

Prototyping und Validierung intelligenter Sensorik für die industrielle Zustandsüberwachung

*Martin Lehmann¹, André Schneider¹, Volkhard Beyer¹, Dirk Mayer¹,
Peter Schneider^{1,3}, René Gastmeier²*

¹Fraunhofer IIS/EAS, Dresden, Deutschland

²Coderitter GmbH, Dresden, Deutschland

³TU Dresden, Professur für Entwurfsmethoden für adaptive mikroelektronische Systeme, Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Beim großflächigen Einsatz von verteilter, intelligenter Sensorik im Industriekontext gelten gehobene Ansprüche an die Qualität und Zuverlässigkeit solcher Systeme vor einem Rollout in großen Stückzahlen. Der gesamte Prozess vom Prototyp bis zum Serienprodukt muss durch eine innovative Test- und Validierungsstrategie begleitet werden, die das jeweilige Sensorsystem für die spätere Einsatzumgebung so realitätsnah wie möglich qualifiziert. So können spätere Nacharbeiten oder Ausfallrisiken minimiert werden, die oft mit hohen Kosten einhergehen. Der Artikel gibt eine Übersicht über einen möglichen Validierungsprozess am Beispiel eines prototypischen Sensorsystems *Tribok* der Firma *Coderitter*. Konkrete, im Anwendungskontext erhobene Messdaten verdeutlichen die Vorteile des beschriebenen Verfahrens.

Keywords: IoT, Condition Monitoring, Structural Health Monitoring, Vibration Monitoring, Prototyping

Einleitung

Sensoren sind Schlüsselkomponenten zur Digitalisierung der Industrie. Sie liefern die Daten, welche zur Optimierung von Produktionsprozessen und Überwachung von Anlagen benötigt werden. Die breite Verfügbarkeit günstiger drahtloser Kommunikation und energiesparender Mikroelektronik ermöglicht Sensorsysteme, die preiswert, intelligent und in Maschinenelemente integrierbar sind [1]. Sensoren sind daher inzwischen selbst komplexe cyberphysische Systeme, an die im industriellen Einsatz hohe Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Energieverbrauch und Robustheit der Funkkommunikation gestellt werden. Die immer stärkere Bedeutung von Software-implementierten Funktionen bis hin zur Integration Künstlicher Intelligenz (KI) führt zudem dazu, dass die Eigenschaften dieser Systeme während des Betriebs veränderlich sind [2].

Daher liegt es nahe, aus Entwicklungsprozessen für mechatronische Systeme [3] und für Datenanalysesysteme [4] ein methodisches Vorgehen abzuleiten, welches eine effiziente und schnelle Entwicklung intelligenter Sensorik ermöglicht.

In diesem Beitrag wird eine Methodik insbesondere für die Entwicklung und Validierung von Schwingungssensorsystemen für das industrielle Condition Monitoring vorgestellt. Diese baut

auf einem zuvor entwickelten und erprobten Workflow für die Integration von Künstlicher Intelligenz in die industrielle Datenanalyse auf [5] und erweitert diesen um die notwendigen Schritte zur Integration und Validierung von Sensorkomponenten.

Wesentliche Schritte sind dabei zunächst die Erfassung von Referenzdaten (Ground-Truth) mit Hilfe von hochpräziser Sensorik und die Entwicklung und Erprobung der Datenanalyse zunächst unabhängig von der Zielhardware des intelligenten Sensors. Im Anschluss werden dann in Frage kommende Hardwarelösungen evaluiert, zum einen hinsichtlich der Integration der Datenanalyse, zum anderen hinsichtlich der Erfassung, Wandlung und Vorverarbeitung der Schwingungsdaten.

