

Erfahrungsbericht bei der Umsetzung der VWS Type 3 Interaktionen in einer Maintenance-Anwendung

R. Islam*, A. Wand**, Ch. Röder**, S. Stamm***, A. Dayeg****, F. Winter****, L. Salaj****, H. Noske*****, B. Denkena*****, Ch. Diedrich*

*Otto von Guericke University Magdeburg, Magdeburg, (christian.diedirch@ovgu.de, rafiul.islam@ovgu.de).

** SEITEC GmbH (aw@seitec.info, cr@seitec.info)

***Lauscher Präzisionstechnik GmbH, (siebo.stamm@lauscher.de)

**** FAUSER AG, (aymen.dayeg@fauser.ag, florian.winter@fauser.ag, luan.salaj@fauser.ag)

***** Universität Hannover, IFW (denkena@ifw.uni-hannover.de, noske@ifw.uni-hannover.de)

Abstract:

Intelligente Fertigungssysteme integrieren heutzutage den operativen Produktionsbetrieb mit den dispositiven Aufgaben rund um das MES (Manufacturing Execution System). In diesem Beitrag wird anhand einer Instandhaltungstechnischen Aufgabe eine dezentrale Lösung für die Ableitung des Wartungsbedarfes mittels Verwaltungsschalen (VWS) und die Terminplanung durch das MES vorgestellt. Diese beruht auf den Typ 3 VWS, die mittels I4.0 Sprache die notwendigen Nachrichten austauschen. Diese Nachrichten basieren auf Kommunikationsmustern des MES Standards IEC 62264 (ISA 95). Die Architektur wird vorgestellt, mit den verwendeten Interaktionslösungen untersetzt und die daraus resultierenden Erfahrungen erläutert.

Keywords: Digital Twin, Interaktionsmuster, Maintenance, VWS, peer-to-peer

1 Einleitung

Eine effiziente Produktionsplanung und -steuerung ist prinzipiell stark von einer präzisen und vorausschauenden Instandhaltungsplanung abhängig [SEZ18]. Basierend auf einer ausreichenden Datenqualität [DEN19], [DEN20a] sollten Maschinenausfälle korrekt prognostiziert werden, um notwendige Gegenmaßnahmen wie z.B. die Umplanung bzw. Neuplanung von Aufträgen schnellstmöglich einzuleiten. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) können eine solche Datenbasis aufgrund begrenzter Ressourcen und der nicht wirtschaftlichen Nachrüstung von Bestandsmaschinen oftmals nicht vorhalten [KUH17]. Laut Zonta et al. sind folgende Limitierungen für eine praxisnahe Überführung ausschlaggebend [ZON20]:

- Notwendige Maschinendaten für maschinenindividuelle Instandhaltungsprognosen sind in der Praxis kaum vorhanden. Maschinenindividuelle Instandhaltungsprognosen sind damit bisher nicht realisierbar.
- Es existiert zumeist keine einheitliche Anbindung für Maschinendaten.
- Es findet zumeist keine Verknüpfung mit Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen statt.

Dieser Beitrag berichtet von dem Verbundprojekt „BaSys4iPPS“, in dem eine Methode zur integrierten Instandhaltungs- und Produktionsplanung durch dezentrale Instandhaltungsprognose für Bestandsmaschinen von KMU entwickelt und mithilfe der BaSys-Referenzarchitektur umgesetzt wird. Die Ergebnisse werden an realen Werkzeugmaschinen der Lauscher Präzisionstechnik GmbH (Lauscher) erprobt, die als repräsentatives KMU der

Zerspanungsindustrie angesehen werden kann. Damit soll eine signifikante Reduzierung unerwarteter Produktionsstillstände und eine deutliche Erhöhung der Planungssicherheit ermöglicht werden.

Ausgangspunkt der hier dargestellten Lösung ist die Verwendung von Verwaltungsschalen [VWS22] des Typ 3 [VDI19], [BEL19] mit der I4.0 Sprache (die in das Basyx-Framework integriert werden), die vor allem die Interaktionen zwischen den Maschinen VWS und der MES VWS umsetzt. Dabei werden Interaktionsmuster angewendet, wie sie in IEC 62264 Teil 5 (auch als ISA 95 bekannt) [IEC16] definiert worden sind. In diesem Beitrag steht der Aspekt der dezentralen Agentenumsetzung zunächst im Hintergrund. Berichtet wird über die anwendungs- und kommunikationsbezogene Architektur und den Erfahrungen bei der Konzeption und Umsetzung.

2 Stand der Technik

2.1 Instandhaltungskonzepte

In der Literatur sind verschiedene Instandhaltungskonzepte beschrieben. Bei der geplanten zeitabhängigen Instandhaltung werden Instandhaltungsaktivitäten unabhängig vom tatsächlich erfassten Zustand der Komponente durchgeführt. Ziel ist es, den Abnutzungsprozess von Maschinenkomponenten durch regelmäßige Wartungen zu verlangsamen. Es wird die Annahme getroffen, dass das Ausfallverhalten bekannt ist und statistisch abgebildet werden kann. Hierfür werden Herstellerinformationen über in Massen hergestellte Maschinenkomponenten herangezogen [PEN10, SCH07]. Auf Basis dieser Informationen werden Wartungen in periodischen Abständen oder auf Basis eines Betriebsstundenzählers durchgeführt. Bei dem Einsatz von Betriebsstundenzählern werden die Betriebsstunden der jeweiligen Maschinenkomponente erfasst und mit einem oder mehreren Grenzwerten verglichen. Dieses Vorgehen wird im Folgendem als Instandhaltungsvariante 1 bezeichnet.

Die geplante zeitabhängige Instandhaltung ist bei Komponenten mit stark streuenden maximalen Laufzeiten nur bedingt für die Wartungsplanung geeignet. Die Streuung der Lebensdauer von Maschinenkomponenten erklärt sich durch verschiedene Faktoren wie Umwelteinflüsse, Zustand von Nachbaraggregaten, aber auch Vorschädigungen bei Fertigung und Montage sowie außergewöhnliche Betriebsfälle. In der Folge führen vorzeitig, bzw. unnötig durchgeführte Wartungsaktivitäten bei der zeitabhängigen Instandhaltung zu erhöhten Kosten. Maschinenzustandsüberwachungen ermöglichen die Erfassung des technischen Zustands von Maschinenkomponenten und damit eine zustandsbasierte Wartung. Die Durchführung einer Zustandsüberwachung setzt voraus, dass zustandssensitive Überwachungssignale zur Zustandsbewertung vorhanden sind [STU90, PEN10]. Die zustandsorientierte Wartung ist gegenüber der zeitorientierten Wartung bei Komponenten mit einer stark streuenden Lebensdauerverteilung im Vorteil [HAS11].

