nahe dem erlaubten Maximum von 12 Monaten. Kürzere Projektlaufzeiten von sechs bis neun Monaten werden zwar teilweise beantragt, stellen jedoch KMU und Forschungseinrichtungen vor große Herausforderungen, da beispielsweise die Verfügbarkeit von Entwicklungsmitarbeitern sehr genau geplant werden muss und die Testumgebung im vorhergesehenen Zeitabschnitt nicht anderweitig belegt sein darf.

Rückblickend beurteilen die Unternehmen sowohl den Projektumfang, als auch die Projektlaufzeit von 12 Monaten als sehr gut, da in kurzer Zeit ein merklicher Fortschritt erzielt werden konnte, ohne das Tagesgeschäft zu vernachlässigen. Zudem war es möglich, kleine Veränderungen im Projektablauf innerhalb der Laufzeit auszugleichen, was bei Projekten mit kürzerer Laufzeit teilweise zu Problemen führte. Zudem wird positiv angemerkt, dass die Projekte aufgrund ihrer Größe einen deutlich reduzierten Abstimmungsaufwand gegenüber Forschungsprojekten mit großen Konsortien erfordern. Inhaltlich werden in den Vorhaben keine kompletten Produkte, sondern nur einzelne, inhaltlich abgeschlossene Module entwickelt und getestet. Entgegen den ursprünglichen Überlegungen, dass innerhalb der Projekte vor allem getestet werden soll, nehmen Entwicklungsaufwände eine deutliche stärkere Rolle ein. Allen Projekten ist jedoch gemein, dass die Anforderungsdefinition abgeschlossen ist.

5.2 Infrastruktur

Die Infrastrukturnachfrage zeigt bei den aktuell durchgeführten Projekten eine deutliche Tendenz zu

den Bereichen Werkzeugmaschinen sowie Sensoren, Aktoren und Embedded Systems. Bereiche wie Additive Fertigungsverfahren, Fahrerlose Transportsysteme oder auch Planungs- und Simulationswerkzeuge wurden in den Projekten nicht nachgefragt. Kumuliert entfallen circa 29 % der Gesamtaufwände auf diese Kategorie. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Häufigkeitsverteilung der Infrastrukturnachfrage, wobei Mehrfachnennungen möglich sind.

Auffällig ist, dass die Infrastruktur der Testumgebungen in den Projekten besonders von Unternehmen der Branchen J und M nachgefragt werden. Bei Unternehmen der Branche C ist der Umfang der nachgefragten Infrastruktur geringer und stärker über die einzelnen aufgetretenen Bereiche gestreut. Die Infrastrukturen Werkzeugmaschinen sowie Sensoren, Aktoren und Embedded Systems nehmen einen hohen Anteil des Gesamtvorhabens ein und werden üblicherweise mit den entsprechenden Kompetenzen gemeinsam nachgefragt. Im Gegensatz dazu werden Montagearbeitsplätze nur in sehr geringem Umfang nachgefragt, da diese häufig bei den Unternehmen bereits vorhanden sind oder entsprechend günstig beschafft werden können.

5.3 Kompetenzen

Der Bereich Kompetenzen hat durchschnittlich einen Anteil von 66 % der Aufträge an die Testumgebungen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die nachgefragten Kompetenzen: Den Kompetenzen Kommunikationstechnik und Service- und Softwareentwicklung kommt in den durchgeführten Projekten große Bedeutung zu. Unter Einsatz von Kompetenzen der Kommunikationstechnik wird häufig die Anbindung bestehender Maschinen an Drittsysteme angestrebt. Die Nachfrage nach maschinennaher Kommunikationstechnik, vor allem OPC UA, ist branchenübergreifend gegeben. Größere und länger am Markt bestehende Unternehmen der Branche C lassen sich von den Testumgebungen stärker in der Entwicklung und Erprobung von neuen Softwareservices unterstützen, wohingegen vor allem kleinere Unternehmen mit weniger als 10 Mitarbeitern dies selbst übernehmen. Das Thema Big Data wird derzeit von KMU nur selten nachgefragt.

Tabelle 2 Auswertung der nachgefragten Kompetenzen in Aufträgen an Industrie 4.0-Testumgebungen

Kompetenzen	Häufigkeit	Prozentuale Häufigkeit in allen Projekten
Kommunikationstechnik	23	64%
Service- und Softwareentwicklung	16	44%
Werkzeugmaschinen	11	31%
Sensorik	10	28%
Embedded Systems und Elektronikentwicklung	6	17%
Plattformentwicklung	6	17%
Application Server und Middlewares	6	17%
Datenmanagement und Big Data	6	17%
Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	5	14%
KI, Simulation und Optimierung (Semantische Systeme)	5	14%
IT-Sicherheit, Datenschutz und Akzeptanz	4	11%
Verfahrenstechnische Anlagen	3	8%
Frontend (GUI, Apps, etc.)	2	6%
Business Process Engineering	1	3%
Sonstige Betriebsmittel	1	3%
Selbstkonfiguration von Komponenten und Systemen	1	3%
Geschäftsmodell	0	0
Arbeitsorganisation	0	0
Aktorik	0	0
Robotik	0	0
Additive Fertigungsverfahren	0	0

Montagearbeitsplatz	0	0
Fahrerloses Transportfahrzeug (FTS)	0	0

5.4 Nutzung des Partnernetzwerks

Wie bereits erwähnt, nimmt das Netzwerk der Testumgebungen eine untergeordnete Rolle innerhalb der Angebote ein. Kumuliert entfallen circa 5 % der Gesamtaufwände auf diese Kategorie. Die Interviews mit den Unternehmen zeigen jedoch, dass diese Position zwar selten explizit budgetiert wird, aber vor allem für Start-ups eine wichtige Rolle in der Zusammenarbeit spielt. Das Netzwerk der Testumgebungen wird dabei als Möglichkeit gesehen ein Feedback von möglichen Kunden zu erhalten, den Bekanntheitsgrad des entwickelten Produktes zu steigern und mögliche Entwicklungspartner zu finden. Genutzte Formate sind die Ausstellung des Projektes in Showrooms und auf Veranstaltungen oder die gemeinsame Präsentation der Lösung auf Messen und Expertenforen.

