

Sensor-Intelligence Devices für die multimodale Datenerfassung in der Industrie 4.0: Anwendungen, Chancen und Potenziale

Heiko Jacob^{1,2}, Thorsten Müller¹, Jan Oswald¹, Dirk Koster¹, Hans-Georg Herrmann¹

¹Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

, Campus E3 1 | 66123 Saarbrücken | Deutschland

²Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes htw saar | Waldhausweg 14 | 66123 Saarbrücken | Deutschland

Zusammenfassung

Die vorliegende Publikation präsentiert das Konzept der Sensor-Intelligence Devices (SIDs) zur multimodalen Datenaufnahme in Industrie 4.0-Umgebungen. Der Fokus liegt auf der Integration Datenerfassung und Edge-KI-Technologien für intelligente und vernetzte Sensorsysteme. Eine offene Systemstruktur ermöglicht die Berücksichtigung von A-priori-Informationen zur Optimierung der Prozesssteuerung sowie zur Realisierung prädikativer Instandhaltungsstrategien. Anhand eines prototypischen Demonstrators wird das zugrundeliegende Funktionsprinzip erläutert. Die implementierten SIDs basieren auf kostengünstigen Sensorsystemen, die definierte Kriterien intelligenter Sensorik erfüllen. Das konzipierte System muss Datensicherheit und -souveränität gewährleisten. Diese Infrastruktur ermöglicht eine umfassende Datenerfassung und -archivierung in Produktionsprozessen und gewährleistet die vollständige Rückverfolgbarkeit relevanter Prozessparameter – ein kritischer Aspekt bei der Aufarbeitung von Anomalien in Produktionsumgebungen. Das SID-Konzept bietet einen systematischen Ansatz zur Integration dieser Anforderungen innerhalb einer kohärenten Systemarchitektur.

Keywords: Smart Sensor, Industrie 4.0, Prozessüberwachung, Prädikative Instandhaltung, Edge Computing

Hintergrund, Motivation und Zielsetzung

Die Entwicklung neuer Konzepte der Datenerfassung ist im Kontext von Industrie 4.0 dringend erforderlich, wenn komplexe und unter anderem global vernetzte Prozesse aufeinander abgestimmt werden müssen. Eine zentrale Fragestellung ist hierbei, wie jeder einzelne Produktionsschritt sinnvoll dokumentiert und bewertet werden kann, aber auch welche Implikationen die Informationen aus vorherigen Prozessschritten bereitstellen. Sensor-Intelligence Devices (SIDs) können in diesem Umfeld eine entscheidende Rolle spielen, indem sie die Erfassung und Verarbeitung multimodaler Daten ermöglichen. Die Bedeutung der Integration verschiedener Datenquellen für die Verbesserung von Entscheidungsprozessen wurde bereits umfassend dargelegt [1, 2]. Die Verwendung von Daten ist insbesondere für die Entscheidungsfindung bei der prädikativen Instandhaltung als Maßnahme gegen Werkzeug- und Maschinenverschleiß von zentraler Bedeutung [3-6]. Diese Arbeit zielt darauf ab, die

Fähigkeiten von SIDs hinsichtlich intelligenter Datenerfassung und Prozessoptimierung zu untersuchen.

Technologische Grundlagen

Diese Studie stellt einen neuartigen Ansatz zur Nutzung von Sensor-Intelligence Devices vor, einer Eigenentwicklung des Fraunhofer-Zentrum für Sensor-Intelligenz (ZSI). Dabei handelt es sich um ein Sensornetzwerk, das aus Sensorknoten und einem EDGE-Gateway besteht und für den Einsatz in der Zustandsüberwachung von Infrastrukturen sowie vernetzten Produktionsumgebungen konzipiert wurde [7, 8]. Obwohl SIDs primär für die Erfassung von Langzeitdaten in Infrastrukturen entwickelt wurden, erstreckt sich ihr Anwendungsbereich weit darüber hinaus und bietet erhebliches Potenzial für Fertigungsumgebungen, insbesondere durch die Implementierung von Machine-Learning-Techniken. Durch den Einsatz geeigneter Datenverarbeitungsmethoden wie der Hauptkomponentenanalyse (PCA) und der Zeitreihenanalyse können SIDs wertvolle Erkennt-

nisse über Produktionsprozesse generieren. Dies umfasst auch das Potenzial für prädikative Instandhaltungsstrategien auf Basis der durch SIDs erfassten Daten.

Das SID-Konzept zeichnet sich durch seine Übertragbarkeit aus und kann in verschiedenen Fertigungsszenarien implementiert werden. Grundlage der SIDs ist die multimodale Datenaufnahme über Sensorknoten, die mit Temperatur, Druck, Bewegungs- und Luftfeuchtigkeitssensoren ausgestattet sind und je nach Anwendungsszenario um weitere Sensormodalitäten ergänzt werden können.

