Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

BaSys4iPPS - Integrierte Instandhaltungs- und Produktionsplanung durch dezentrale Instandhaltungsprognose von Bestandsmaschinen in BaSys 4

in der Fördermaßnahme

„Förderung von Forschungsvorhaben für die Weiterentwicklung des Softwaresystems BaSys 4.0 in der Anwendung"

Autor(en)
Stamm, S.[1]; Röder, Chr.[2]; Wand, A.[2]; Winter, F.[3], Dayeg, A.[3], Salaj, L.[3], Denkena, B.[4]; Kettelmann, S.[4]; Islam, R.[5], Diedrich, Chr.[5]

Projektlaufzeit: 01.01.2022 – 31.03.2024

Erstellungsdatum: 29.08.2024

Projektpartner

Koordinator: Lauscher Präzisionstechnik GmbH[1] (FKZ: 01IS21073A)

SEITEC GmbH[2] (FKZ: 01IS21073B)

FAUSER AG[3] (FKZ: 01IS21073C)

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen[4] (IFW), Leibniz Universität Hannover (FKZ: 01IS21073D)

Lehrstuhl für Integrierte Automation[5] (LIA), Otto-von-Guericke-Universität-Magdeburg (FKZ: FKZ 01IS21073E)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21073A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzbericht ... 3
I.1 Aufgabenstellung ... 3
I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens ... 3
I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick ... 4
II. Teil II Eingehende Darstellung ... 5
II.1 Motivation und Aufgabenstellung ... 5
II.1.1 Allgemeine Ausgangslage ... 5
II.1.2 Zielsetzung des Vorhabens ... 7
II.1.3 Open-Source Bereitstellung ... 8
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens ... 9
II.2.1 Instandhaltungsplanung ... 9
II.2.2 Maschinendatenerfassung bei Werkzeugmaschinen ... 9
II.2.3 Multiagentensysteme ... 10
II.2.4 Verwaltungsschale ... 10
II.2.5 Integration Verwaltungsschale und Agentensysteme ... 11
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 11
II.4 Erzielte Ergebnisse ... 12
II.4.1 Instandhaltungskonzepte ... 12
II.4.2 Algorithmen der Agenten ... 20
II.4.3 Nutzung der Verwaltungsschalen für Maschinen, MES und Agenten ... 21
II.4.4 Deployment und Erprobung bei Lauscher Präzisionstechnik GmbH ... 23
II.4.5 Diskussion der Ergebnisse ... 24
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen ... 27
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse ... 27
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes ... 28
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. ... 28
II.9 Literaturverzeichnis ... 29

I. Teil I Kurzbericht

I.1 Aufgabenstellung

Eine effiziente Produktionsplanung und -steuerung ist stark von einer präzisen und vorausschauende Instandhaltungsplanung abhängig [SEZ18]. Basierend auf einer ausreichenden Datenqualität 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]:

1. Maschinenindividuelle Instandhaltungsprognosen sind aufgrund fehlender Maschinendaten bisher nicht realisierbar.
2. Es existiert zumeist keine einheitliche Anbindung für Maschinendaten.
3. Es findet zumeist keine Verknüpfung mit Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen statt.

Daher ist das Ziel des Verbundprojekts „BaSys4iPPS", mithilfe der BaSys-4-Referenzarchitektur eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung für Werkzeugmaschinen im Bestand der Lauscher Präzisionstechnik GmbH (Lauscher) umzusetzen. Damit soll eine signifikante Reduzierung unerwarteter Produktionsstillstände und eine deutliche Erhöhung der Planungssicherheit ermöglicht werden.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die Instandhaltungsplanung, die Maschinendatenerfassung, die Agentensystemen und die Verwaltungsschale bilden den thematischen Rahmen des Vorhabens.