6 Fazit

Auch wenn die getroffenen Aussagen aufgrund des Stichprobenumfangs nicht als repräsentativ gesehen werden können, so deuten sich doch allgemeingültige Tätigkeitsschwerpunkte im Kontext der Digitalisierung an. Viele der KMU arbeiten aktuell an Sensoren und Schnittstellen mit dem Ziel der Informationsbereitstellung. Datenbasierte Services, Data Analytics oder Big-Data-Anwendungen sind dagegen selten in den Projekten angekommen. Zudem zeigt sich, dass KMU nicht nur Zugriff auf Infrastruktur, sondern auch Entwicklungskompetenzen benötigen.

Entsprechend der hier erarbeiteten Definition dürfen Testumgebungen nicht alleine auf die Bereitstellung von Infrastruktur reduziert werden. Vor allem Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes wünschen sich in Modulen abgeschlossene Entwicklungsleistungen. Für diese Unternehmen ist zudem die Unterstützung durch die Testumgebung in der Softwareentwicklung wichtig, da diese Kompetenzen im Unternehmen häufig unterrepräsentiert sind und der Zugriff auf geeignetes Personal kaum möglich ist.

Außerdem besteht allgemein der Wunsch, fortgeschrittene Entwicklungsleistungen möglichst während des Entwicklungsprozesses realitätsnah, beispielsweise bei einem Pilotkunden, zu testen. Diese Leistung kann von den Testumgebungen derzeit nur eingeschränkt oder durch das Partnernetzwerk erfüllt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wurde die Nutzung von Industrie 4.0-Testumgebungen durch KMU im Rahmen der Fördermaßnahme „Industrie 4.0-Testumgebungen – Mobilisierung von KMU für Industrie 4.0“ untersucht. Es zeigt sich, dass der organisatorische Rahmen kleiner Projekte mit begrenzter Laufzeit und klar definierten Anforderungen hohe Entwicklungsgeschwindigkeiten ermöglicht. Gleichzeitig wird der häufig mit Forschungsprojekten einhergehende Verwaltungs- und Abstimmungsaufwand stark reduziert.

Die untersuchten Projekte deuten an, dass sich Unternehmen der Informations- und Kommunikationsbranche sowie Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbau thematisch aufeinander zu bewegen. Vorherrschende Themenfelder sind die Ausstattung von Maschinen mit Sensorik zur Gewinnung von Maschinendaten und die Etablierung von Schnittstellen für den Zugriff auf diese. In diesem Bereich beschleunigen die Testumgebungen mit gezielt bereitgestellter Infrastruktur und Knowhow die Entwicklungen der Unternehmen schon heute deutlich und verfügen über die Fähigkeit, dies auch bei zukünftigen Themenstellungen zu ermöglichen.

Literatur

[1] DESTATIS Statistisches Bundesamt: Kleine & mittlere Unternehmen (KMU), Mittelstand. Stand 2016. Internet: <https://www.destatis.de/>. Zugriff am 13.11.2018

[2] Kagermann, H.: Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin: Springer Verlag 2017, S. 235-246

- [3] Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin: Springer Verlag 2017, S. 1-31
- [4] Andersch AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft: Paradigmenwechsel im deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Stand 2015. Internet: http://maschinenbau.andersch-ag.de/downloads/Studie_Andersch.pdf. Zugriff am 13.11.2018
- [5] Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, C.; et al.: Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand“. Agiplan 2015
- [6] Goerzig, D.; Luckert, M.; Aichele, A.; Bauernhansl, T.: Approaches for the Development of Digital Products in Small and Medium-sized Enterprises. WGP 2018, Advances in Production Research, 2019, pp. 574–583
- [7] BMBF: Bekanntmachung. Stand 2018. Internet: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1863.html>. Zugriff am 13.11.2018
- [8] Rauter, R.: Interorganisationaler Wissenstransfer. Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und KMU. Wiesbaden: Springer-Verlag 2013
- [9] Atzorn, H.-H.; Clemens-Ziegler, B.: Ermittlung von Hemmnisfaktoren beim Aufbau von Kooperationen von KMU mit Institutionen der Wissenschaft, insbesondere den Fachhochschulen HTW Berlin 2010
- [10] Kärcher, S.; Görzig, D.; Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Das Applikationszentrum Industrie 4.0 Werkstattstechnik wt online 109 (2019) 3, S.106-110
- [11] BMWi: Mittelstand 4.0-Kompetenzzentren unterstützen vor Ort. Stand 2017. Internet: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Artikel/Mittelstand-4-0/mittelstand-40-kompetenzzentren-gesamt.html>. Zugriff am 13.11.2018
- [12] Industrial Internet Consortium: Testbeds. Stand 2018. Internet: <https://www.iiconsortium.org/wc-testbeds.htm>. Zugriff am 13.11.2018
- [13] Plattform Industrie 4.0: Anwendungsbeispiele. Stand 2018. Internet: <https://www.plattform-i40.de>. Zugriff am 13.11.2018
- [14] Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige. Wiesbaden 2008
- [15] Erpenbeck, J.; Sauter, W.: So werden wir lernen!. Kompetenzentwicklung in einer Welt fühlender Computer, kluger Wolken und sinnsuchender Netze: Springer-Verlag 2013