Auf Basis einer Zustandsüberwachung und Restnutzungsdauerprognose (RUL-Prognose) können Instandhaltungsmaßnahmen vorausschauend geplant werden. Zu diesem Zweck werden die folgenden Schritte vorgeschlagen. In einem ersten Schritt erfolgt die Akquise zustandssensitiver Überwachungssignale und sogenannter "run-to-failure"-Daten, die den Zustand der betrachteten Maschinenkomponente im Lebenszyklus beschreiben. Anschließend wird ein sogenannter Zustandsindex abgeleitet, der sich mit dem Zustand der Maschinenkomponente verändert. Mit dem Wissen über den Verlauf des Zustandsindex im Störungszustand einer Maschinenkomponente lässt sich dessen Verlauf in verschiedene Zustandsphasen unterteilen. Eine RUL-Prognose wird durchgeführt, wenn eine Zustandsphase erreicht wird, die einen kritischen Zustand beschreibt. Auf Basis des Zustandsindex und eines gesetzten Schwellwertes erfolgt im letzten Schritt die Prognose des Ausfallzeitpunkts. Methoden zur RUL-Prognose werden den folgenden Kategorien zugeordnet: Physikalische Ansätze, statistische Ansätze, KI-Ansätze und hybride Ansätze [LEI18]. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als Instandhaltungsvariante 2 bezeichnet.

In der Praxis werden für das Auslösen von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen feste Intervalle der Betriebsstunden der jeweiligen Maschine herangezogen. Für Werkzeugmaschinen werden diese bereits vom Hersteller bereitgestellt. Dabei werden die jeweiligen Komponenten einer Werkzeugmaschine in Wartungspläne gleicher Betriebslaufzeit zusammengefasst. Diese Pläne enthalten jedoch nur einen reduzierten Anteil der Komponenten, eine Gesamtauflistung ist nicht vorhanden. Dies bedeutet, dass ein Teil der Komponenten lediglich Ausfall-basiert instandgehalten werden kann, was zu ungeplanten und plötzlichen Produktionsausfällen und hohen Opportunitätskosten führen kann. Durch die manuelle, wöchentliche Erfassung der Betriebsstunden kann der

Wartungsbedarf ermittelt und eingeplant werden. Dies stellt aus heutiger Sicht für viele Betreiber einen Fortschritt dar. Eine Interaktion zwischen den Maschinen und dem MES als planende Instanz für den Produktionsablauf und die Einordnung der Wartungsarbeiten ist bisher nur eingeschränkt möglich. Den Maschinen wird im MES eine Kapazität von der Fertigungsplanung zugeordnet und auch durch diese überwacht bzw. ggfs. angepasst. Hierfür werden sowohl die Verfügbarkeit von Ressourcen (wie z.B. verfügbare Belegungszustände der Maschinen, Material als auch vom Personal) in Betracht gezogen. Im Rahmen dieser Kapazität nimmt das MES die Einplanung der Produktionsaufträge entsprechend der Liefertermine vor und bildet so eine Auftragsbelegungsliste für jede Maschine. Diese Belegungsliste wird anschließend an der Maschine bereitgestellt, wodurch eine Reihenfolge der zu bearbeitenden Aufträge unter Beachtung aller relevanten Abhängigkeiten zwischen den Aufträgen auf verschiedenen Maschinen vorgegeben wird.

Im Falle einer Wartung- und Instandhaltungsmaßnahme übernehmen mehrere Personen unterschiedliche Aufgaben. Zunächst muss der Wartungsbedarf ermittelt werden, anschließend müssen die zur Wartung notwendigen Betriebsmittel vor Ort sein oder beschafft werden. Gleiches gilt für das notwendige Personal mit den dafür notwendigen Kompetenzen. Darüber hinaus muss zur Festlegung eines Wartungszeitraums, zu dem die Werkzeugmaschine weder verfügbar noch produktiv sein kann, der Produktionsplan mit in Betracht gezogen werden. Vor allem in der Auftragsfertigung mit vielen Abhängigkeiten von Aufträgen untereinander und unterschiedlichen Lieferterminen, bedarf es hoher Anstrengungen einen geeigneten Zeitraum unter der Einhaltung der vorher genannten Anforderungen zu definieren. Dies nimmt in der unternehmerischen Praxis viel Zeit und Kapazitäten in Anspruch und bietet hohes Automatisierungspotenzial.

2.2 Interaktionsmuster zwischen den Maschinen und MES

Das Anwendungsfeld in diesem Projekt betrachtet die Zusammenarbeit zwischen zerspanenden Werkzeugmaschinen und einem MES. Das MES enthält eine Vielzahl von Funktionen, die unterschiedlichen Aufgaben bei der Organisation oder der Steuerung des Produktionsablaufes zuzuordnen sind (Abbildung 1). Diese sind unter anderem im Standard IEC 62264 – auch unter ISA 95 bekannt – zusammengetragen. Dieser umfangreiche Standard definiert eine generelle Architektur, die Funktionsmodularisierung, deren Zusammenwirken, Objektmodelle und auch Interaktionsmuster. Dieser Beitrag bezieht sich dabei auf die Instandhaltungsanforderungen der Maschinen.

