

Potenziale für den Einsatz von Smart Services durch Software-Sensoren in der Produktion

Chancen und Herausforderungen von Software-Sensoren

E. Gross, M. Schneider, K. Fink, D. Breunig, M. Senk, P. Ohr, T. Bauernhansl

ZUSAMMENFASSUNG Software-Sensoren gewinnen in Produktion und Logistik zunehmend an Bedeutung, da sie komplexe Messaufgaben lösen und Messgrößen vorhandener physikalischer Sensoren fusionieren können. In diesem Beitrag werden daher die Potenziale von Software-Sensoren mittels eines explorativen Vorgehens untersucht und dargestellt. Hierbei werden die Gründe für den Einsatz sowie die Herausforderungen von Software-Sensoren dargestellt und anschließend diskutiert.

STICHWÖRTER

Sensoren, Software, Industrie 4.0

Chances and challenges of software sensors – Potential for smart services through software sensors in the production area

ABSTRACT Software sensors are becoming increasingly important in production and logistics, as they can solve complex measurement tasks and can merge measured variables from existing physical sensors. This article analyses and presents the potential for software sensors using an explorative approach. The reasons for using software sensors and the arising challenges are presented and then discussed.

1 Ausgangssituation und Motivation

Der Einsatz und die Vernetzung von Sensoren eröffnen neue Möglichkeiten zur Optimierung von Prozessen in industriellen Anlagen und Produkten, zum Beispiel in den Bereichen Qualität, Effizienz oder Nachhaltigkeit. Mit Sensoren werden bereits heute große Datenmengen generiert, die wertvolle Informationen über den Zustand, die Leistung und das Verhalten von Systemen und Produkten enthalten [1]. Für die gewünschten Funktionen oder Messwerte müssen dazu physische Sensoren in die Produktionsanlagen integriert werden, um den Zustand zu überwachen.

Die Installation und Wartung der Hardware ist in der Regel aufwendig. Neben der benötigten Hardware sind Fachpersonal und spezifisches Know-how nötig. Viele Daten werden jedoch bereits beim Betrieb von Anlagen auf Komponentenebene generiert oder können durch übergeordnete Sensorik erfasst werden, wie etwa Lastmoment oder Drehmoment bei Servomotoren. Dabei spielt die Interpretation der Daten eine wichtige Rolle sowie die Abstraktion von Ergebnissen und Schlussfolgerungen. Beispiele sind die Verfolgung von Material in Zonen oder die Überprüfung, ob die Qualität von Produkten aufgrund vorheriger Messwerte der Umgebungsparameter in Ordnung ist. Dabei gewinnt die Bereitstellung von Messwerten ohne Interpretationsbedarf und damit die reine Informationsbereitstellung beziehungsweise Aussage des Messwerts immer mehr an Bedeutung [2].

Konventionelle Sensorik stößt jedoch oft an ihre Grenzen, wenn es um die Erfassung komplexer Zusammenhänge geht, die nicht direkt oder nur mit hohem Aufwand messbar sind [3, 4]. Beispiele sind die Temperaturverteilung in einem Reaktor, die Viskosität einer Flüssigkeit, die Konzentration eines Stoffes in

einer Lösung oder die Position eines Objekts in einem Raum. Solche Größen können nur indirekt aus anderen Messwerten abgeleitet oder geschätzt werden, was einen hohen Rechenaufwand und mathematische Modelle erfordert [5].

Es ist davon auszugehen, dass Software-Sensoren, oft auch als Soft-Sensoren oder virtuelle Sensoren bezeichnet, zunehmend an Bedeutung gewinnen werden. Das Konzept des Software-Sensors ist nicht neu, aber erst jetzt stehen die nötige Rechenleistung, die erforderlichen Daten sowie deren Vernetzung über IIoT (Industrial Internet of Things)-Infrastrukturen in Kombination zur Verfügung. Sie eröffnen durch maschinelles Lernen (ML) neue Anwendungsbereiche im Bereich der Sensorik und der Informationserfassung und -auswertung.

In diesem Beitrag wird unter Software-Sensoren die Substitution oder Ergänzung bestehender Sensorik durch Softwaremodelle oder andersartige Sensoren mit zusätzlicher Softwareverarbeitung verstanden. Ziele von Software-Sensoren sind die Reduktion von Aufwänden, wie etwa Kosten, Installation, Dokumentation, Konfiguration oder Wartung von Sensorik, und die Erweiterung von Funktionalitäten, etwa bessere Datenqualität, Zusatzinformationen, Vorhersagen über Zustände oder Positionen von Produkten oder Anlagen mittels Sensorfusion, also die Kombination verschiedener Messdaten von physischen Sensoren. Vor diesem Hintergrund gibt der Beitrag einen Überblick über die verschiedenen Arten, Anwendungen und Herausforderungen von Software-Sensoren. Dazu werden Beispiele aus aktuellen Forschungsprojekten sowie aus der Praxis vorgestellt. Dabei wird sowohl die technische als auch die ökonomische und ökologische Bedeutung von Software-Sensoren für die Industrie 4.0 hervorgehoben.

Es wurde eine Kurzstudie zum aktuellen Stand und zur Relevanz von Software-Sensoren und deren Einsatz in der Industrie durchgeführt. Die Studie verfolgt einen explorativen Ansatz aus Expertenworkshops, Wettbewerbsanalyse sowie einer Online-Befragung. Die Ergebnisse zeigen, welche Einsatzfelder für Software-Sensoren besonders nachgefragt werden, was der Mehrwert von Software-Sensoren ist, welche Herausforderungen und Barrieren bei der Umsetzung bestehen und wie die Verbreitung und Akzeptanz von Software-Sensoren in verschiedenen Branchen und Unternehmensgrößen ist.

2 Grundlagen zu Software-Sensoren

Ein Software-Sensor ist eine Software-Emulation oder ein Berechnungsmodell, das die Funktionalität eines physischen Sensors darstellt beziehungsweise erweitert [4–7]. Die Funktionsweise basiert auf physischen Sensordaten, Benutzereingaben oder anderen verfügbaren Informationen über das System [7, 8]. Software-Sensoren können physikalische Größen, Systemzustände oder Indikatoren vorhersagen oder schätzen, die mit herkömmlichen physikalischen Sensoren aufgrund größerer Messverzögerungen, technologischer und wirtschaftlicher Einschränkungen sowie eines komplexen Umfelds nur schwer direkt messbar sind [3–5, 9, 10]. Diese Schätzungen basieren oft auf mathematischen Modellen, statistischen Methoden oder maschinellem Lernen [7, 9].