Das Ziel der **Instandhaltungsplanung** im Allgemeinen ist eine bestmögliche Abwägung zwischen Sicherung einer langfristigen Maschinenverfügbarkeit und der Verursachung von kurzfristigen Maschinenstillständen. Bei der Planung werden dynamische Wechselwirkungen zwischen einer separaten Instandhaltungs- und Produktionsplanung in der Regel vernachlässigt. Es gibt bereits Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung, die auf zustandsbasierten Maschineninformationen basieren. Ein Praxistransfer in industrielle Planungssysteme ist u. a. aufgrund äußerst heterogener Schnittstellen zu Bestandsmaschinen kaum erfolgt.

Die **Maschinendatenerfassung** (MDE) dient grundsätzlich dazu, Zustands- und Prozessdaten, von Fertigungsressourcen – u. a. Werkzeugmaschine – systematisch, manuell oder automatisiert zu erfassen. Bei systematischer Aufzeichnung und Verwendung können Maschinendaten darüber hinaus genutzt werden, um maschinenspezifischen Langzeitbetrachtungen aufzuzeichnen und somit Probleme an Maschine und Anlagen mittel- bis langfristig zu erkennen. Üblicherweise erfassbare strukturierte Maschinendaten sind in diesem Zusammenhang herstellerspezifische Stammdaten, Daten über den Maschinenstatus, allgemeine und maschinenspezifische Fehler und Fehler-Logs, sowie typische NC-Daten. Werkzeugmaschinen-spezifische Schnittstellenstandards existieren erst seit kurzem und sind in der industriellen Praxis noch nicht oder nur sehr vereinzelt vorzufinden.

Agentensysteme (engl.: „Multi Agent System", MAS) bestehen aus lokalen Softwareagenten, die allgemein als flexible und autonome Entitäten zu definieren sind. Eine verbreitete Form sind sog. Belief-Desire-Intention-Agenten (BDI-Agenten). Sie sind befähigt, auf Basis der

wahrgenommenen Umgebung und ihren individuellen Zielen Handlungsentscheidungen zu treffen [WOO08]. Somit können z. B. Instandhaltungsprognosen über zur Verfügung stehende Maschinendaten individuell ermittelt und Wartungsintervalle gesamtoptimal verhandelt werden. Trotzdem sind sie kaum in Industrieanwendungen überführt.

Ein Lösungsansatz für informationstechnische Herausforderungen heutiger Produktionsanlagen ist der digitale Zwilling. Ein konkreter Vorschlag der Plattform Industrie 4.0 und der Industrial Digital Twin Association (IDTA) zur Realisierung des digitalen Zwillings ist die **Verwaltungsschale** (VWS). Das Ziel der VWS ist es, ein einheitliches Beschreibungsmittel für Assets bereitzustellen und somit einen interoperablen Datenaustausch über den gesamten Lebenszyklus entlang des Wertschöpfungsprozesses zu ermöglichen. Die VWS ermöglicht jedoch im aktuellen Entwicklungsstand noch nicht alle Voraussetzungen für dezentrale Prognoseprozesse.

Bei Agentensystemen sind solche Strukturen dagegen Stand der Technik. Folglich ist es vielversprechend, die VWS und BDI-Agenten architektonisch so zu verbinden, dass der standardisierte Ansatz der VWS mit den für mehr Autonomie und Flexibilität geeigneten Strukturen der BDI-Agenten kombiniert werden kann.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Kern des Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung der Instandhaltung in KMUs auf der Basis digitaler Technologien. Dabei wurde zunächst die Einordnung der geplanten Instandhaltung in die gesamte Produktionsplanung mittels Verwaltungsschalen automatisiert. Damit ist eine Verwaltungsschalen-basierte Vernetzung von Maschinen und MES entwickelt und bei Lauscher umgesetzt worden. Im zweiten Szenario konnte eine vorausschauende Einplanung der Instandhaltung entwickelt und getestet werden. Dabei wird aus Echtzeitdaten der Maschinenkomponenten ein potenzieller Ausfall bestimmt und anschließend iterativ mit der Produktionsplanung des MES ein Optimum des tatsächlichen Reparaturtermins bestimmt. Hier konnte gezeigt werden, dass der durchschnittliche Lieferterminverzug und die Wartungsdauer reduziert werden kann. Die softwaretechnische Basis der Verwaltungsschale bilden die Java- und die C#-Variante des BaSyx-SDK.