Bisherige Maschinenanbindungen an MES-Systeme fokussieren die Übertragung des Betriebszustands der Maschine, um so die Verfügbarkeit abzubilden und eine Steuerung der Fertigung durch Umplanungen von Aufträgen vornehmen zu können. Geplante Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen werden bisher nicht übertragen, da hierzu zusätzliche Informationen notwendig sind, um diese einplanen zu können. Aus diesem Grund werden Informationen, wie die notwendige Dauer und Betriebsmittel der Wartungsmaßnahmen im übergeordneten ERP-System (Enterprise Resource Planning) hinterlegt. Ein weiteres Hindernis stellt der hohe Aufwand der Maschinenanbindung dar, die sich durch gewachsene und heterogene Maschinenparks ergeben und somit jede Maschine individuell angebunden werden muss. Für das Projekt wurde daher festgelegt, dass die Maschinen mit je einer VWS ausgerüstet werden¹. Die VWS erhält die benötigten Daten von der Maschinensteuerung oder über andere zwischengelagerte Informationsquellen, wie z.B. Datenbanken. Auch das MES wird mit einer VWS ausgestattet, damit die standardisierte VWS-Interaktion nach VDI 2193 umgesetzt werden kann.

¹ Auf die Erläuterung der Verwaltungsschale wird hier aus Platzgründen verzichtet.

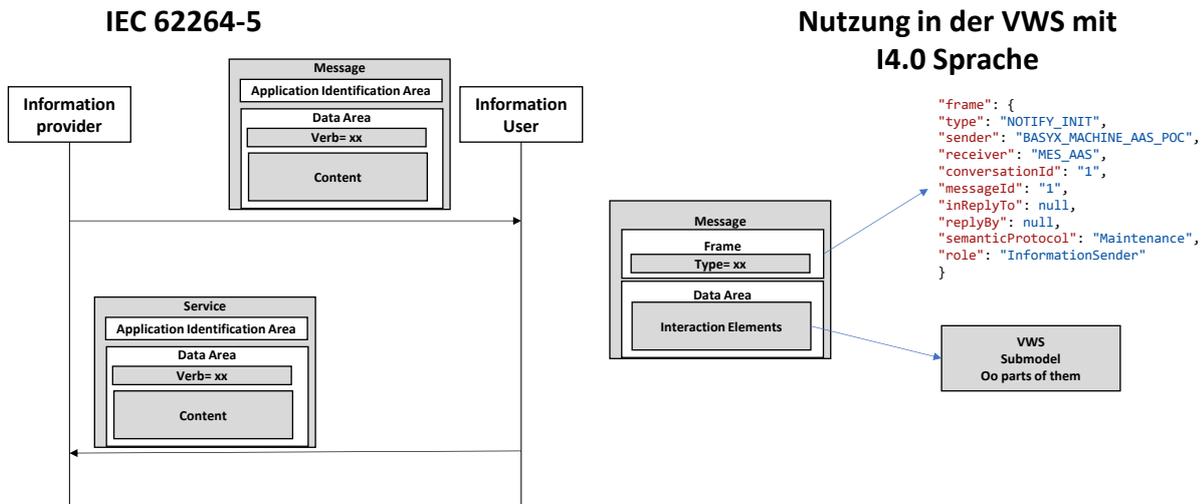


Abbildung 2: Abbildung IEC 62264 Teil 5 auf die I4.0 Sprache

Grundgedanke der Interaktionen sowohl von IEC 62264-5 MES-Standard und der I4.0 Sprache ist es, dass eine asynchrone Kommunikation verwendet wird. Asynchrone Kommunikation bedeutet, dass die Prozesse des Senders nicht auf eine sofortige Antwort warten, sondern eine eigene Instanz (in Abbildung 2 als "Information User" und "Information Provider" bezeichnet) der Interaktion instanziierten, in der der Ablauf des Interaktionsmusters enthalten ist. Das Interaktionsmuster ist also ein „stateful“ Protokoll. Sowohl Sender als auch Empfänger verwalten intern zu jedem Zeitpunkt den Zustand, in dem sich die Interaktion befindet. Erst wenn die Interaktion abgeschlossen ist, werden die Instanzen beendet. Es kommt also ein "peer-to-peer" Kommunikationsmodell zum Einsatz. Dieser Ansatz ist Kommunikationstechnologie-agnostisch. Das bedeutet, es ist unerheblich, ob HTTP/Rest, MQTT oder OPC UA als Kommunikationsprotokoll

3 Lösungskonzept

3.1 Die Architektur aus Anwendungssicht

Das Ziel des Vorhabens besteht in der Realisierung einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung für Bestandsmaschinen von KMU in der zerspanenden Industrie. Die zu entwickelnde Methode wird praxisnah an Werkzeugmaschinen im Bestand der Lauscher Präzisionstechnik GmbH (Lauscher) entwickelt und erprobt, die ein repräsentatives KMU in der zerspanenden Zulieferindustrie der Luft- und Raumfahrttechnik darstellt. Dabei kommt das BaSys VWS Framework zum Einsatz. Die Daten, die über die steuerungsspezifischen Schnittstellen gelesen werden, werden in die für die Instandhaltung projektspezifisch zugeschnittene Teilmodelle der VWS in der Basyx-Software standardisiert eingelagert. Zur Integration genutzter Bestandssysteme werden mithilfe von Edge-Geräten vorhandene Maschinendaten über die jeweiligen, maschinenindividuellen Legacy-Protokolle für BaSys und die VWS zugänglich gemacht. Diese agieren damit als Fundament für eine o. g. Planungsmethodik im MES. Eine Gesamtübersicht ist

Abbildung 3 zu entnehmen. Die Maschinen und das MES-System sind mit VWS ausgerüstet, die gesamte Kommunikation zwischen den Maschinen und dem MES wird von diesen VWS umgesetzt. Lokal werden die Daten zwischen den Maschinen und der VWS bzw. dem MES und der MES VWS über spezifischen Schnittstellen

ausgetauscht. Für eine kooperative Lösung von prognostischen Planungsaufgaben werden dezentrale agentenorientierte Ansätze einbezogen.