Software-Sensoren sind als Ergänzung zu physischen Sensoren konzipiert, können jedoch auch als Alternative dienen, vor allem wenn Hardware-Sensoren nicht verfügbar sind oder ihre Implementierung aufgrund von Problemen und Einschränkungen herausfordernd ist [9, 11]. Ihr Einsatz ist mit Vorteilen wie der Stabilisierung von Abläufen, der Reduktion des Energie- und Materialverbrauchs sowie der Überprüfung der Leistung von Hardwaresensoren verbunden [5, 11]. In der vorhandenen Literatur zu Software-Sensoren wird darauf hingewiesen, dass die Modellpflege ein kritischer Aspekt bei der Verwendung von Software-Sensoren ist. Dies ist darin begründet, dass sich die Schätzleistung solcher Sensoren durch Änderungen der Prozessmerkmale, Betriebsbedingungen und Eingabeinformationen verschlechtern kann [12, 13].

Souza et al. [13] weisen auf weitere Herausforderungen hin, die mit der Nutzung von Software-Sensoren einhergehen können. Dazu zählen verrauschte oder fehlende Daten, Ausreißer, Stichproben und Verzögerungen bei den Messungen [13]. Dennoch können die Modelle der Software-Sensoren auf verschiedene Anwendungen angepasst und optimiert werden, was die Einsatzflexibilität steigert. Gemäß *Šabanović et al.* [14] erlauben virtuelle Sensoren die Fusion von Daten aus verschiedenen Quellen, um neue Erkenntnisse oder Schätzungen zu generieren. So können zuverlässigere und genauere Eingangsdaten erzielt werden, was wiederum Messfehler und Unsicherheiten reduziert [14].

2.1 Anwendungsbeispiele für Software-Sensoren

Die Stahlindustrie setzt Software-Sensoren zur Prozessüberwachung, Fehlererkennung und Validierung ein [5, 12], weil sie weniger beziehungsweise nicht invasiv sind, nicht direkt in den Prozess eingreifen und somit auch außerhalb des Bearbeitungsraumes einer Maschine platziert werden können. Beispielsweise können Software-Sensoren den Zustand von Sägeblättern über eine Strommessung ermitteln. Dazu wird der Strom an der

Stromzuführung erfasst und über einen Softwarealgorithmus wird der Verschleiß des Sägeblattes ermittelt [15]. Dadurch muss kein Sensor in der Nähe der Bearbeitung angebracht werden, wo erschwerte Bedingungen wie Späneflug, Kühlsmierstoffe und Vibrationen auftreten. Dabei werden Daten von verschiedenen physikalischen Sensoren fusioniert und zu einer Information verarbeitet, die dem Anwender einen eindeutigen Zustand anzeigt. Neben der Datenfusion liegt der Vorteil von Software-Sensoren darin, dass sie auch in schwer zugänglichen oder gefährlichen Bereichen eingesetzt werden können.

Eine weitere Grundlage für Software-Sensoren sind Kameras. Ihre Daten enthalten große Mengen an Informationen hinsichtlich physischer Beschaffenheit, es stehen umfangreiche Soft- und Hardwaretechnologien zur Verfügung und durch Anwendungen der Qualitätskontrolle, Robotik und des Fahrzeugsehens sind die Technologien nah an oder bereits in industrieller Verwendung. Kameras in industriellen Prozessen werden heute als Informationslieferanten für Identifikation, Inspektion oder Qualitätsbestimmung integriert. Das Datenpotenzial, das in Bildern steckt, etwa zu Positionen oder Maßen, wird nur gering genutzt. Auch sind die etablierten Kamerasysteme technisch stark abgeschlossen und verfügen nur über proprietäre, vordefinierte und eingeschränkte Funktionen, die auf spezielle Anwendungsfälle ausgerichtet sind und keine generellen Lösungen bieten. Kameras in Kombination mit leistungsfähiger, generalisierter Datenverarbeitung können bisherige Sensorik ersetzen oder Prozesse dynamischer gestaltbar machen. So ist beispielsweise die Anwendung von Kameras zur Werkstückpositionierung bereits erfolgreich untersucht. Sie zeigt Fähigkeiten zur Positionierung mit weniger als 0,2 mm translatorischem und 0,1° rotatorischem Fehler, ohne mechanische Vorgaben oder andere Sensoren [16]. Durch das zwei- oder dreidimensionale Erfassungsfeld, das im Gegensatz zu klassischen Sensoren nicht punktuell arbeitet, kann ein Kamera-Software-Sensor prinzipiell mehrere klassische Sensoren ersetzen. Durch den größeren physischen Abstand der Kamera zum Prozess werden Sensorik-Beeinträchtigungen durch Schwingungen oder Verschmutzung von Anfang an vermieden.

3 Beschreibung des Vorgehens

Im Rahmen einer explorativen Studie wurde ein Workshop mit Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung durchgeführt. Aus dem Elektronikbereich vertreten waren Solution Engineering, Vertrieb, Business Development und Produkt Management sowie forschungsseitig Digitalisierungsstrategien, Batteriefertigung und IIoT-Anwendungen. In dem Expertenworkshop wurden Einsatzszenarien für Softwarelösungen in der Produktion erarbeitet, priorisiert und erste Hypothesen im Bereich der Herausforderungen aufgestellt. Auf Basis der Hypothesen wurde das Thema Software-Sensor als Use Case identifiziert. Anschließend wurden potenzielle Marktbegleiter, die im Bereich Elektronik und Sensorik tätig sind, identifiziert.

Im Rahmen einer Wettbewerbsanalyse auf der Messe Smart Production Solutions (SPS) in Nürnberg analysierten sie den Wettbewerb weiter. Dabei wurde deutlich, dass keine passenden Produkte im Bereich der Software-Sensorik angeboten werden. Jedoch ist das Thema Software-Sensorik interessant und vereinzelt werden bereits Machbarkeitsstudien und Konzepte vorangetrieben. Eine Online-Umfrage auf Basis der Wettbewerbsanalyse und der Hypothesen umfasste qualitative sowie quantitative



Bild 1. Vorgehen der explorativen Studie. Grafik: Fraunhofer IPA

Fragen. Bei der Gestaltung der Umfrage wurde großer Wert auf Freitexte (hoher qualitativer Anteil) gelegt. Die Teilnehmenden wurden aktiv aufgefordert und so wenig wie möglich Antworten vorgegeben. Das Vorgehen lässt sich in drei Phasen unterteilen: die Orientierungsphase, die Fokussierungsphase und schließlich die Entwicklung der Roadmap (nicht Bestandteil des Beitrags). Die Vorgehensweise ist in Bild 1 dargestellt.