Das Vorgehen wird anhand eines IoT-Devices für die Zustandsüberwachung in der Reinstwasserversorgung für die Halbleiterfertigung demonstriert. Ziel ist die frühzeitige Erkennung von Schäden an Ventilen durch eine permanente Analyse von Schwingungen. Die einzelnen Schritte, von der Erfassung der Referenzdaten im Rahmen einer Messkampagne, über die Ableitung von Testprogrammen für das Sensorsystem bis zur Erprobung, werden anhand der Ergebnisse durchgeführter Messungen und Tests dokumentiert. Insgesamt zeigt sich, dass mit Hilfe der Verlagerung von Validierungsschritten in die Laborumgebung teure und

zeitaufwändige Tests in der realen Anwendung verkürzt oder eingespart werden, so dass ein Ansatz für das Rapid Prototyping von Zustandsüberwachungssystemen realisiert wird.

Industrielle Anwendung als Fallbeispiel

Die Aufrechterhaltung eines konstanten Volumenstroms ist für die Reinstwasser-versorgung in der Halbleiterindustrie von entscheidender Bedeutung. Ein konstanter Volumenstrom gewährleistet Prozessstabilität, verbessert die Reinigungsleistung, beugt Schäden an der Anlage vor und vereinfacht die Prozesskontrolle.

Für die Sicherstellung eines konstanten Volumenstroms spielt die kontinuierliche Überwachung des Zustands der Ventile eine wesentliche Rolle. Sie ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Anzeichen von Verschleiß, Leckagen oder Fehlfunktionen, um unerwartete Ausfälle und die damit unter Umständen verbundenen Fehlprozessierungen zu vermeiden sowie die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen.

Obwohl Vibrationssensoren für die Zustandsüberwachung effektiv eingesetzt werden können, ist ihre Anwendung auch mit Herausforderungen verbunden. Die Platzierung der Sensoren, die Festlegung von Basislinien für normale Schwingungsmuster und die Interpretation der Daten erfordern Fachwissen und sorgfältige Planung.

Die Implementierung von Schwingungsüberwachungssystemen ist mit Kosten verbunden, die Vorteile in Bezug auf verbesserte Überwachung und reduzierte Ausfallzeiten sind jedoch bedeutend. Eine erfolgreiche Bewältigung der genannten Herausforderungen erfordert die enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Interessengruppen und Fachleuten.

Im hier dargestellten Anwendungsfall arbeiteten der IoT-Anbieter *Coderitter* und das Fraunhofer IIS/EAS mit Unterstützung von *Global Foundries* und T-Systems/MMS zusammen, um eine neuartige IoT-Lösung zur Zustandsüberwachung zu entwickeln und zu evaluieren.

IoT System für die Zustandsüberwachung

Das beispielhaft untersuchte Sensor-System *Tribok* von *Coderitter* ist ein hochgradig konfigurierbares IoT-Gerät, das als intelligenter Sensor-Hub klassifiziert werden kann und fünf Sensorsteckplätze für verschiedene digitale und analoge Sensoren bietet (Abb. 1). Das Gerät verwendet austauschbare Slot Connector Boards (SCBs), um verschiedene Sensorschnittstellen zu ermöglichen. Es unterstützt verschiedene Recheneinheiten wie Raspberry Pi und NVIDIA Jetson Nano, die eine einfache Programmierung in Hochsprachen erlauben

und die Integration erweiterter KI-Funktionen ermöglichen.

Die Recheneinheiten bieten typischerweise Kommunikationsschnittstellen wie Ethernet, WiFi und Bluetooth, mit der Möglichkeit zur Erweiterung auf andere wie LoRaWAN, NB IoT, LTE, ModBus, ProfiBus oder IO-Link durch die SCB-Erweiterung des *Tribok*.

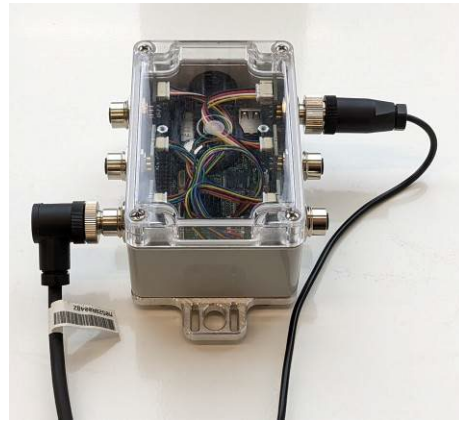


Abb. 1 Tribok - Prototypisches IoT Sensor-system mit analogen Anschlüssen

Test und Qualifikation für die Anwendung

Das Vorgehen bei dieser Entwicklung lehnt sich an die Systematik des V-Modells [3] an und konzentriert sich in diesem Kontext hauptsächlich auf die Schritte Anforderungserhebung (Referenzmessungen), Implementierung, Verifikation und Validierung (Integration in die Zielanwendung, vgl. Abb. 2).