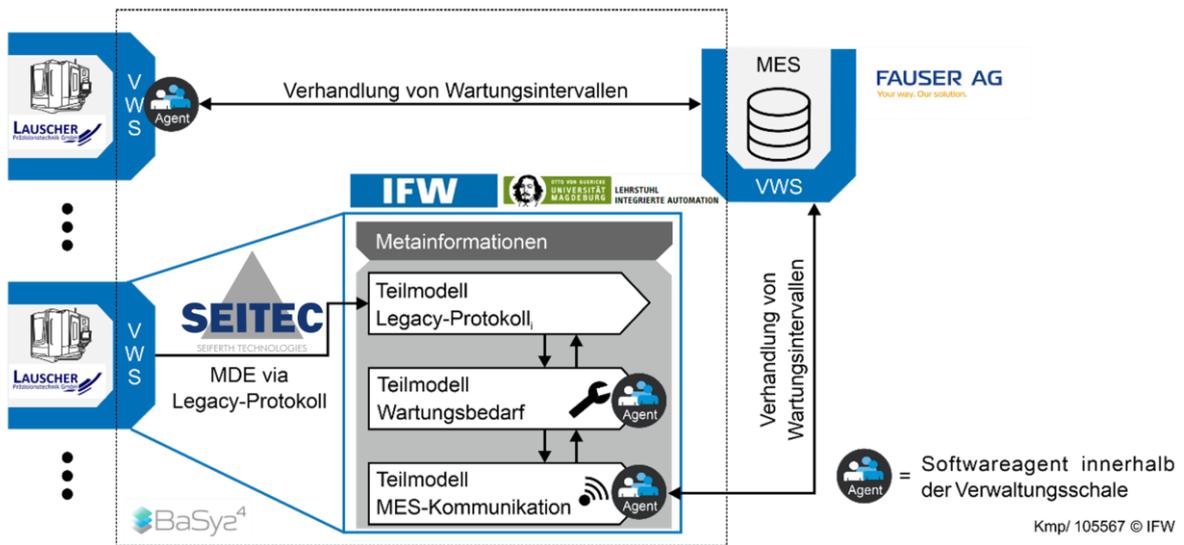


Abbildung 3: Gesamtüberblick über die integrierte Instandhaltung- und Produktionsplanung

3.2 Technologie-orientierte Architekturansatz

Die Architektur ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Datenquellen der Werkzeugmaschinen sind die Maschinensteuerungen. In der Legacy-Variante, d.h. Steuerungen ohne frei zugänglich Steuerungsschnittstelle, werden die Daten in einer Datenbank (DB) hinterlegt. Die entsprechenden Maschinen-VWS greifen über die "IF_DB" auf diese Daten zu. Eine Edge-Komponente, die direkt auf den NC- und SPS-Teil der SINUMERIK-Maschinensteuerungen über die "IF_Edge" zugreifen kann, ist die Lösungsvariante für die Maschinensteuerungen mit frei zugänglichen Schnittstellen. Die Verwaltungsschalen lesen in beiden Varianten die benötigten Daten aus der Datenbank bzw. direkt von der Maschinensteuerung zyklisch aus. Die Verwaltungsschalen der Maschinen enthalten in der Variante 1 die Überwachung der geplanten Instandhaltungszyklen und initiieren die entsprechende Einordnung in die Produktionsplanung des MES. Das MES wird ebenfalls mit einer VWS ausgestattet, mit der entsprechenden lokalen proprietären Schnittstelle ("IF_MES"). Die Verwaltungsschalen der Maschinen und die vom MES interagieren und tauschen die Informationen mittels der I4.0-Sprache über die "IF_AAS_AAS" aus.

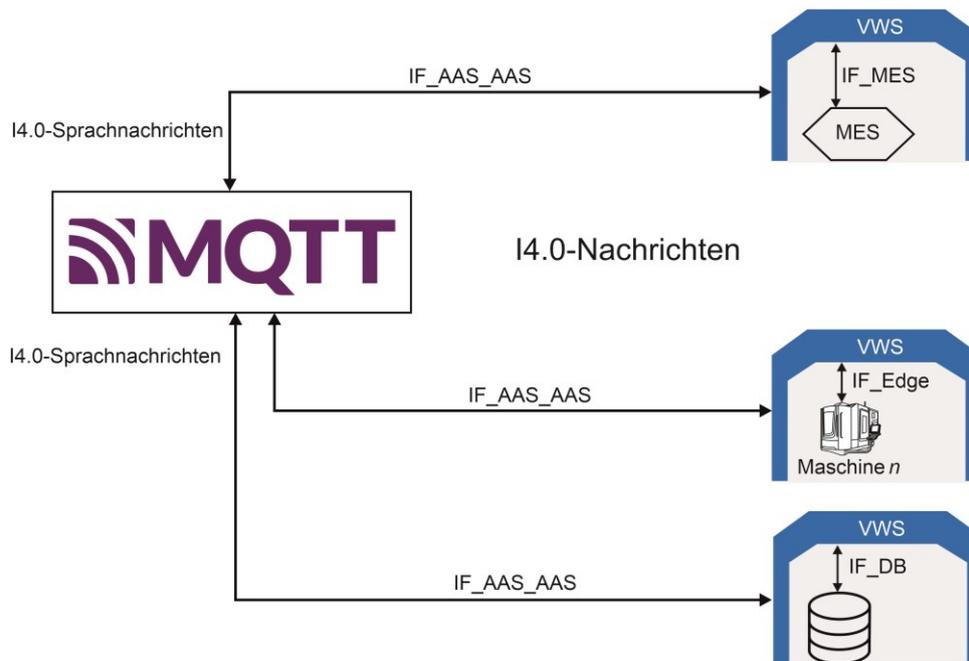


Abbildung 4: Architekturdefinition Instandhaltungsvariante 1

3.3 Die Interaktionsmuster

Abbildung 5 zeigt den Informationsfluss und die Funktionen der Instandhaltungsvariante 1, die die instandhaltungstechnischen Aufgaben, hier die Einordnung der Wartungsarbeiten in die Produktionsabläufe (Terminplanung) auf Basis der Überwachung der tatsächlich vorliegenden Betriebsstunden.

Abbildung 5 a) zeigt das zyklische pollen der Maschinendaten, insbesondere zur Ermittlung der Betriebsstunden in Instandhaltungsvariante 1.

Abbildung 5 b) zeigt mit unterschiedlichen Grautönen verschiedene, unabhängige Interaktionsprozesse, die jeweils aus der Anmeldung eines Wartungsbedarfs und deren erfolgreicher Absolvierung bestehen. Die Initiierung des Interaktionsprozesses wird von der Maschine-VWS ausgelöst und die Beendigung von der MES-VWS. Zwischen beiden Teilprozessen liegt ein nicht vorhersehbarer Zeitabschnitt, in dem physische Aktivitäten an der Maschine auszuführen sind. Das Instandhaltungspersonal gibt eine Meldung nach erfolgreicher Beendigung der Wartungsmaßnahme. Die Prozesse der verschiedenen Maschinen können ineinander verschachtelt sein.