Im Einzelnen konnten folgende Erfahrungen bei der Umsetzung gemacht werden:

- Die unterschiedliche Namensgebung von Maschinen und Ressourcen ist in gewachsenen Systemen in Unternehmen eine Herausforderung für die Planung
- Durch die Verwendung von Verwaltungsschalen wird das Erfassen, Auslösen und Dokumentieren von Wartungen in einem ganzheitlichen digitalisierten System möglich
- Die Verantwortung für Wartungsvorgänge wurde neu so organisiert, dass die Maschinen eigenständig die Wartungsintervalle überwachen und an das MES melden.
    - Für KMUs ist dies eine Neuerung, da statt einer manuellen Erfassung der Betriebsstunden nun eine automatische, exakte Erfassung durchgeführt wird.
    - Die automatische Integration der Wartungsarbeiten in die bestehende Produktionsplanung stellt eine weitere Verbesserung dar.
- Im Rahmen der Evaluation wurde gezeigt, dass dezentrale Agentensysteme in komplexen Planungssituationen (beispielsweise hohe Anzahl einzuplanender Wartungen oder langer Planungshorizont) bessere Ergebnisse als klassische Produktionsplanungssystem liefern können.
- Die Umsetzung in einem KMU kann die dortige IT vor Herausforderungen stellen, da die virtuelle Umgebung hohe Ansprüche an Leistung der Rechner hat

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

In diesem Kapitel wird die allgemeine Ausgangslage im Kontext der integrierten Instandhaltungs- und Produktionsplanung beschrieben und bestehende Limitierungen für einen fehlenden Praxistransfer der Methoden aufgeführt. Dazu wird in Kapitel II.2.1 die aktuelle Situation der Instandhaltungsplanung bei der Firma Lauscher skizziert, die als repräsentatives KMU in der zerspanenden Industrie angesehen werden kann. Außerdem wird die BaSys-4-Middleware (im Folgenden BaSys genannt) als potentielle bzw. in Frage kommende Lösungsalternative kurz erörtert. Da BaSys jedoch nicht ohne eigene Entwicklungen und Modifizierungen für das zu skizzierende Vorhaben herangezogen werden kann, wird darauf aufbauend in Kapitel II.1.2 die Zielsetzung des Vorhabens näher erläutert.

II.1.1 Allgemeine Ausgangslage

Zentraler Bestandteil einer effizienten Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist eine möglichst präzise und gleichzeitig vorausschauende Instandhaltungsplanung [SEZ18], in der Maschinenausfälle korrekt prognostiziert und Umplanungen von Aufträgen entsprechend ausgeführt werden können. Für die korrekte Prognose von Ausfällen ist eine ausreichende Datenqualität von maschinenbezogenen Daten unabdingbar. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) können diese oftmals aufgrund begrenzter Ressourcen [KUH17] und der nicht wirtschaftlichen Nachrüstung älterer Bestandssysteme nicht vorhalten. Nach einer aktuellen Studie von Zonta et al. sind folgende Limitierungen für eine Überführung solcher Ansätze in die Praxis ausschlaggebend [ZON20]:

Limitierung 1: Keine standardisierte und einheitliche Anbindung von Maschinendaten

Eine große Herausforderung besteht immer noch in der standardisierten und einheitlichen Anbindung von Maschinendaten aus der laufenden Produktion. Aufgrund eines oftmals sehr heterogenen Maschinenparks stehen eine Vielzahl von Protokollen und Schnittstellen zur Verfügung. Eine einheitliche Integration wird damit verhindert. Erfolgt trotz des hohen manuellen Aufwands doch eine Integration, so liegen die Maschinendaten aufgrund eben der unterschiedlichen Protokolle und Schnittstellen in äußerst heterogener Form vor. Eine einheitliche Auswertung von Maschinendaten zum Zwecke der Instandhaltungsplanung wird vor diesem Hintergrund erschwert [ZON20].