A. Einsatz spezifischer Laborgeräte

Zum Einsatz kommen verschiedene Labormessgeräte, die das hier vorgestellte Untersuchungsspektrum abbilden. Zur Aufzeichnung der Felddaten wird die mobile *SKALI.KIT*-Messbox (Abb. 3) verwendet, die zum Testen von KI-Prototypenlösungen im industriellen Umfeld am Fraunhofer IIS/EAS entwickelt wurde. Mit dieser Messbox können Schwingungen von bis zu 900kHz kontinuierlich über mehrere Wochen

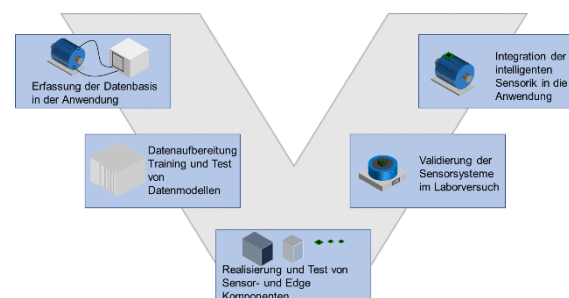


Abb. 2: Entwicklungs- und Validierungsmethode für Condition-Monitoring-Sensorsysteme

aufgezeichnet und als Rohdaten lokal gespeichert werden. Sie unterstützt unter anderem den Anschluss von bis zu sechs herstellerunabhängigen, analogen IEPE-Sensoren über BNC-Buchse.

Für die Reproduktion im Labor kommt ein Schwingungserreger (Shaker) der Firma Spektra zum Einsatz (SE-20T, Abb. 4), der einen breiten Anregungsfrequenzbereich (0-20kHz) mit Amplituden von bis zu 60g bietet. Der Vorteil dieses Shakers ist die Regelschleife, die mittels eines internen Referenzsensors eine hochpräzise Anregung unabhängig von der Masse des Prüflings ermöglicht. Es können sowohl Sinus-, Breitband-, als auch Zeitrohnsignale reproduziert werden, womit umfänglich reale Schwingungen in Einsatzbedingungen abgebildet werden können.

Um räumlich hochauflösende Einblicke in das Schwingungsverhalten des Sensorsystems zu erhalten, kommt bei Bedarf ein 3D-Laserdoppervibrometer der Firma Polytec (PSV QTEC 3D, Abb. 4) zum Einsatz, welches berührungslos und in einem extrem breiten Frequenz- und Amplitudenbereich jeden optisch erreichbaren Punkt auf dem Prüfling in allen drei Raumrichtungen schwingungstechnisch vermessen kann. Dies kann besonders hilfreich sein, um die korrekte physikalische Integration eines Sensorelements in ein Gehäuse zu untersuchen. Unerwünschtes Resonanzverhalten von Gehäuseteilen, welches die Qualität der Messung beeinträchtigen könnte, kann somit frühzeitig erkannt werden.