Die Online-Umfrage fand im Dezember 2023 statt und umfasste insgesamt 74 Teilnehmende aus mehr als neun Industriebranchen, darunter Maschinen- und Anlagenbau, Automobil und Zulieferer, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Prozessindustrie, Elektrotechnik, Metallindustrie und Metallverarbeitung, IT, Medizintechnik und Biotechnologie sowie weitere Branchen ohne Detaillierung. Der größte Teil der Teilnehmer (34) kam aus dem Maschinen- und Anlagenbau gefolgt von Automobil und Zulieferer (9) sowie Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (9). Insgesamt 44 der Befragten kamen aus Unternehmen mit einer Mitarbeitendenzahl zwischen 50 und 3000. Sie waren zum großen Teil im Bereich Entwicklung, Konstruktion und Produktion (41 von 73 Befragten) tätig. Der kleinere Teil der Befragten war im Bereich Beschaffung, Instandhaltung, Geschäftsführung, Planung, Qualität oder Innovationsmanagement tätig. Die Ergebnisse aus dem Workshop, der Wettbewerbsanalyse sowie der Online-Umfrage gliedern sich in folgende Abschnitte:

- Einsatzgebiete und Herausforderungen beim Einsatz von Sensoren
- Potenziale beim Einsatz von Software-Sensoren
- Herausforderungen, Anforderungen und Erfahrungen mit Software-Sensoren

Basierend auf der Auswertung der quantitativen Online-Umfrage wurden Meinungsbilder entworfen, die die aufgestellten Hypothesen validieren beziehungsweise falsifizieren. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt und diskutiert.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse des Expertenworkshops

In dem in Kapitel 3 erwähnten Expertenworkshop zu Einsatzszenarien für Software-Lösungen in der Produktion wurden die folgenden Hypothesen als Anforderungen für softwarebasierte Lösungen identifiziert und definiert. Die Lösung soll

- die Inbetriebnahmezeit von Maschinen und Anlagen reduzieren
- die Anzahl der Schnittstellen reduzieren
- dem Fachkräftemangel entgegenwirken
- die Ersatzteilebeschaffung vereinfachen
- für den Anwender einfach und nicht komplex sein
- Hardwareaufwände reduzieren

Anschließend wurden verschiedene Use Cases im Bereich Software-Lösungen für die Produktion erstellt und priorisiert. Dann wurde das Thema der Software-Sensorik priorisiert und weitere Analyseschritte festgelegt, wie der aktuelle Stand der Industrie zu diesem Thema mittels Wettbewerbsanalyse und Online-Umfrage.

4.2 Wettbewerbsanalyse

Die Wettbewerbsanalyse identifizierte 16 Unternehmen, die auf der SPS-Messe in Nürnberg befragt und anschließend analysiert wurden. Dabei wurde erhoben, ob die Unternehmen in diesem Bereich aktiv sind und bereits Produkte auf dem Markt platziert haben und ob das Thema Software-Sensorik generell eine Relevanz für die Unternehmen hat. Es wurde festgestellt, dass keines der untersuchten Unternehmen Produkte im Bereich der Software-Sensorik anbietet, die über die konventionelle Erfassung zum Beispiel mit Bilderkennung hinausgehen. Zehn der befragten Unternehmen gaben an, dass Software-Sensorik für sie thematisch relevant ist. Sieben davon sind in diesem Bereich aktiv und fokussieren sich bei der Entwicklung neuer Lösungen auch auf das Thema Software-Sensorik.

4.3 Online-Umfrage

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Online-Befragung zum Thema Software-Sensorik vorgestellt, die auf Basis des Expertenworkshops und der Wettbewerbsanalyse konzipiert und durchgeführt wurde. Die ersten Fragen erfassen den aktuellen Stand der Unternehmen zu „Einsatzgebiete und Herausforderungen beim Einsatz von Sensoren“. Danach werden die „Potenziale beim Einsatz von Software-Sensoren“ diskutiert und abschließend die Ergebnisse zu „Herausforderungen, Anforderungen und Erfahrungen mit Software-Sensoren“ dargestellt.

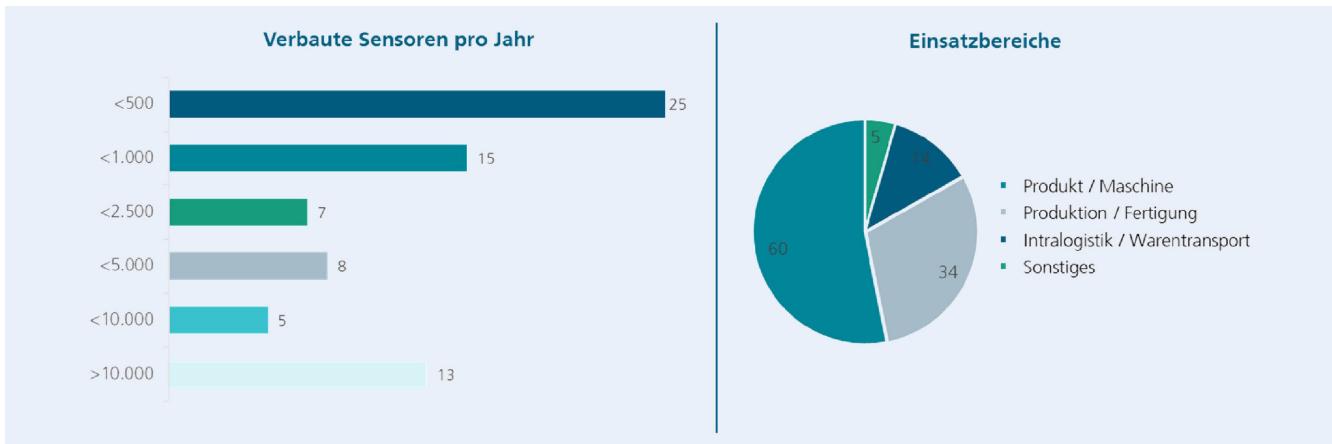


Bild 2. Verbaute Sensoren pro Jahr (n=73) und Einsatzgebiete für Sensoren (n=71). Grafik: Fraunhofer IPA