Limitierung 2: Geringer Praxistransfer von Methoden zur maschinenindividuellen Instandhaltungsprognose

Aufgrund der zuvor genannten Limitierung 1 stehen notwendige Maschinendaten – wenn überhaupt – nur in unzureichender Form zur Verfügung. Im Kontext der Instandhaltungsplanung bedeutet dies, dass wissenschaftlich erprobte Methoden zumeist nur begrenzt anwendbar sind, da eine einheitliche Datengrundlage fehlt [ZON20]. Ein Praxistransfer findet daher nur eingeschränkt statt. Darüber hinaus liegt nur in wenigen Fällen adäquate Infrastruktur vor, die einem praxisrelevantes Betreiben von Methoden zur maschinenindividuellen Instandhaltungsprognosen entgegensteht [KAR19]

Limitierung 3: Keine Verknüpfung mit Produktionsplanungs- und Steuersystemen

Zusätzlich fehlt es an der Integration von Instandhaltungsplanung und Produktionsplanung und -steuerung [ZON20]. Zum System der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zählt insbesondere ein sog. Manufacturing Execution System (MES), dass die Feinplanung und -steuerung von Aufträgen innerhalb der Produktion regelt. Daher findet zumeist keine adäquate Berücksichtigung der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Instandhaltungsplanung und PPS statt [KRÖ14]. Vor diesem Hintergrund greifen KMU vermehrt auf die klassische, vorbeugende Instandhaltungsplanung zurück, in der Wartungen von Maschinen und Anlagen nach festen Planungsintervallen durchgeführt werden.

Eine rein vorbeugende Instandhaltungsplanung kommt diesbezüglich auch beim KMU Lauscher Präzisionstechnik GmbH zum Einsatz. Im verwendeten MES der Firma Fauser AG sind Instandhaltungsmaßnahmen ausschließlich nach fest geplanten Zeitintervallen vorgesehen. Ausfälle von Werkzeugmaschinen zwischen diesen Intervallen führen immer wieder zu kurzfristigen und ungeplanten Produktionsstillständen. Diesbezüglich entstehen fortwährend erhebliche Koordinationsaufwände für eine Um- bzw. Neuplanung von auftragsbezogenen Bearbeitungsprozessen. Dadurch wird die Fertigstellung von Aufträgen verzögert und Liefertermine können zum Teil nicht eingehalten werden. Die Integration einer vorausschauenden Instandhaltungsplanung in die Produktionsplanung ist für ein KMU, so auch für die Lauscher Präzisionstechnik, prinzipiell schwierig. Aufgrund des ungleichartigen Maschinenparks und vorhandener heterogener Schnittstellen der Bestandssysteme konnte bisher eine Anbindung relevanter Maschinendaten an genutzte IT-Systeme nicht erfolgen. Folglich verfügen weder das MES noch andere IT-Anwendungen über keinerlei präzise Information von individuellen Instandhaltungsbedarfen. Damit ist eine adaptive und effiziente Produktionsplanung nicht umsetzbar.