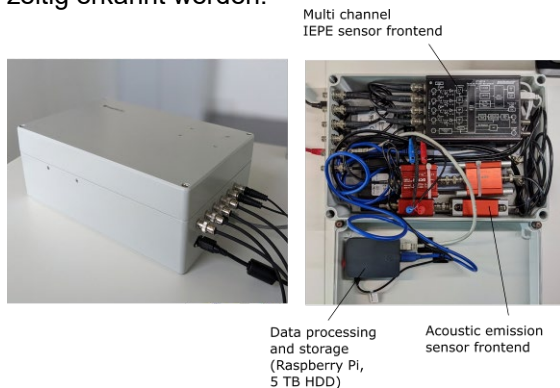


Abb. 3: SKALI.KIT - mobile Messbox des Fraunhofer IIS/EAS



Abb. 4: Shaker und Laservibrometer im Labor des Fraunhofer IIS/EAS

B. Referenzmessungen

Um einen realistischen Eindruck zu bekommen, welche Umgebungsbedingungen - vor allem Frequenzen und Amplituden - am Einsatzort vorherrschen, wurden Messungen an den zu untersuchenden Anlagen mit hochwertiger Referenzmesstechnik durchgeführt. Diese Messungen stellen eine nachhaltige Datenbasis dar, um auch zukünftige Hardware- und Softwareentwicklungen im Labor durchführen zu können, ohne aufwändige Messkampagnen am Einsatzort wiederholen zu müssen.

Für die Referenzmessung wurden drei pneumatische Stellventile unterschiedlicher Größe ausgewählt (Abb. 5). An diesen Ventilen wurden die Körperschallschwingungen an bis zu vier verschiedenen Positionen (Stange, Buchse, Flansch, Gehäuse) für jeweils mindestens eine Woche gemessen. Für die Messung wurden zum einen vier, teils verschiedene, IEPE Beschleunigungssensoren von Kistler verwendet, die Frequenzen bis 16kHz und Amplituden bis 200g erfassen können. Zum anderen kamen zwei verschiedene Acoustic Emission Sensoren von Vallon zum Einsatz, welche den Frequenzbereich bis 80kHz bei Amplituden bis 40g abdecken.

Die Messdaten wurden mit der mobilen Messbox SKALI.KIT aufgezeichnet. Die Messkampagne, bei der sequentiell an insgesamt drei Ventilen bei *Global Foundries* gemessen wurde, dauerte vier Wochen. Insgesamt wurden 6 TByte an Rohdaten aufgezeichnet. Nach Abschluss wurden die Daten mit dem Ziel analysiert, die für die Zustandsüberwachung relevanten Frequenzbereiche und Schwingungsamplituden zu finden und die Anforderungen an die Sensoren und das Edge Device abzuleiten.

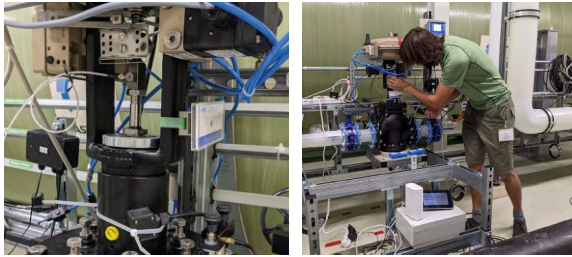


Abb. 5: Applikation der Referenzsensoren an Reinstwasserventilen in der Einsatzumgebung bei Global Foundries

C. Ableitung eines Laborprüfprogramms

Aus den gewonnenen Ground-Truth-Messungen wurden die für das jeweilige Ventilverhalten charakteristischen Schwingungen als Zeitsignalarreihen und Frequenzspektren extrahiert, um daraus Ansteuersignale für den Shaker zu erzeugen. Basierend auf den Analyseergebnissen wurden die wichtigsten beitragenden Frequenz- und Amplitudenbereiche identifiziert und ein analoger IEPE-Sensor für den Labortest des Tribok-Systems ausgewählt. Die detaillierte Analyse der Rohmessdaten ergab, dass die wichtigsten Frequenzen selten 10 kHz überschreiten. Langfristige Veränderungen des Signals wurden in höher Frequenzen nicht beobachtet. Maximale Amplituden wurden bei 15g beobachtet, so dass der analoge PCB-Sensor des Typs PCB-M603C01 für die Aufgabe als geeignet befunden wurde. Der durch maximale Auslenkungen und Kräfte natürlicherweise eingeschränkte Betriebsbereich des Schwingerregers stellte für diese Aufgabe keinen limitierenden Faktor dar.