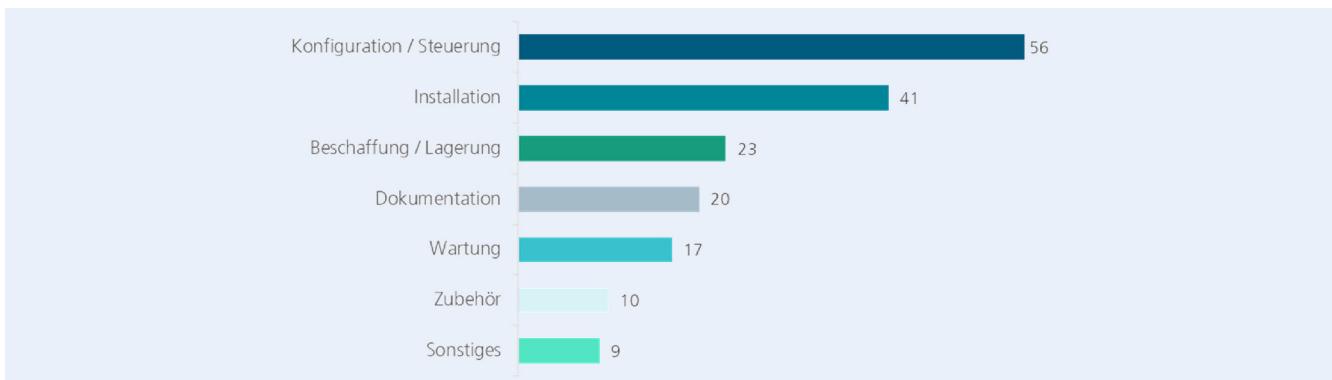


Bild 3. Herausforderungen bei der Implementierung von Sensoren (n=73). Grafik: Fraunhofer IPA

4.3.1 Einsatzgebiete und Herausforderungen beim Einsatz von Sensoren

Dieser Abschnitt thematisiert die Einsatzgebiete von konventionellen Sensoren sowie die Herausforderungen und allgemeinen technologischen Trends im Bereich der Sensoren aus der Online-Umfrage. Die Teilnehmenden wurden gefragt, wie viele Sensoren pro Jahr bei ihnen verbaut werden und wo Sensoren eine Rolle spielen. Ziel war zu erfahren, welche Anzahl an Sensoren die befragten Unternehmen pro Jahr verbauen (Einfachnennung) und in welchen Bereichen die Unternehmen Sensoren einsetzen (Mehrfachnennung). 25 der Unternehmen gaben an, weniger als 500 Sensoren pro Jahr zu verbauen, 15 verbauen weniger als 1000 Sensoren pro Jahr, sieben weniger als 2500 und acht weniger als 5000 Sensoren pro Jahr. Weitere fünf Unternehmen gaben an, weniger als 10 000 Sensoren pro Jahr zu verbauen und 13 Unternehmen verbauen mehr als 10 000 Sensoren pro Jahr. Die 13 Unternehmen, die mehr als 10 000 Sensoren pro Jahr verbauen, verteilen sich auf Unternehmensgrößen von 250 bis über 10 000 Mitarbeiter und auf verschiedene Branchen.

Bei den Einsatzbereichen der konventionellen Sensorik liegt der Fokus auf der Integration in Produkte oder Maschinen. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil an Maschinen- und Anlagenbauern bei der Umfrage zurückzuführen. Der zweitwichtigste Bereich ist die eigene Produktion oder Fertigung mit 34 Nennungen, gefolgt von der Intralogistik beziehungsweise dem Warentransport mit 14 Nennungen. Als weitere Anwendungsbereiche von Sensoren wurde der Einsatz in der Gebäudetechnik oder in

indirekten Bereichen genannt. Die Ergebnisse der beiden Fragen sind in Bild 2 dargestellt.

Als Hauptherausforderung bei der Implementierung von Sensoren wurde mit 56 Nennung die Konfiguration beziehungsweise die Steuerung der Sensorik genannt, gefolgt von der Installation mit 41 Nennungen. Weitere Herausforderungen waren die Beschaffung und Lagerung der Sensorik mit 23 Nennungen, die Dokumentation mit 20 Nennungen, die Wartung mit 17 Nennungen und Zubehör mit 10 Nennungen. Als sonstige Herausforderungen wurden Aspekte zur Datenauswertung, Optimierungen und Sicherheitsaspekte angegeben. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt.

Zudem wurden die Teilnehmenden gefragt, welche technologischen Trends oder Entwicklungen sie im Bereich der Sensorik verfolgen. Die folgende Frage thematisiert die für die Unternehmen relevanten Entwicklungstrends im Bereich der Sensorik. Sie wurde als Freitext abgefragt und anschließend aggregiert, da Antwortmöglichkeiten in Form eines Freitextes sehr vielschichtig sind. 16 der Teilnehmenden gaben an, dass sie I/O-Link als Trend beziehungsweise Entwicklung in der Sensorik verfolgen, um die Konnektivität zu den Sensoren effektiver und effizienter zu gestalten. Jeweils vier Teilnehmende nannten Single Pair Ethernet und Kamera beziehungsweise Bildverarbeitung als Trends, die ihr Unternehmen verfolgt. Als weitere Trends wurden etwa die Advanced-Physical-Layer-Technologie, verschiedene Ansätze der künstlichen Intelligenz zur Datenanalyse, Trends, die sich mit dem Design und der Leistungsfähigkeit verschiedener spezifischer Sensoren befassen sowie weitere spezifische Konnektivitäts- und Anwendungsfelder.