Sensor-Intelligence Devices (SIDs):

Das SID-Konzept basiert auf einem Sensornetzwerk mit einem einfachen Kommunikationsmodell. Jedes SID repräsentiert einen Sensorknoten, der lokale Informationen im jeweiligen Messszenario erfasst. Im Kontext von Produktionsszenarien umfasst dies lokale Informationen aus mehreren Prozesszonen, räumlich verteilte Produktionsschritte, die Überwachung verschiedener voneinander abhängiger Fertigungsprozesse sowie Kombinationen dieser Anwendungsfälle. Jedes SID verfügt über eine eindeutige Identifikationsnummer (ID), sodass Daten in Abhängigkeit vom spezifischen Standort des jeweiligen Knotens respektive Produktionsschritts zurückverfolgt werden können.

Die Koordination der Knoten erfolgt durch einen Master (EDGE-Gateway), der die Datenverwaltung übernimmt. SIDs nutzen Edge-KI-Technologien, wodurch die Daten vorverarbeitet und mittels Edge-Computing einer geeigneten Daten- bzw. Dimensionsreduktion unterzogen werden können, um ausschließlich relevante Informationen mit hoher Signifikanz für das jeweilige Messproblem zu speichern.

Die Kommunikation erfolgt über Ethernet oder WiFi mit UDP als primärem Kommunikationsprotokoll; je nach Anwendungsfall ist alternativ TCP/IP und OPC UA möglich. Die Kommunikation basiert auf dem Master-Slave-Prinzip mit einem zentralen Master und einem oder mehreren Sensorknoten als Slaves. Der Master initiiert die Kommunikation über Broadcast oder Multicast zur Synchronisation aller Knoten im Subnetz. Die Sensorknoten kommunizieren über Unicast, um gezielte und kollisionsfreie Statusaktualisierungen zu

gewährleisten.

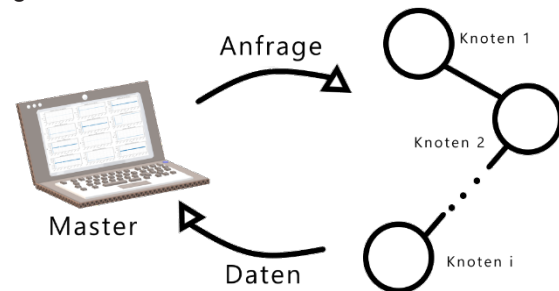


Abbildung 1 Einfache Skizze des SID-Kommunikationsprotokolls

Implementierung der SIDs:

Die Integration der SIDs folgt dem dargestellten Iterationszyklus (vgl. Abb. 2). Dabei wird jeder Sensorknoten systematisch im Kontext der vernetzter Produktionsumgebungen entwickelt.

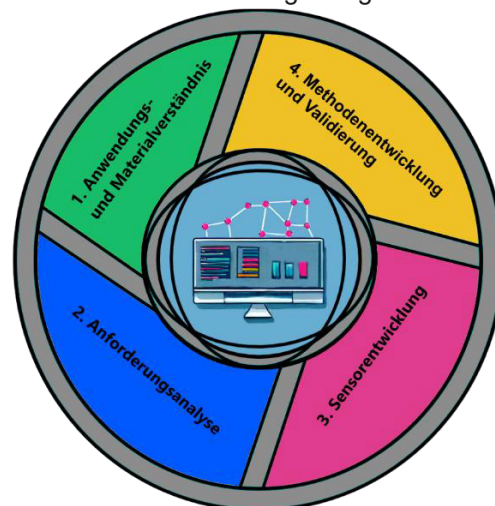


Abbildung 2 Die vier Phasen der SID-Integration

Die Integration von SIDs erfolgt im Allgemeinen in aufeinanderfolgenden Phasen: Zunächst wird in der Phase „Anwendungs- und Materialverständnis“ der Einsatzkontext definiert, d. h. Zielapplikation, relevante Rahmenbedingungen sowie potenzielle Material- oder Technologieeinsätze. Basierend darauf folgt die Phase „Anforderungsanalyse“, in der funktionale, technische und operationale Anforderungen abgeleitet, Messgrößen festgelegt, der Einsatz weiterer prozessbezogener Kenngrößen evaluiert (z. B. Drehzahl, Motorleistung, Abrichtintervalle usw.), Akzeptanzkriterien definiert und Prioritäten gesetzt werden, um anschließend Sensorentwicklung und Integration externer Daten abzuleiten. Der wichtigste Punkt bildet die Ableitung der relevanten Zielgrößen (z. B. Detektion des Werkzeugverschleißes in einem Drehprozess). In der dritten Phase „Sensorentwicklung“ erfolgt die architektonische Ausgestaltung der SIDs mitsamt des angegliederten digitalen Ökosystems, einschließlich der Auswahl von