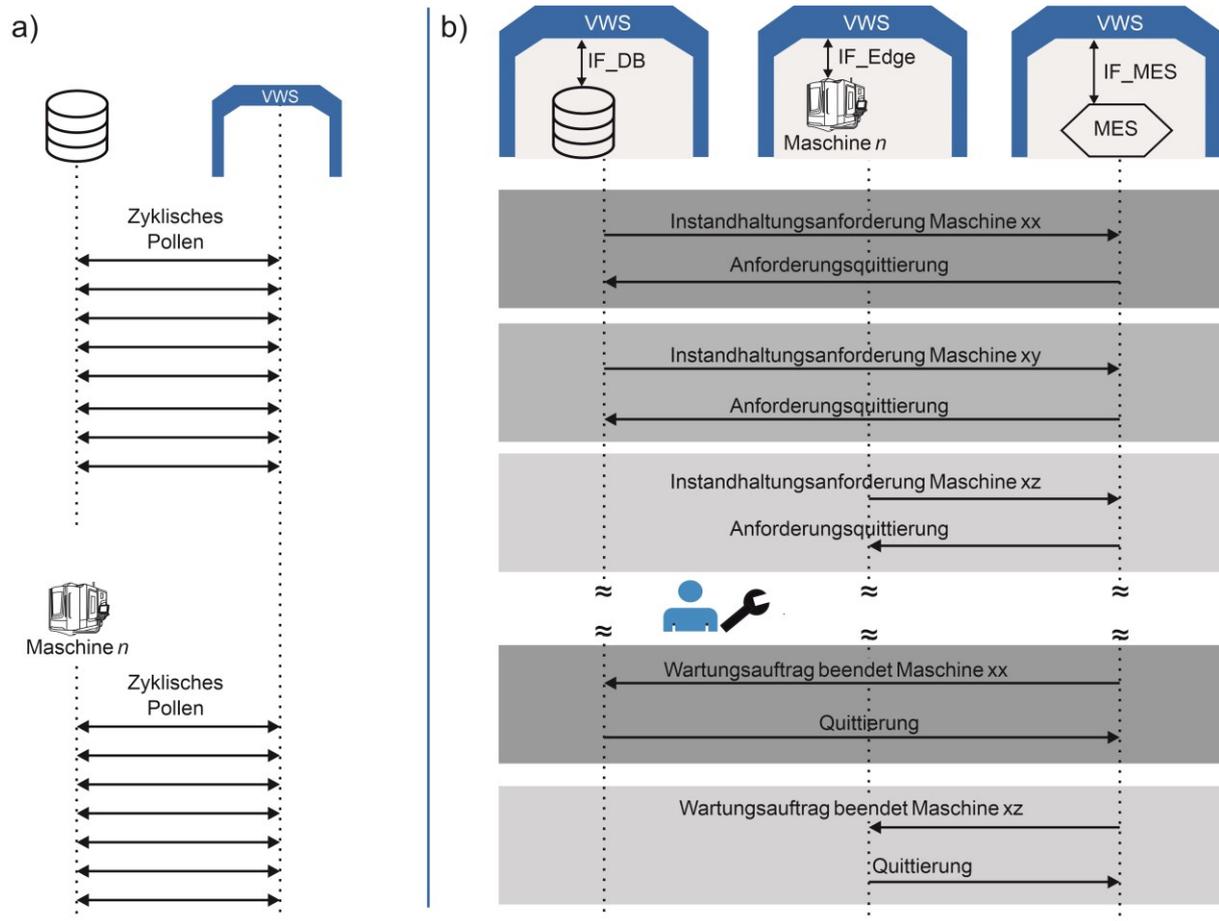


Abbildung 5: Betriebsstundenüberwachung für Wartung bei Maschinensteuerung mit Datenbankanschluss

Zunächst wird das Konzept des Interaktionsprinzips am Beispiel der Instandhaltungsvariante 1 erläutert. Beide Interaktionspartner (Maschinen- und MES-VWS) nehmen aktive Rollen ein, d.h. es liegt ein "peer-to-peer"-Interaktionsmuster vor. Beide Interaktionspartner agieren auf der Anwendungsseite zustandsbehaftet. Die Maschinen-VWS wartet nicht nur darauf, ob die Nachricht im MES angekommen ist, sondern ob diese den Wartungsbedarf gebucht hat. Hier ist zusätzlich zu beachten, dass zwischen der Wartungsanforderung und der Meldung, dass diese ausgeführt wurde erhebliche Zeiträume vergehen können. In einer Client-Server-Architektur müsste der Client so lange "pollen", bis das erwartete Ergebnis verfügbar ist. Dies erfordert einen zusätzlichen aktiven Prozess im Client, hier in der Maschinen-VWS. Denn es muss nach erfolgreich durchgeführter Wartung der Stundenzähler für die jeweiligen Wartungsintervalle zurückgesetzt werden. Außerdem muss die MES-VWS den aktuellen Zustand der Wartungsintervallüberwachung jeder einzelnen Maschine verwalten. Dieses Interaktionsmuster ist durch die Informationsflussrichtung von der Datenquelle (Maschine) zur Datensinke (MES) charakterisiert, die bei einem Ereignis (hier die Überschreitung der Betriebsstunden für ein Wartungsintervall) aktiviert wird. Eine zentrale Einrichtung, die den Gesamtprozess organisiert entfällt. Zusammengefasst haben wir hier es mit einem "peer-to-peer", zustandsbasierten und ereignisgesteuerten Interaktionsmuster zu tun. Dieses Interaktionsprinzip entspricht dem einer konversations-orientierten Middleware, wie es in dem umfangreichen Artikel von Ivaki et. al. [IVA16] beschrieben ist. Die persistente Speicherung der Zustände der Interaktion für die Wiederherstellung des Interaktionszustandes bei Ausfall einer Komponente sowie das wiederholte Senden von nicht quittierten Nachrichten gehören zu den wesentlichen Eigenschaften dieses Prinzips.