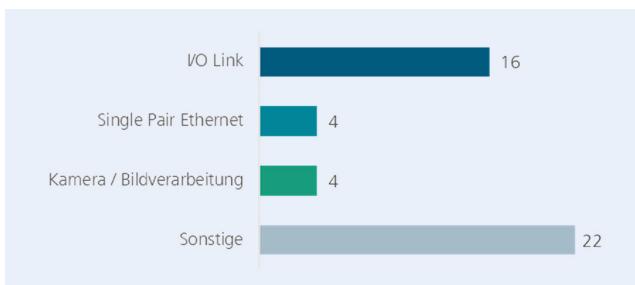


Bild 4. Entwicklungstrends im Bereich der Sensorik (n=43).
Grafik: Fraunhofer IPA

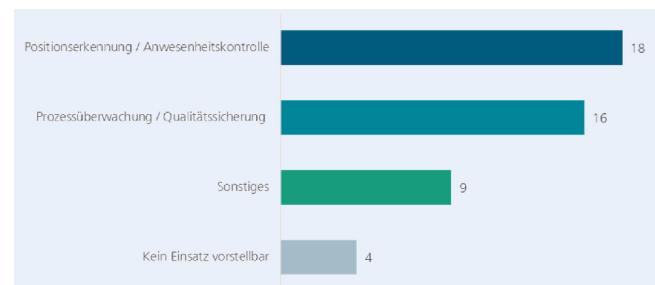


Bild 5. Heutige Einsatzbereiche von Software-Sensoren bei den befragten Unternehmen (n=44). Grafik: Fraunhofer IPA

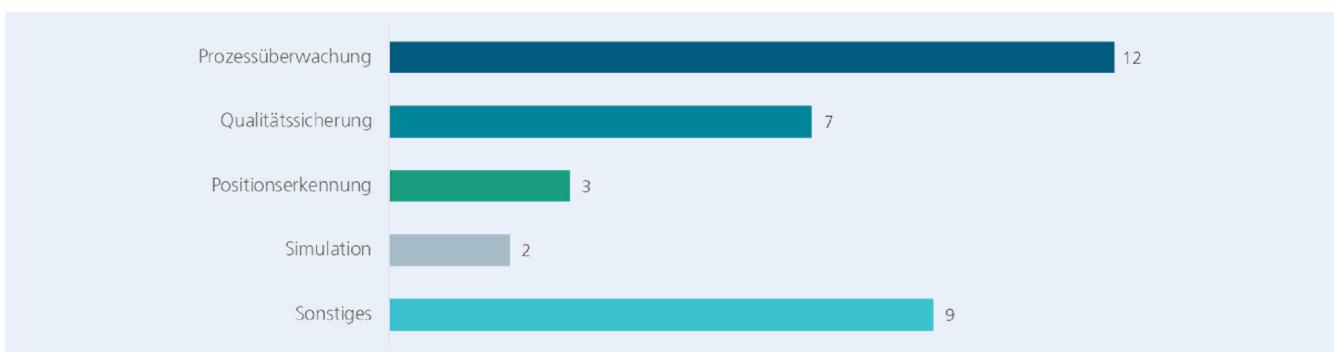


Bild 6. Potenzielle Anwendungsgebiete für den Einsatz von Softwaresensoren (n=33). Grafik: Fraunhofer IPA

tivitäts- und Sicherheitstechnologien genannt. Die Ergebnisse sind in **Bild 4** dargestellt.

4.3.2 Potenziale beim Einsatz von Software-Sensoren

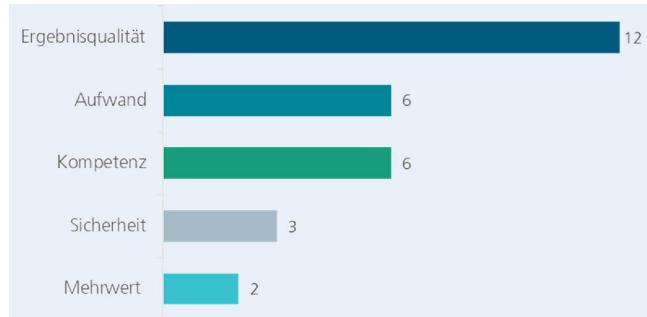
Dieser Bereich adressiert die relevanten Anwendungsgebiete für den Einsatz von Software-Sensoren sowie konkrete Nutzenpotenziale für Software-Sensoren. Hierzu wurden die Teilnehmenden mittels Freitext gefragt, welche Sensorik heute eingesetzt wird und wo sie sich den Ersatz durch Software-Sensorik vorstellen können. Die Antworten wurden anschließend aggregiert.

Am häufigsten wurde die Positionserkennung beziehungsweise Anwesenheitskontrolle von Waren und Bauteilen genannt. Viele gaben an, dass sie zur Positionserkennung Sensoren zur Abstandsmessung oder Lichtschranken zur Anwesenheitskontrolle einsetzen. Die Substitution dieser konventionellen Systeme durch kamerabasierte Software-Sensoren sei hier denkbar. Als weiterer Aspekt wurde die Prozessüberwachung beziehungsweise Qualitätssicherung genannt. Hier setzen die Teilnehmenden vor allem Temperatur- und Drucksensoren ein, aber auch Füllstands- und Durchflusssensoren sowie Sensoren zur Erfassung von Kräften und Schwingungen. Ein Teilnehmer gab an, dass hier der Einsatz von Software-Sensorik durch Sensordatenfusion und ein Modell zur Qualitätsvorhersage aus dem Software-Sensor möglich ist. Ein weiterer Teilnehmer führte an, dass die Berechnung physikalischer Pumpengrößen über die Erfassung der Antriebsdaten und zusätzlicher Peripheriedaten mit einem Software-Sensor möglich ist. Unter Sonstiges erwähnte ein Teilnehmer, dass Stromzangen im Einsatz sind und weitere Messaufgaben mit Software-Sensorik durchgeführt werden können. Ein weiterer Teilnehmer gab an, dass Software bereits im Einsatz ist, jedoch nur zur Verifizierung von Messungen und nicht als eigenständiger Sensor. Vier Teil-

nehmer gaben an, dass der Einsatz von Software-Sensorik für sie nicht vorstellbar ist. Die Ergebnisse sind in **Bild 5** dargestellt.