Sensorik, Edge-Komponenten, Datenformaten und Vorverarbeitungsstrategien. Das Grundgerüst für diesen Aufbau liefert ein Prototyp, der je nach Anforderung weiterentwickelt, getestet und gegebenenfalls angepasst werden kann. Die vierte Phase „Methodenentwicklung und Validierung“ widmet sich der Implementierung in Prozessketten oder Einsatzumgebungen durch Analyse- und Modellierungsansätze, Edge-KI, Datenverarbeitung, Dimensionsreduktion und prädiktive Methoden, deren Validierung, Bewertung und Dokumentation auf Basis der Anforderungsanalyse erfolgt. Zentraler Bezugspunkt des Prozesses ist das EDGE-Gateway als Integrations- und Koordinationspunkt. Er sammelt die mittels der Edge-KI vorverarbeiteten und transformierten Daten aus allen Phasen, konsolidiert Ergebnisse und erzeugt Feedback. Mit dieser Herangehensweise wird das SID-Konzept schrittweise an die Anforderungen angepasst, datenbasiert validiert und so zu einer robusten, effizienten Lösung weiterentwickelt, die sich zuverlässig in komplexe Produktionsprozesse integrieren lässt.

Diese systematische Vorgehensweise folgt konzeptionell dem PDCA-Zyklus [9] (Plan-Do-Check-Act) und lässt sich methodisch in das V-Modell XT [10] einbetten, das mit seinem flexiblen, produktzentrierten Ansatz den gesamten Systemlebenszyklus abdeckt.

Anwendungsbeispiel: Außenlängsdrehen

Am Beispiel eines Drehprozesses zur Herstellung von Wellen wird die Integration von SIDs exemplarisch demonstriert. Die Zielsetzung umfasst die Echtzeitüberwachung des Prozesszustands, die frühzeitige Detektion von Werkzeugverschleiß sowie die Implementierung einer prädiktiven Instandhaltungsstrategie zur Vermeidung ungeplanter Stillstandzeiten und von Ausschuss.

Phase: Anwendungs- und Materialverständnis

Im betrachteten Beispiel, einem Drehprozess, werden Stahlwellen (42CrMo4) mit einer CNC-Drehmaschine bearbeitet. Typische kritische Einflussfaktoren sind hierbei Werkzeugverschleiß, thermische Effekte, Prozessstabilität und Umgebungseinflüsse.

Phase: Anforderungsanalyse

Basierend auf dem Prozess kann als zentrale Zielgröße die Klassifikation des Werkzeugverschleißzustands in die Kategorien „Ok“ und „kritisch“ definiert werden. Die kontinuierliche Überwachung erfordert die Erfassung von Vibrationsdaten und Temperaturdaten. Für die relevanten Messgrößen eignen sich drei-

achsige Vibrationen mittels MEMS-Beschleunigungssensoren, für Werkzeug-, Umgebungs- und Maschinentemperaturen Pt-100, Umgebungsbedingungen sowie externe Maschinendaten wie Spindeldrehzahl und Motorstrom sollten ebenfalls integriert werden. Die funktionale Anforderung besteht in der Detektion kritischer Verschleißzustände mit einer definierten Vorlaufzeit (z. B. 25 Bearbeitungszyklen) bei einer Kommunikationslatenz unter 100 ms.

Phase: Sensorentwicklung

Für den einfachen Drehprozess können drei Sensorknoten strategisch positioniert werden: SID-01, werkzeugnah zur Erfassung von Vibrationen und ggf. Abwärme des Werkzeugs, SID-02 am Maschinenrahmen für strukturelle Schwingungen und Maschinentemperatur sowie SID-03 im Arbeitsraum für Umgebungsbedingungen. Die Kommunikation erfolgt koordiniert durch ein EDGE-Gateway als zentraler Master. Auf Sensorknoten-Ebene werden Rohdaten bereits vorverarbeitet (Mittelung von Bewegungsdaten, 5 dominante Frequenzen über Fast-Fourier-Transformation, etc.), um eine sinnvolle Datenreduktion zu gewährleisten.

Phase: Methodenentwicklung und Validierung

Für die Modellentwicklung wird eine repräsentative Anzahl von Bearbeitungszyklen mit systematischem Werkzeugwechsel benötigt. Visuelle Inspektion sowie Rauheitsmessungen indizieren die Verschleißkategorie, die entsprechend gelabelt werden muss. Sowohl ein gewisser Kantenverschleiß als auch unzureichende Oberflächengüte müssen mit „kritisch“ gelabelt werden. Die erfassten Sensor-Features können mittels Hauptkomponentenanalyse auf eine definierte Anzahl Hauptkomponenten reduziert werden, oder über ein Varianzkriterium in der Hauptkomponentenanalyse gewichtet werden. Somit sollte sich eine deutliche Cluster-Bildung je nach Verschleißzustand zeigen. Es empfiehlt sich eine Validierung der entwickelten Methode nach einem Toleranzkriterium für Fehlalarmraten.