Die Abbildung 6 zeigt ausschnittsweise die Interaktion zwischen den Maschinen- und MES-VWS im Detail. Wird in der Maschinen-VWS eine Grenzwertüberschreitung der Betriebsstunden für einen der Wartungsintervalle registriert, erfolgt zunächst eine Instanziierung des Interaktionsprozesses. Ist dies erfolgt, wird nach IEC 62264-5 eine "notify_init" Nachricht an die MES-VWS versendet. Darin sind die benötigten Informationen (die in einem

entsprechenden Wartungs-Teilmodell in der VWS hinterlegt sind) in I4.0-Sprache (JSON-Format) enthalten. Die MES-VWS instanziiert ebenfalls einen entsprechenden Interaktionsprozess in dem die MES-VWS quittiert ("notify_accepted"), wenn diese Nachricht an das MES ausgeliefert worden ist. Dadurch ist in der Maschinen-VWS bekannt, dass eine Bearbeitung des Auftrags erfolgt. Erhält die Maschinen-VWS innerhalb einer vordefinierten Zeit keine "notify_accepted" Nachricht, so wird das "notify_init" mehrmals wiederholt. Nach 5-maliger Wiederholung wird dann abgebrochen und ein Verbindungsfehler lokal gemeldet.

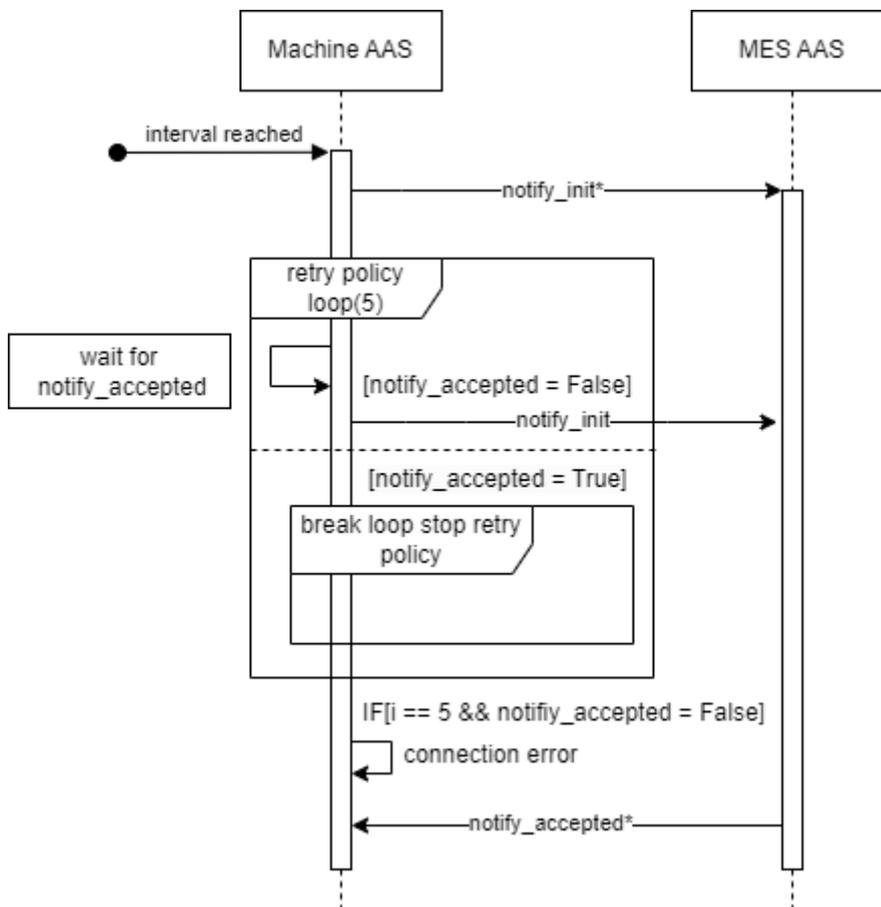


Abbildung 6: Nachricht von Maschinen-VWS and MES-VWS nach Interaktionsmuster von IEC 62264-5

Wie oben bereits erwähnt, kann die Ausführung der physischen Wartungsarbeiten Stunden oder Tage dauern. Ist der Auftrag erfüllt sendet das MES eine entsprechende Nachricht und die MES-VWS sendet eine "change"-Nachricht an die entsprechende Maschinen-VWS mit an dem zugehörigen Interaktionsprozess (Abbildung 7). Die Maschinen-VWS hat diese Nachricht ebenfalls zu quittieren ("respond"), um sicher zu gehen, dass die VWS aktiv ist. In der Maschinen-VWS ist der Betriebsstundenzähler für das Instandhaltungsüberwachungsintervall auf null zu setzen und eine lokale Kopie des Vorgangs zu erstellen (u.a. wann gemeldet, wann erfolgreich abgeschlossen). Ist die Interaktion beendet, werden beide Prozesse gelöscht. In der Maschinen-VWS erfolgt eine Speicherung der notwendigen Daten für den jeweiligen Wartungsauftrag (persistente VWS).