Um das Tribok-System über den gesamten Betriebsbereich des ausgewählten Sensors zu qualifizieren, wurden mehrere Testsequenzen durchgeführt, bei denen die Reaktion des Systems bei einzelnen Sinusfrequenzen sowie bei zufälligem Breitbandrauschen mit unterschiedlichen Amplituden über den gesamten Messbereich aufgezeichnet wurde. Die Frequenzgangfunktion (FRF) wird dann für den gesamten Frequenzbereich sowohl bei großen als auch bei kleinen Amplituden berechnet.

D. Integration in die Zielanwendung

Der letzte Schritt ist die Integration des Systems in die Zielanwendung. Gemäß dem beschriebenen V-Modell sind weitere Iterationen in der Systementwicklung möglich. Da in einer nächsten Iteration jedoch ein vorläufig qualifiziertes Sensorsystem zur Verfügung steht, sind weitere Ground-Truth-Messungen u.U. nicht zwingend notwendig. Stattdessen können die gewonnenen Sensordaten verwendet werden, um direkt zum nächsten Schritt der Prototypisierung von Datenmodellen überzugehen. Auch weitere Labortests können sinnvoll sein: Verbesserungen am Condition Monitoring System können in der Testumgebung erprobt werden, während eine andere Instanz des Systems bereits im Feld läuft.

Ergebnisse

Die aufgezeichneten Daten an den pneumatischen Reinstwasserventilen wurden über den gesamten Messzeitraum analysiert und an einer Reihe von statistischen Kriterien getestet. Im wesentlichen traten Veränderungen des Signals nur sehr sporadisch und im Frequenzbereich von unter 10kHz auf (wo sich auch der Großteil der gemessenen Energie befindet, vgl. Abb. 6 & Abb. 7), sodass die Wahl auf günstige Sensoren mit einem Messbereich bis 10kHz fiel. Auch beim Vergleich der drei unterschiedlich dimensionierten Ventile fielen neben leicht unterschiedlich hohen Amplituden und geringfügig abweichenden Frequenzspektren keine wesentlichen, das Testprogramm betreffenden Unterschiede auf.

Aufgrund der Verteilung von Amplituden und Frequenzverhalten der gemessenen Ventile wurde das in Tab. 1 dargestellte Testprogramm abgeleitet. Ziel ist eine komplette Erfassung der Frequenzantwort des Sensorsystems, sowie eine Validierung der Amplituden bei ausgewählten Frequenzen nach dem Stichprobenverfahren. Bei niedrigen Frequenzen war eine Anregung bis zur maximalen Amplitude von 10g aufgrund des eingeschränkten Schwingweges des Shakers (ca. $\pm 10\text{mm}$) nicht möglich, sondern war teilweise auf 1g begrenzt. Wie die Ergebnisse zeigen, ist dadurch die Aussagekraft der Messung jedoch nicht wesentlich beeinträchtigt.

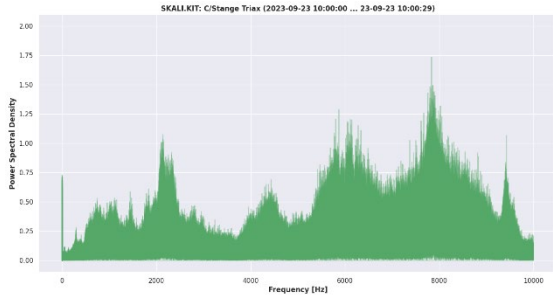


Abb. 6: Leistungsspektrum $((m/s^2)^2)$ an der Ventilstange, aufgezeichnet mit analogem Beschleunigungsaufnehmer im Bereich 0-10kHz.