Weiter wurde gefragt, in welchen Anwendungsgebieten das größte Potenzial für den Einsatz von Software-Sensoren liegt. Elf der Befragten nannten die Prozessüberwachung. Hier wurde vor allem die Ermittlung von Größen genannt, die nur schwer oder sehr aufwendig und teuer mit hinreichender Genauigkeit zu messen sind, etwa bei Verbrennungs- oder chemischen Prozessen. Auch der Einsatz von Kameras zur Bestimmung von Schüttvolumina wurde als interessanter Anwendungsfall für die Software-Sensorik genannt. Auch in der Antriebstechnik wird ein großes Potenzial für Software-Sensoren gesehen, zum Beispiel bei der Verschleißerkennung durch Strommessung. Im Bereich der Qualitätssicherung sehen acht Teilnehmer Potenziale für den Einsatz von Software-Sensorik, vor allem in der individuellen Anwesenheits- und Fehlererkennung. Außerdem nannten drei Teilnehmer Anwendungsfälle für die Positionserkennung mit Kameratechnik auf Basis von Software-Sensorik mit KI-Algorithmen. Zwei weitere Teilnehmer nannten Simulation als relevantes Anwendungsgebiet. Im Bereich Sonstiges gab ein Teilnehmer die Intralogistik als interessanten Einsatzbereich für Software-Sensoren an. Die Ergebnisse sind in **Bild 6** dargestellt.

Die Teilnehmenden wurden auch nach dem Nutzen gefragt, den sie im Einsatz von Software-Sensoren sehen. Die Antworten waren als Freitext möglich und wurden anschließend aggregiert. 14 der Befragten nannten Aspekte zur Funktionalität von Software-Sensoren. Hier wurde als Vorteil von Software-Sensoren genannt, dass Daten oder Informationen generiert werden können, die sich mit konventioneller Sensorik nicht erfassen lassen. Auch wurde angeführt, dass durch Software-Sensoren mehr Daten zur Verfügung stehen und bessere Analysemöglichkeiten bestehen. Durch eine KI-basierte Implementierung kann beispielsweise eine individuelle Teileerkennung durchgeführt wer-

**Bild 7.** Nutzen von Software-Sensoren (n=32). Grafik: Fraunhofer IPA**Bild 8.** Probleme und Herausforderungen bei der Einführung von Software-Sensoren (n=27). Grafik: Fraunhofer IPA

den. Dies erhöht die Funktionalität der Software-Sensorik im Vergleich zur konventionellen Sensorik. Neben dem Zugewinn an Funktionalität wurden auch die virtuelle Entwicklung und Optimierung als positive Aspekte genannt. Als zweithäufigster Nutzen wurde von acht Teilnehmern die Hardware-reduktion angegeben. Hier wurden vor allem die Einsparung von Hardware, die Reduzierung der Lagerhaltung, die Einsparung von Verkabelung und die Bauraumoptimierung genannt. Ein weiterer Aspekt, der von sechs Teilnehmern genannt wurde, ist die Einfachheit. Die Teilnehmer gaben an, dass durch die Software-Sensorik Fertigungs- und Kalibrierungsschritte eingespart werden können, die Konfiguration einfacher ist und eine Nachrüstung mit geringerem Aufwand als bei physischen Sensoren durchgeführt werden kann. Auch die Flexibilität wird mit sechs Nennungen als Vorteil der Software-Sensorik genannt. Unter diesem Aspekt wurde die Breite der Einsatzmöglichkeiten und die individuelle Anpassbarkeit genannt. Die Aspekte zum Nutzen sind in **Bild 7** dargestellt.

4.3.3 Herausforderungen, Anforderungen und Erfahrungen mit Software-Sensoren

In diesem Bereich werden Probleme und Herausforderungen beim Einsatz und Anforderungen an das Design von Software-Sensoren diskutiert sowie Erfahrungen und konkrete Anwendungsfälle beim Einsatz von Software-Sensoren abgefragt.

Dazu wurden die Teilnehmenden gefragt, welche Probleme und Herausforderungen es beim Einsatz von Software-Sensoren gibt. 19 der Befragten nannten Probleme oder Herausforderungen hinsichtlich der Ergebnisqualität. Hier äußerte die Mehrheit der Teilnehmer, dass die Ergebnisse hinreichend genau und nachvollziehbar sein müssen und die ermittelten Werte auch valide sind und den tatsächlichen Werten entsprechen müssen. Zuverlässigkeit und Richtigkeit sind somit wichtige Anforderungen an Software-Sensoren. Des Weiteren wurde unter dem Aspekt der

Ergebnisqualität genannt, dass für eine erfolgreiche Verbreitung von Software-Sensoren die Akzeptanz sowohl im eigenen Unternehmen als auch bei den Kunden vorhanden sein muss.

Als zweitgrößte Herausforderung wurde von sechs Personen der Aufwand genannt. Hierzu zählten vor allem der hohe Programmieraufwand, die Integration mit anderen Systemen und die Pflege der verschiedenen Varianten der Software-Sensorik. Damit im Zusammenhang steht die Kompetenz der Mitarbeiter, die ebenfalls von sechs Teilnehmern genannt wurde. Die Kompetenz im Bereich Software und das entsprechende Domänenwissen, um die Software-Sensoren entsprechend zu gestalten, stehen hier im Fokus. Drei weitere Teilnehmende nannten im Bereich Sicherheit Aspekte der funktionalen Sicherheit, der Redundanz und des Datenschutzes. Schließlich erwähnten zwei Teilnehmende, dass es aufgrund der hohen Kosten von Software-Sensoren schwierig sei, einen Mehrwert aufzuzeigen. Die Ergebnisse sind in **Bild 8** zusammengefasst.

Es wurde auch gefragt, wie Software-Sensorik gestaltet sein muss, damit sie für Unternehmen interessant ist. Die Antworten konnten als Freitext eingetragen werden und wurden anschließend aggregiert. Als wichtigste Anforderung an die Gestaltung von Software-Sensorik nannten 17 Befragte, dass diese günstig sein beziehungsweise zu einem geringen Preis angeboten werden muss. Bezuglich des Preises gaben die Teilnehmer ein Spektrum von 100 € bis 1000 € an. Zudem merkten die Teilnehmer an, dass die Kosten für Software-Sensoren unter Berücksichtigung des Installationsaufwandes kostenneutral oder nicht wesentlich höher als bei konventionellen Sensoren sein sollten. Langfristig sollte aber ein Kostenvorteil durch den Software-Sensor entstehen. Die Einfachheit von Software-Sensoren wurde von 15 Teilnehmern als weitere Anforderung genannt. Dabei ist wichtig, dass die Software-Sensorik benutzerfreundlich gestaltet ist und dem Anwender fertige Lösungen zur Verfügung gestellt werden. Auch die einfache Implementierung oder Inbetriebnahme und Integration in bestehende Systeme wurde hervorgehoben. Dabei wurde betont, dass die Integration ohne spezielle Vorkenntnisse und ohne Programmierkenntnisse erfolgen muss.