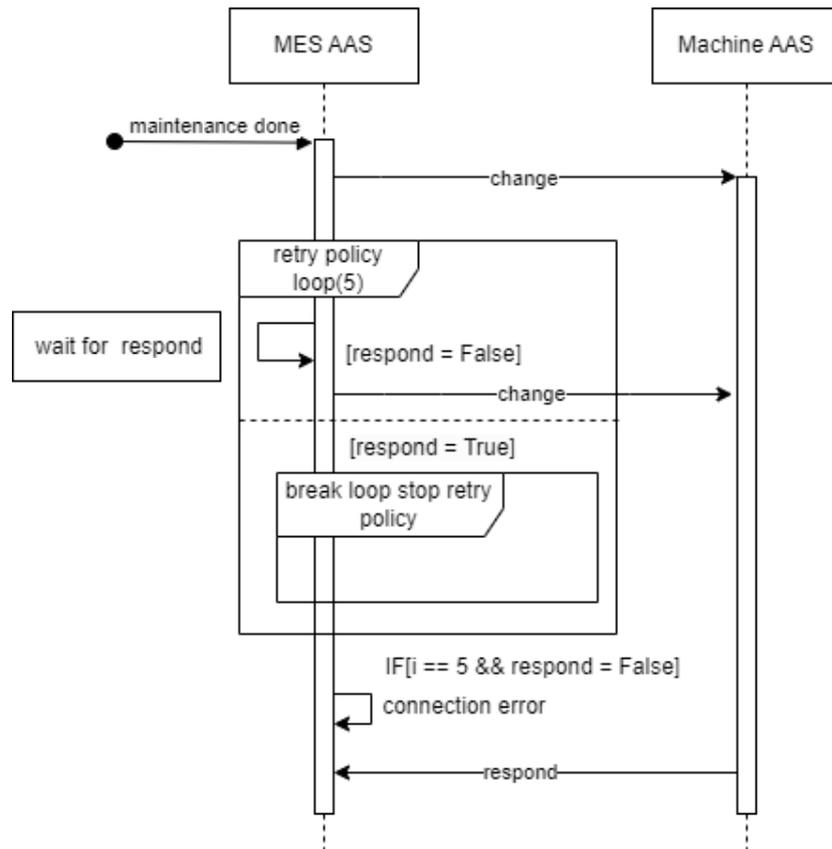


Abbildung 7: Nachricht von MES VWS an Maschinen VWS nach Interaktionsmuster von IEC 62264-5

In beiden Teilinteraktionen werden unterschiedliche Diensttypen verwendet. Der “Notify”-Dienst zeigt ein Ereignis im Absender an, er zielt nicht auf ein bestimmtes Objekt des Empfängers. Im “Change”-Dienst wird dagegen gezielt etwas beim Empfänger verändert. Beide Dienste haben also die in IEC 62264-5 definierten unterschiedlichen Bedeutungen und werden deshalb auch entsprechend in diesem Interaktionsmuster verwendet.

3.4 Agentenintegration – ein Ausblick

Der unter 3.3 geschilderte Prozess ist kommunikativ verhältnismäßig einfach umzusetzen. Trotzdem ist er für viele Unternehmen ein bedeutender Schritt, weil die Einordnung der geplanten Instandhaltung in die Produktionsplanung von der Maschine selbst automatisch eingeordnet werden kann. Der nächste Schritt, die Instandhaltungsvariante 2 (Abbildung 8), ist eine zustandsbasierte Überwachung der Maschinenkomponenten (z.B. Spindelantrieb, Hydrauliksystem). Durch eine RUL-Prognose (siehe Abschnitt 2.1) wird ein potentieller Ausfall vorhergesagt. Mit dieser Auskunft kann dann wieder im MES, automatisch eine Einordnung der Wartungsmaßnahme vorgenommen werden. Für diese Aufgabe werden dezentrale Agenten an die Maschinen-VWS angekoppelt und ein zusätzlicher Management-Agent erstellt. Auch der Management-Agent wird mit einer VWS ausgestattet, um die in der Instandhaltungsvariante 1 vorhandene Interaktionsprinzipien anwenden zu können. Von den Agenten sind folgende Aufgaben zu lösen:

- Maschinen-Agent
 - Dieser Agent überwacht die zyklisch anfallenden Maschinendaten und ermittelt daraus den Nutzungsvorrat und gegebenenfalls prognostisch einen potentiellen Komponentenausfall.
 - Dazu verwendet er den Ausfallwahrscheinlichkeitsdienst des Management-Agenten.
 - Der prognostizierte Ausfallzeitpunkt wird an den Management-Agenten gesendet.

- Management-Agent
 - Ermittlung eines potentiellen Reparaturauftrages. Ausgangspunkt ist der vorbestimmte Ausfallzeitpunkt. Dazu gehören:
 - Bestimmung der benötigten Ersatzteile und deren zeitliche Verfügbarkeit. Ersatzteile können im lokalen Lager liegen, innerhalb von 24h verfügbar sein oder erst nach mehreren Tagen oder Woche geliefert werden. Dazu existiert in unserem Anwendungsfall bei Lauscher eine entsprechende Datenbank. Diese wird vom Management-Agenten lokal abgefragt.
 - Bestimmung des Personals, die die Wartung vornehmen soll. Dazu existiert bei Lauscher eine Kompetenzmatrix, die zum Maschinentyp und zum Gewerk Auskunft gibt.
 - Bestimmung der Zuordnung des ausgewählten Personals zu den Schichten.
 - Bestimmung der Fertigungsaufträge auf anderen Maschinen, die ggf. durch die Wartung durch das zugeordnete Personal betroffen sind
 - Information aller betroffenen Maschinen-Agenten
- Maschinen-Agent
 - Alle durch die Wartung betroffenen Maschinen-Agenten verhandeln kollaborativ einen Wartungszeitraum, der möglich und kostenminimal ist
 - Dieser Wartungszeitraum wird an den Maschinen-Agent kommuniziert
- Management-Agent
 - Der Management-Agent gibt den Vorschlag an das MES weiter
 - Die Einordnung des Wartungsauftrages wird dann vom MES geprüft und vorgenommen.

Die Interaktionen zwischen allen Komponenten (auch zum Ersatzteil-Dienst, Personal-Dienst und Ausfallwahrscheinlichkeits-Dienst) verwenden die I4.0-Sprachnachrichten. Der Austausch der Nachrichten der I4.0-Sprache erfolgt über MQTT.