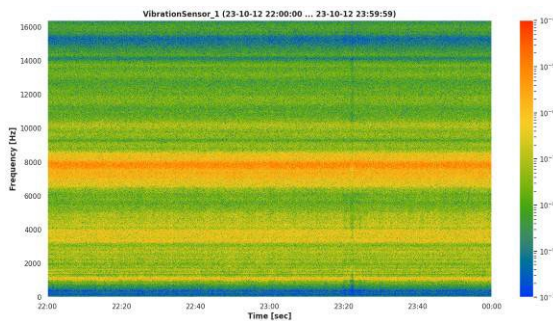


Abb. 7: Spektrogramm eines Vibrationsensors an einem pneumatischen Ventil über 30s im Frequenzbereich 0-16kHz

Tab. 1: Testprogramm nach Frequenz und Amplitude, abgeleitet von Ground-Truth Messungen an der Anlage

Frequenz (Hz)	Amplitude (g)	Zeit (s)
10	0.1	10
10	1.0	10
50	0.1	10
50	1.0	10
50	2.0	10
100	0.1	10
100	1.0	10
100	5.0	10
500	0.1	10
500	1.0	10
500	5.0	10
1k	0.1	10
1k	1.0	10
1k	10.0	10
5k	0.1	10
5k	1.0	10
5k	10.0	10
8k	0.1	10
8k	1.0	10
8k	10.0	10
10k	0.1	10
10k	1.0	10
10k	10.0	10
Random Noise 10-1k	0.1	30
Random Noise 10-1k	1.0	30
Random Noise 500-10k	0.1	30
Random Noise 500-10k	1.0	30
Valve Noise Spectrum (0-16k)	0-10	30
Valve raw time series (0-16k)	0-10	60

Das aus den Ground-Truth-Daten abgeleitete Testprogramm wurde schrittweise auf dem Shaker reproduziert und somit das Sensorsystem Tribok entlang seiner kompletten Signalkette hinweg angeregt. Die am Sensor aufgezeichneten Daten wurden zunächst in dessen internem Speicher gesammelt und anschließend als CSV-Datei exportiert und mit den aufgezeichneten Referenzdaten des Shakers verglichen bzw. verrechnet. Dabei zeichnete sich ein durchaus differenziertes Ergebnis ab. Während das Verhältnis der Sinusamplituden (Sensor/Anregung) zwar stabil über alle Größenordnungen bleibt, wird die Amplitude frequenzabhängig um bis zu 30% zu gering abgebildet (Abb. 8). Deutlich wird dies auch in der breitbandigen Frequenzantwort (Abb. 9), bei der aber noch ein zusätzliches Problem zutage tritt: Jeweils an den oberen Grenzfrequenzen fällt die Frequenzantwort des Tribok steil ab, was mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf eine schlechte physikalische Übertragung bzw. auf vorhandene Filter zurückzuführen ist, da die Sinusanregung bereits validiert wurde (vgl. Abb. 8). Mögliche Ursachen könnten in einer falsch ermittelten Abtastrate des Tribok liegen, die die sichtbare Stauchung des Spektrum erklären würde.

Eine genaue Ermittlung der zugrundeliegenden Empfindlichkeiten und Abtastraten des Sensorsystems (ggfs. durch Kalibrierung) sowie eine detaillierte Analyse der Signalformen mittels elektronischer Signalgeneratoren würde wahrscheinlich zu einer einfachen (Software-seitigen) Korrektur der beobachteten Abweichungen beitragen, ohne das Systemdesign maßgeblich zu beeinflussen. Eine erneute Validierung mittels eines identischen Testprogramms würde den Entwicklungszyklus abschließen und das System als geeignet für die Anwendung klassifizieren.

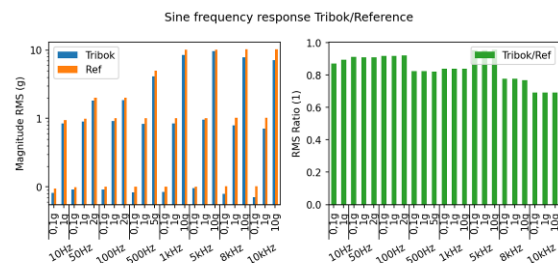


Abb. 8: Amplitudenvergleich bei diskreter Sinusanregung Tribok/Referenzsensor

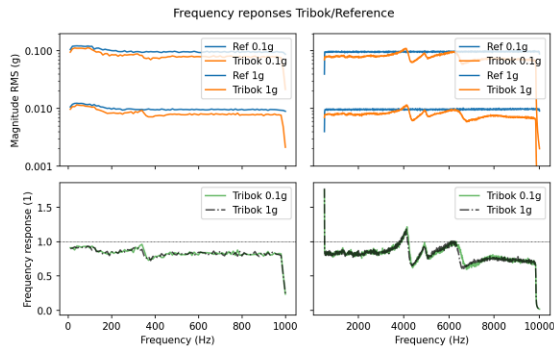


Abb. 9: Frequenzantwortspektrum des Tribok für 0-1kHz und 0,5-10kHz bei 0.1g und 1g Rauschanregung