Über die nun zur Verfügung stehende BaSys-Middleware scheint eine kosteneffiziente Anbindung einer Maschinendatenerfassung (MDE) an die genutzten IT-Systeme realisierbar. Einhergehend ist eine vorausschauende Instandhaltungsplanung für die Lauscher Präzisionstechnik umsetzbar. BaSys verfügt über den Virtual-Automation-Bus, mit dem eine einheitliche und interoperable Ende-zu-Ende Kommunikation von Maschinen und höheren Steuerungssystemen (z.B. einem MES) standardisiert umsetzbar ist [KUH21]. Zusätzlich ist die Verwaltungsschale (VWS) in BaSys eingebettet, die industrielle Komponenten in eine einheitliche digitale Repräsentanz überführt und über standardisierte, nicht-proprietäre Schnittstellen einheitliche Informationsmodelle zur Verfügung stellt [PLA20b]. Auf Basis dieser Technologien lassen sich prinzipiell die nach ZONTA ET AL. genannten Limitierungen (1) und (3) umgehen. Maschinenindividuelle Instandhaltungsprognosen (Limitierung (2)) sind mit BaSys in der bisherigen Form allerdings nicht zu realisieren. Es werden dezentrale und individuelle Optimierungsalgorithmen in der VWS benötigt. Eine Integration solcher Algorithmen in die VWS ist methodisch mit Agentensystemen zu erreichen [VOG20]. Darüber hinaus können diese Algorithmen für eine präzise, maschinenindividuelle Instandhaltungsprognose genutzt werden [FOE19], [GLA19]. Eine Integration von Agentensystemen ist nach aktuellem Stand weder in BaSys noch in der VWS-Technologie allgemein erfolgt.

II.1.2 Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Vorhabens besteht diesbezüglich in der Realisierung einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung für Bestandsmaschinen bei der Lauscher Präzisionstechnik. Mithilfe von BaSys und einer agentenbasierten VWS-Erweiterung (Kombination von Agentensystemen und VWS) wird eine einheitliche MDE ermöglicht. Durch bereits zur Verfügung stehende bzw. noch zu konzipierende Teilmodelle der VWS kann mittels BaSys auf relevante Maschinendaten von Bestandsmaschinen standardisiert zurückgegriffen werden. Zur Integration genutzter Bestandssysteme wird die SEITEC GmbH in Zusammenarbeit mit der Lauscher Präzisionstechnik und dem Lehrstuhl für Integrierte Automation (LIA) mithilfe von Edge-Geräten vorhandene Maschinendaten über die jeweiligen, maschinenindividuellen Legacy-Protokolle für BaSys und die VWS zugänglich machen. Diese agieren damit als Fundament für eine o. g. Planungsmethodik im MES, die zusammen von der Fauser AG und dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) konzipiert wird. Eine vom IFW und dem LIA gemeinsam entwickelte, agentenbasierte VWS-Erweiterung, erlaubt damit eine präzisere, maschinenindividuelle Prognose von Instandhaltungszeiten. Eine Übersicht des geplanten Vorhabens ist Abbildung 1 zu entnehmen.