Ausblick

Die demonstrierten Fähigkeiten der SIDs sind auf verschiedene Fertigungsverfahren übertragbar. Besonders relevant sind Anwendungen in mehrstufigen Produktionsketten: Die eindeutige ID-Zuordnung der Sensorknoten ermöglicht die durchgängige Verfolgung von

Prozessparametern über mehrere Fertigungsschritte hinweg. Die Kommunikationsarchitektur erlaubt dabei den Informationsaustausch sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung entlang der Prozesskette. Dies ermöglicht neben der Detektion von Qualitätsabweichungen die prozessübergreifende Nutzung von Zustandsinformationen für adaptive Regelungsstrategien. Die resultierende durchgängige Rückverfolgbarkeit bildet die Grundlage für eine ganzheitliche Optimierung der Wertschöpfungskette.

Über die Zustandsüberwachung hinaus eröffnen SIDs erweiterte Anwendungsfelder: Prognosemodelle zur Vorhersage verbleibender Werkzeugstandzeiten dienen nicht nur prädiktiven Instandhaltungsstrategien, sondern öffnen auch weitere Anwendungen, wie die Abschätzung von Qualitätsmerkmalen, sprich die Identifikation kausaler Zusammenhänge zwischen Werkzeugdegradation und Produktmerkmalen. Die Integration in die übergeordnete Produktionsplanung eröffnet Potentiale zur Bestimmung der Produktionsauslastung und Maschinenverfügbarkeit.

Ein wesentlicher Vorteil des SID-Konzepts liegt in seiner Eignung für Retrofitting-Anwendungen in Brownfield-Anlagen. Die modulare Architektur und einfache Kommunikationsstruktur ermöglichen die kosteneffiziente Nachrüstung bestehender Maschinen ohne (bauliche) Eingriffe oder produktionsrelevante Stillstandzeiten. Die einfache, nicht-invasive Installation der Sensorknoten und die steuerungsunabhängige Datenerfassung erlauben die Integration älterer Anlagen ohne herstellerspezifische Schnittstellen in Industrie-4.0-Umgebungen. Dies bietet insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen einen niederschweligen Zugang zur digitalen Transformation ihrer Produktion bei überschaubarem Investitionsaufwand.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitales und Energie des Saarlandes (MWIDE) und der Fraunhofer-Gesellschaft (Leistungszentrum „Sensor-Intelligenz“) unterstützt.

Literaturnachweis

[1] Lebedynska, Y. (2011). *Entwicklung eines Informationssystems mit Reifegradmanagement für automatisierte Schraubprozesse*. BTU Cottbus-Senftenberg.

[2] Zhang, Y., Cheng, Y., Wang, X. V., Zhong, R. Y., Zhang, Y., & Tao, F. (2019). Data-driven smart production line and its common factors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 1211-1223.

[3] Chien, C. F., & Chen, C. C. (2020). Data-driven framework for tool health monitoring and maintenance strategy for smart manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 33(4), 644-652.

[4] Lu, B., Chen, Z., & Zhao, X. (2021). Data-driven dynamic predictive maintenance for a manufacturing system with quality deterioration and online sensors. *Reliability Engineering & System Safety*, 212, 107628.

[5] Lee, J., Ni, J., Singh, J., Jiang, B., Azamfar, M., & Feng, J. (2020). Intelligent maintenance systems and predictive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110805.

[6] Farooq, B., Bao, J., Li, J., Liu, T., & Yin, S. (2020). Data-driven predictive maintenance approach for spinning cyber-physical production system. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 25, 453-462.

[7] Klein, S., Emge, J., & Koster, D. (2024). Using edge AI: Continuous monitoring of critical infrastructure. *inno*.

[8] Koster, D., Oswald, J., Jungmann, C., Klein, S., & Weingard, C. (2024). Erweiterung des Sensordatenraums zur Ermittlung der Datenaufnahmequalität für Wirbelstromanwendungen. In *Anwenderseminar Wirbelstromprüfung 2024*.

[9] Realyvásquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K. C., Carrillo-Gutiérrez, T., & Ravelo, G. (2018). Applying the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle to reduce the defects in the manufacturing industry. A case study. *Applied sciences*, 8(11), 2181.

[10] Biffi, S., Winkler, D., Höhn, R., & Wetzel, H. (2006). Software process improvement in Europe: potential of the new V-modell XT and research issues. *Software Process: Improvement and Practice*, 11(3), 229-238.