Fazit und Ausblick

Durch die Aufzeichnung und Analyse der realen Daten an den Ventilen in der Zielumgebung war es möglich, bereits ein sehr genaues Bild des erforderlichen Leistungsspektrums der Zielhardware in Bezug auf Bandbreite, Amplituden und Sensitivitäten zu bekommen. Gleichsam ist durch die Instrumentierung mehrerer verschiedener Positionen an den Ventilen eine nützliche Datenbasis entstanden, die die spätere Montage des Prototypen erheblich erleichtert. Darüber hinaus können die aufgezeichneten Daten jederzeit verwendet werden, um weitere Designänderungen des Prototypen im Labor zu unterstützen, ohne erneut in die Einsatzumgebung eingreifen zu müssen. Das erleichtert und beschleunigt weitere Iterationen deutlich. Die Auswahl der Hardware erfolgte datenbasiert und transparent, was eine Anpassung auf andere Szenarien und Anlagen erleichtert, da ein klares Vorgehen dokumentiert ist und theoretisch auch von weniger geschultem Personal durchgeführt werden könnte.

Vermutlich können die Daten direkt oder indirekt im Labor dazu verwendet werden, Algorithmen und Anwendungen des maschinellen Lernens (ML) für das vorliegende Sensorsystem zu entwickeln. Nach entsprechender Aufbereitung ist es möglich vorläufige Modelle zu trainieren, die auf der vorhanden Hardware in der Einsatzumgebung direkt integriert werden können, ohne physisch in den Aufbau eingreifen zu müssen. Es ist das Ziel der weiteren Kooperation, diese Möglichkeiten zu bewerten und zu erproben.

Der Energieverbrauch der entwickelten Lösung soll ebenfalls untersucht werden, um gegebenenfalls Probleme offenzulegen und Lösungsoptionen zu erarbeiten. Dabei sollen vor allem die Datenvorverarbeitung und Kommunikationsschnittstellen detaillierter betrachtet werden.

Zusätzlich sind Verbesserungen bei der Generierung der Testprogramme geplant. Ziel ist es,

diese adaptiv und teilautomatisiert aus den Referenzdaten zu erstellen, um effektive und repräsentative Testsignale für die Entwicklung adaptiver Systeme zu erzeugen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei *Global Foundries* und bei *T-Systems/MMS* für die Unterstützung der Arbeit.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes innerhalb des Anwendungs- und Testzentrums für Künstliche Intelligenz (ATKI) am Fraunhofer IIS/EAS in Dresden.

Literaturnachweise

- [1] Beyer, V., Mayer, D., Haiduk, F. et al.: Structural Integration of Smart Sensors for the Industrial Internet of Things, 10th MikroSystemTechnik Congress 2023, Dresden, 25.10.2023
- [2] Ren, H.; Anicic, D.; Runkler, T. A. TinyOL: TinyML with Online-Learning on Microcontrollers. In 2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN); 2021; pp 1–8.
- [3] VDI/VDE Richtlinie 2206:2021-11 Entwicklung mechatronischer und cyberphysischer Systeme, 2021.
- [4] Wirth, R.; Hipp, J.: CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining. Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining, 2000.
- [5] Schneider, A; Gowri, A. B., Enge-Rosenblatt, O.: Systematische Erfassung und Analyse von Schwingungsdaten für industrielle Anwendungen mit Hilfe von KI-Workflows. 4. VDI-Fachtagung "Schwingungen 2023", Würzburg, 27.-28. November 2023, 319ff.