Als weiterer Aspekt wurde von fünf Teilnehmenden die Ausfallsicherheit genannt. Hier sei es wichtig, dass der Software-Sensor robust ist und eine lange Lebensdauer hat, wobei sich hier die Lebensdauer auf die physischen Komponenten beziehen darf. Zudem sollte der Software-Sensor zuverlässig und sicher sein und eine hohe Verfügbarkeit aufweisen. Zwei weitere Personen gaben an, dass der Software-Sensor eine 1:1-Austauschbarkeit mit konventioneller Sensorik aufweisen muss. Weitere Anforderungen beziehen sich etwa auf die Gestaltung des Leistungsangebots des Software-Sensors in Form eines App Stores und auf das Geschäftsmodell, also dass beim Software-Sensor nur die Software über Lizenzkosten bepreist werden soll. Die Ergebnisse sind in **Bild 9** dargestellt.

Abschließend wurden die Teilnehmenden gefragt, ob sie bereits Erfahrungen mit Software-Sensoren haben und was ihre konkreten Use Cases im Zusammenhang mit Software-Sensoren im Unternehmen sind. Hierzu konnte wieder über Freitext geantwortet werden. 49 der Befragten antworteten, dass sie keine Erfahrung mit Software-Sensoren haben. 24 gaben an, Erfahrungen mit Software-Sensoren zu haben. Als konkrete Use Cases im Unternehmen gaben sieben der Teilnehmenden eine Positionserkennung mit Kameratechnik an. Zum Beispiel werden Objekte im Raum detektiert und die Information an einen autonom arbei-

tenden Roboter weitergegeben oder eine Vollständigkeitskontrolle mit dem Software-Sensor durchgeführt. Als weitere Use Cases nannten fünf Befragte die Prozessüberwachung mit Kameratechnik oder auch mit elektrischen Daten. Darüber hinaus geben zwei Personen an, dass sie Lösungen zur Qualitätssicherung und vier Personen, dass sie sonstige Lösungen einsetzen. Die Ergebnisse der beiden Fragen sind in **Bild 10** dargestellt.

5 Diskussion und Ausblick

Die Kurzstudie verdeutlicht, dass das Thema Software-Sensorik nicht neu ist und es bereits einfache Lösungen auf dem Markt gibt, etwa die konventionelle Bilderkennung, die per Definition der Software-Sensorik zuzuordnen ist. Sucht man jedoch nach komplexeren, flexiblen und verketteten Lösungen der Software-Sensorik in der industriellen Fertigung, so stellt man fest, dass es zwar in der wissenschaftlichen Literatur bereits einige Konzepte gibt, das Thema in der praktischen Umsetzung aber noch am Anfang steht. Dies verdeutlichen die Ergebnisse der Wettbewerbsanalyse und der Online-Befragung im Rahmen dieser Studie.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein ausgereiftes einheitliches Verständnis von Software-Sensorik fehlt und komplexere Angebote von Software-Sensorik noch nicht auf dem Markt existieren. Als wesentliche Herausforderungen für den Einsatz von Software-Sensorik werden die Sicherstellung der Ergebnisqualität, der hohe Aufwand für die Implementierung, die fehlende Kompetenz in diesem Bereich, die hohen Sicherheitsanforderungen und der fragliche Mehrwert gegenüber konventioneller Sensorik genannt. Dem stehen der erwartete Nutzen durch höhere Funktionalität, Hardwarereduktion, Einfachheit und höhere Flexibilität gegenüber.

Aus den Antworten der Online-Befragung geht hervor, dass Software-Sensoren als kostengünstige, einfache und ausfallsichere Gesamtlösungen angeboten werden müssen, um für Anwenderunternehmen attraktiv zu sein. Dabei sind auch Systemlösungen zu berücksichtigen, welche nur durch Sensorfusion möglich sind, da Messwerte eventuell nur indirekt und durch Kombination verschiedener physikalischer Sensoren erfasst werden können. Dies kann jedoch die Komplexität des Systems wieder erhöhen. Anbieterunternehmen stehen daher vor der Herausforderung, die Bedürfnisse ihrer Kunden zu identifizieren, um geeignete Soft-

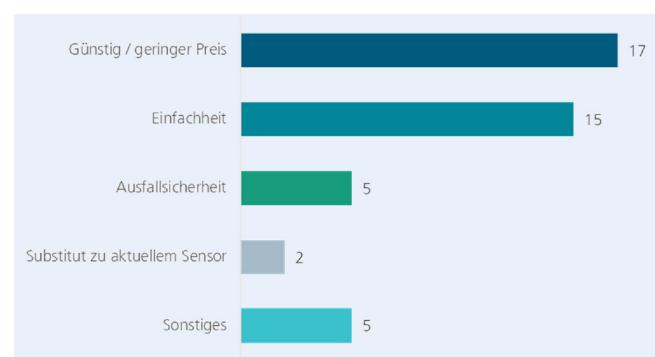


Bild 9. Anforderungen an die Gestaltung von Software-Sensorik (n=32).
Grafik: Fraunhofer IPA

ware-Sensor-Lösungen für relevante Anwendungsfälle zu konzipieren. Dabei ist es wichtig, eine geeignete Strategie für das Angebot von Software-Sensoren zu entwickeln.

Um den Anforderungen an eine einfache und flexible Nutzung von Software-Sensoren gerecht zu werden, ist es wichtig, geeignete Geschäftsmodelle zu entwickeln und den Kunden modulare und skalierbare Smart Services durch Software-Sensoren zur Verfügung zu stellen. Dabei müssen sich die anbietenden Unternehmen die Frage stellen, ob und mit welchen Unternehmen sie kooperieren, um als Ökosystem den Kunden einen effektiven Smart Service mit Software-Sensorik anbieten zu können. Dabei spielen auch die Monetarisierung und attraktive Abrechnungsmodalitäten für die Kunden eine zentrale Rolle. Zudem ist für die Anbieter eine Betrachtung des eigenen Produktpportfolios wichtig, da das Angebot von Software-Sensorik eigene Hardware-Produkte im Portfolio substituieren kann. Es ist also zu prüfen, inwiefern durch den Einsatz das bestehende Geschäft rationalisiert wird.