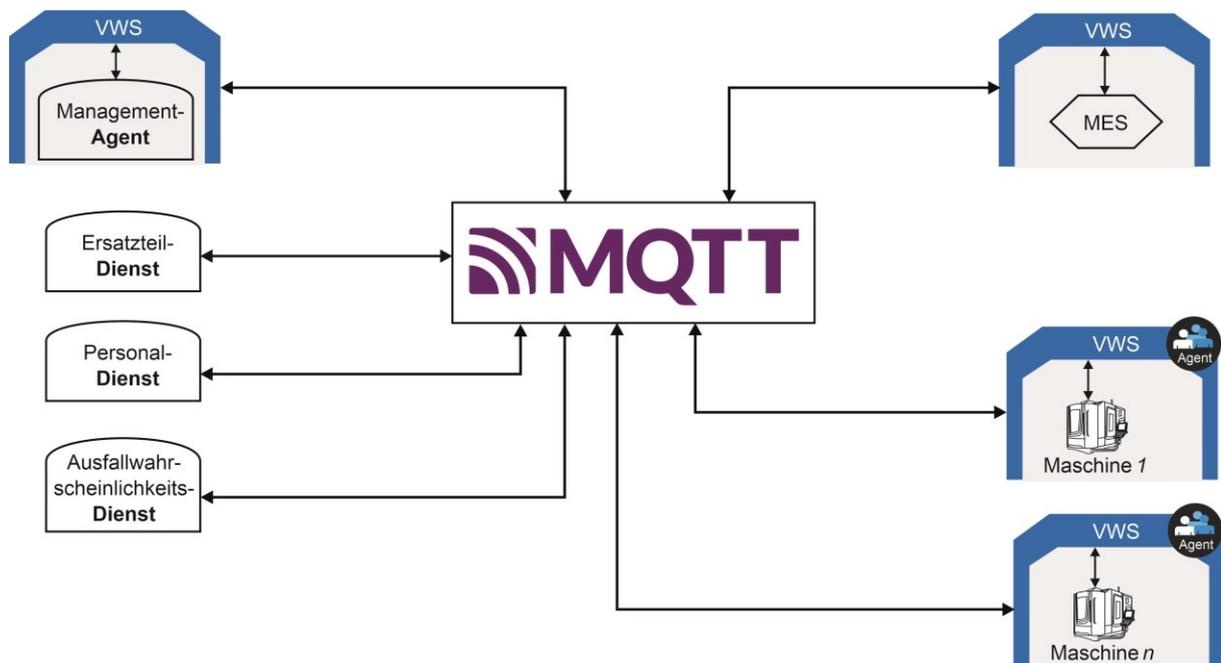


Abbildung 8: Ausblick mit Agenten (Instandhaltungsvariante 2)

4 Zusammenfassung und Erfahrungen

Im Projekt wurden folgende wesentliche Erfahrungen gemacht:

- Da alle Komponenten einen aktiven Part in der Interaktion einnehmen, ist eine asynchrone "peer-to-peer"-Interaktion zwischen den Anwendungen erforderlich.
- Eine reine Client-/Server Kommunikation auf Anwendungsseite ist nicht angebracht, da durch die Verteilung der Instandhaltungstechnischen Aufgaben, zwischen Maschinen- und MES-VWS die Zustandsinformationen gehalten werden müssen.
- In der VWS muss eine persistente Datenhaltung vorhanden sein, da bei Neustart der VWS auf die bereits vorhandenen Informationsstände zurückgegriffen werden muss (z.B. wie viele Wartungszyklen wurden schon durchgeführt).
- Das "Befüllen" der VWS ist proprietär, da ein heterogener Maschinenpark verschiedene Steuerungstypen, Protokolle und Versionsstände mit sich bringt.
- Die Auswirkung der organisatorischen Änderungen in der Produktion und deren Vereinbarkeit des Qualitätsmanagementsystems mit notwendigen Zertifizierungen, müssen parallel zur Entwicklung eines hier vorgestellten Systems mitgedacht werden. Dabei stehen die Vorteile eines solchen Systems im Vordergrund, da einerseits die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten zur Erfassung der Betriebsstunden und Abklärung der notwendigen Betriebsmittel automatisiert werden und so bei der Planung der Produktion mehrere Ressourcen gleichzeitig Berücksichtigung finden, wodurch die Fertigungsplanung optimal unterstützt wird.

Literaturverzeichnis

- [BEL19] Belyaev A, Diedrich Ch (2019) Aktive Verwaltungsschale von Industrie 4.0-Komponenten - Erscheinungsformen von Verwaltungsschalen. Automation Kongress 2019. VDI Tagungsband – digital.
- [DEN19] Denkena B, Dittrich M-A, Wilmsmeier S (2019) Automated production data feedback for adaptive work planning and production control. *Procedia Manufacturing* 28:18–23.
- [DEN20a] Denkena B, Dittrich M-A, Keunecke L, et al. (2020) Continuous modelling of machine tool failure durations for improved production scheduling. *Prod. Eng. Res. Devel.* 14(2):207–215.
- [HAS11] Hashemian HM (2011) State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques. *IEEE Trans Instrum Meas* 60:226–236. doi:10.1109/TIM.2010.2047662.
- [IEC13] IEC 62264-1:2013: Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology. IEC Geneva 2013.
- [IEC16] IEC 62264-5:2016: Enterprise-control system integration — Part 5: Business to manufacturing transactions. IEC Geneva 2016
- [IVA16] Ivaki N, Laranjeiro N, Araujo F (2018) A survey on reliable distributed communication. *The Journal of Systems and Software* 137:713-732. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssw.2017.03.028>.
- [KUH17] Kuhnle A, Kuttler M, Dümpelmann M, et al. (2017) Intelligente Produktionsplanung und -steuerung: Erlernen optimaler Entscheidungen. *wt Werkstatttechnik online* 107(9):625–629.
- [LEI18] Lei Y, Li N, Guo L et al. (2018) Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing* 104:799–834. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016>.

- [PEN10] Peng Y, Dong M, Zuo MJ (2010) Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 50:297–313. doi:10.1007/s00170-009-2482-0.
- [SCH07] Schwabacher M, Goebel K (2007) A survey of artificial intelligence for prognostics. AAAI Fall Symposium - Technical Report.
- [SEZ18] Sezer E, Romero D, Guedea F, et al. (2018) An Industry 4.0-Enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. IEEE, S.1–8.
- [STU90] Sturm A, Förster R (1990) *Maschinen- und Anlagendiagnostik*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [THE10] AUTOMATION, ZVEI-Fachverband; Theobald, Carolin (2010). *Manufacturing execution systems (MES). Branchenspezifische Anforderungen und herstellerneutrale Beschreibung von Lösungen*. ZVEI, Frankfurt.
- [VDI19] VDI/VDE 2193 Blatt 1: Sprache für I4.0-Komponenten (2019) Düsseldorf: VDI, VDI/VDE 2193 Blatt 2: Sprache für I4.0-Komponenten. Interaktionsprotokoll für Ausschreibungsverfahren. Düsseldorf: VDI.
- [VWS22] Platform Industrie 4.0 (2022) "Details of the Asset Administration Shell. Part 1 - The Exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02)," Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), Berlin.
- [ZON20] Zonta T, da Costa CA, da Rosa Righi R, et al. (2020) Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering* 150:106889.