Zentraler Aspekt für den Erfolg von Software-Sensorik ist die Darstellung des wirtschaftlichen Mehrwerts – für Kunden und Anbieter. Anbieter müssen die richtigen Anwendungsfelder identifizieren und attraktive Smart Services entwickeln, in denen Software-Sensorik – über den gesamten Produktlebenszyklus betrachtet – deutliche monetäre und qualitative Vorteile gegenüber konventioneller Sensorik bietet.

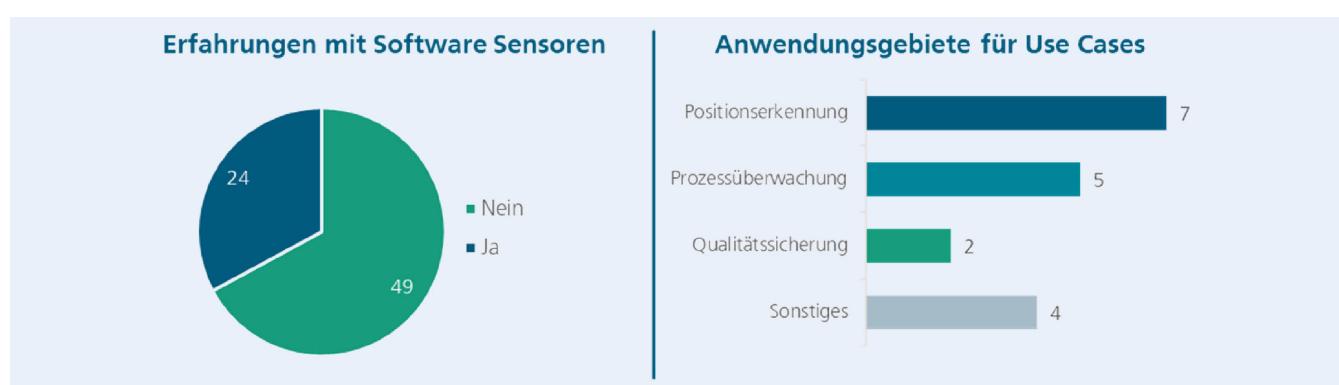


Bild 10. Erfahrungen mit Software-Sensoren (n=73) und Anwendungsgebiete der Use Cases (n=17). Grafik: Fraunhofer IPA

L i t e r a t u r

- [1] Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Technologische Komponenten. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Heidelberg: Springer Gabler 2016, S. 47–72
- [2] Vogel-Heuser, B.; Bayrak, G.; Frank, U.: Agenda CPS – Szenario smart factory. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Erhöhte Verfügbarkeit und transparente Produktion. Tagungsband Automation Symposium 2011. Kassel: Kassel University Press 2011, S. 6–21
- [3] Khan, S.; Siddiqui, T.; Mourade, A. et al.: Manufacturing industry based on dynamic soft sensors in integrated with feature representation and classification using fuzzy logic and deep learning architecture. *The International Journal of advanced manufacturing technology* 128 (2023), pp. 2885–2897
- [4] Koo, J.; Yoon, S.: Simultaneous in-situ calibration for physical and virtual sensors towards digital twin-enabled building operations. *Advanced Engineering Informatics* 59 (2024), #102239
- [5] Ahmad, I.; Ayub, A.; Kano, M. et al.: Gray-box Soft Sensors in Process Industry: Current Practice, and Future Prospects in Era of Big Data. *Processes* 8 (2020), 2, p. 243
- [6] Gao, C.; Tian, Z.; Chen, Y. et al.: A Novel Virtual Sensor Management Scheme for Manufacturing Network. 2018 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA), Xi'an, China, 2018, IEEE 2018, pp. 29–35
- [7] Karhinen, A.; Hamalainen, A.; Manngard, M. et al.: Data-driven virtual sensor for powertrains based on transfer learning. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 71 (2023) 6, #147061
- [8] Gupta, A.; Mukherjee, N.: Rationale behind the virtual sensors and their applications. 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Jaipur, India, 2016, IEEE 2016, pp. 1608–1614
- [9] Yeo, W. S.; Saptoyo, A.; Kumar, P. et al.: Just-in-time based soft sensors for process industries: A status report and recommendations. *Journal of Process Control* 128 (2023), #103025.
- [10] Hensel, B.; Kabitzsch, K.: Generator for modular virtual sensors. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin, Germany, IEEE 2016, 2016, pp. 1–8
- [11] Bose, S.; Gupta, A.; Adhikary, S. et al.: Towards a Sensor-Cloud Infrastructure with Sensor Virtualization. Proceedings of the Second Workshop on Mobile Sensing, Computing and Communication. Mobi-Hoc'15: The Sixteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Hangzhou China, 2015, ACM 2015, pp. 25–30
- [12] Kano, M.; Fujiwara, K.: Virtual Sensing Technology in Process Industries: Trends and Challenges Revealed by Recent Industrial Applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 46 (2013), 1, pp. 1–17
- [13] Souza, B. V.; Dos Santos, S. R. B.; Oliveira, A. M. de et al.: Modelling of Virtual Sensors for Manufacturing Process using Gradient Boosting Technique. 2023 IEEE International Systems Conference (SysCon), Vancouver, BC, Canada., 2023, pp. 1–8
- [14] Šabanović, E.; Kojis, P.; Šukevičius, Š. et al.: Feasibility of a Neural Network-Based Virtual Sensor for Vehicle Unsprung Mass Relative Velocity Estimation. *Sensors* 21 (2021) 21, #7139
- [15] Gross, E.; Gramberg, T.: Easy2IoT – Smart Services für KMU. Projekt-homepage. Internet: <http://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/easy2iot.html>. Zugriff am 21.05.2024
- [16] Li, C.-H. G.; Chang, Y.-M.: Automated visual positioning and precision placement of a workpiece using deep learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019), 4527–4538



Dr.-Ing. Erwin Gross
erwin.gross@ipa.fraunhofer.de
Foto: Fraunhofer IPA

Mirko Schneider, M. Sc.

Kira Fink, B. Sc.

David Breunig, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Manuel Senk

Peter Ohr

Murrelektronik GmbH
Falkenstr. 3, 71570 Oppenweiler
www.murrelektronik.de

LIZENZ

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