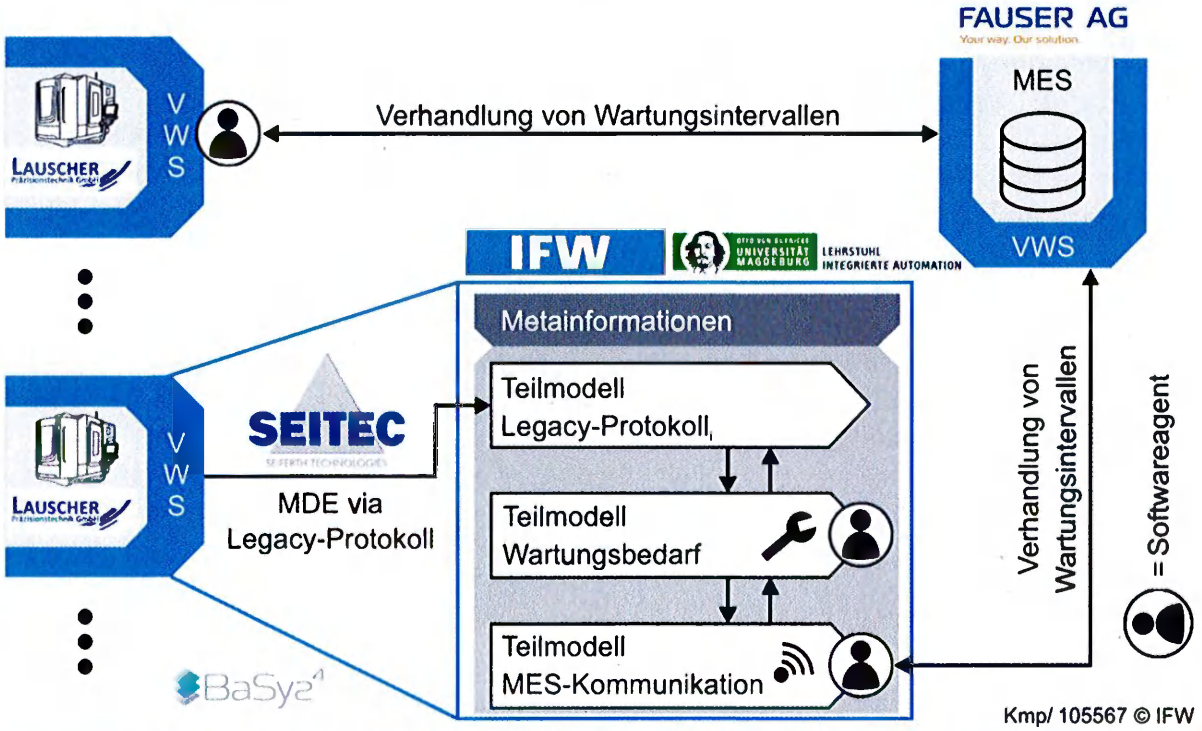

Abbildung 1: Systemschaubild des geplanten Vorhabens zur integrierten Instandhaltungs- und Produktionsplanung

Da bisher weder die o.g. Integration von Agenten- und VWS-Technologie, noch eine Prognose für maschinenindividuelle Instandhaltungszeiten über eine einheitlichen MDE umgesetzt wurden, ergeben sich folgende Teilziele für das Vorhaben:

Teilziel 1:

Notwendige Maschinendaten zur Bestimmung von maschinenindividuellen Instandhaltungszeiten sollen durch Nutzung vorhandener Legacy-Protokolle über standardisierbare Teilmodelle in die VWS überführt werden. Zudem soll eine allgemeingültige Eignung von Agentenformen und -architekturen zur Integration in die VWS für dezentrale, maschinenindividuelle Prognoseprozesse untersucht werden und eine standardisierbare

Implementierung als VWS-Erweiterung in BaSys erfolgen. Damit wird eine Methodik zur einheitlichen MDE und dezentralen Prognoseprozessen für den Praxiseinsatz in BaSys entwickelt.

Teilziel 2:

Eine vertikale Integration von instandhaltungsrelevanten Maschinendaten über alle Hierarchieebenen des RAMI-4.0-Referenzmodells soll durch die standardisierte Architektur von BaSys in Verbindung mit der VWS ermöglicht werden. Auf dieser Grundlage wird eine flexibel skalierbare, integrierte Instandhaltungs- und Produktionsplanungsmethode entwickelt und mithilfe von Basys in die Praxis transferiert. Es gilt zudem zu untersuchen, inwiefern dezentrale Prognoseprozesse ein zentrales Planungssystem ergänzen können, welche Grenzen in der Praxis existieren und welche Ergebnisgüte erreichbar ist.

II.1.3 Open-Source Bereitstellung

Dieses Vorhaben ist an das existierende BaSys-4.0/BaSys-4.2-Verbundprojekt als sog. Satellitenprojekt angegliedert. In diesem wird das BaSys-System des Verbundprojekts bzw. die zur Verfügung stehende Open-Source-Variante BaSyx in anwendungsorientierte Projekten zum Einsatz gebracht und relevante Projektergebnisse als Updates zurückgespielt. Diesbezüglich werden auch zentrale Entwicklungen dieses „BaSys4iPPS"-Projekts für die Weiterentwicklung des BaSyx als Open-Source bereitgestellt werden. Die Projektpartner haben dazu die folgenden Entwicklungen durchgeführt und als Open-Source bereitgestellt:

(1) Teilmodelle der Verwaltungsschale

Die entwickelten Teilmodelle der Verwaltungsschale (MachineMaintenanceSubmodelBasys4iPPS_V5.aasx und MESMaintenanceSubmodelBasys4iPPS_V2.aasx) werden mit Bereitstellung dieses Abschlussberichts als Typ-1-Verwaltungsschale im AASX-Format bereitgestellt. Hierzu wird eine Bereitstellung auf einer Open-Source-Plattform (z. B. www.gitlab.com) angestrebt. Die Ergebnisse werden in der IDTA Submodel Template Maintenance Arbeitsgruppe vorgestellt und diskutiert.

(2) Integration von Verwaltungsschalen Typ 3 Strukturen in die Basyx Open-Source-Software

Zur Realisierung einer maschinenindividuellen Instandhaltungsprognose und zur dezentralen Verhandlung mit einer zentralen integrierten Instandhaltungs- und Produktionsplanungsmethode im MES wird prinzipiell der Typ 3 der VWS benötigt. Die dafür erforderliche I4.0-Sprache, die Interaktionssteuerung und die persistente Datenhaltung wurden in die C# und Java SDK integriert. Für beide SDK werden entsprechende Pull-Request auf Gitlab in den entsprechenden Branches bereitgestellt.

(3) Aufbereitung der Dokumentation in Form von Tutorials

Die Nutzung und Anwendung des bereitgestellten BaSyx-SDK-AddOn kann auf der Basis der üblichen Beschreibungen der Open-Source-Software erfolgen.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

In diesem Kapitel werden zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik in der Instandhaltungsplanung (Kapitel II.2.1), der Betriebs- und Maschinendatenerfassung (Kapitel II.2.2), in Multiagentensystemen (Kapitel II.2.3) und der Verwaltungsschale (Kapitel II.2.4) dargestellt. Abschließend werden relevante Limitierungen zusammengefasst (Kapitel II.2.5).

II.2.1 Instandhaltungsplanung

Instandhaltung ist nach DIN 31051 definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen [...], die dem Erhalt oder der Widereinstellung des funktionsfähigen Zustands dient [...]" und beinhaltet unter anderem die regelmäßige Wartung und Instandsetzung von technischen Anlagen [DIN19]. Die Wartung und Instandsetzung von technischen Anlagen, die sich im hiesigen Vorhaben auf Werkzeugmaschinen beschränkt, kann jedoch größtenteils nur bei vollständigen Maschinenstillständen ausgeführt werden. Dadurch stehen kurzfristig Maschinen- bzw. Produktionskapazitäten nicht zur Verfügung, die im Rahmen einer effizienten und kostenoptimalen Produktionsplanung prinzipiell zu berücksichtigen sind. Daher ist das Ziel der Instandhaltungsplanung im Allgemeinen eine bestmögliche Abwägung zwischen Sicherung einer langfristigen Maschinenverfügbarkeit und der Verursachung von kurzfristigen Maschinenstillständen [WAL03]. Methoden der Instandhaltungsplanung sind prinzipiell in Ansätzen zur Terminierung solcher Maßnahmen [WER12] und Ansätzen zur Integration von Maßnahmen in den Produktionsablauf differenzierbar [MAR09].

Beide Klassifikationen vernachlässigen jedoch dynamische Wechselwirkungen zwischen einer separaten Instandhaltungs- und Produktionsplanung [BUD08]. Eine gesamtoptimale Planung komplexer Produktionsabläufe ist somit nicht zu erreichen. Ein Praxistransfer zustandsbasierter Instandhaltung auf Maschinendatenbasis in **industrielle Planungssysteme** ist u. a. aufgrund äußerst heterogener Schnittstellen zu Bestandsmaschinen kaum erfolgt [ZON20]. Die Nutzung **einheitlicher Standards wie z. B. OPC-UA oder Umati** bieten jedoch mittlerweile Möglichkeiten zur Integration einer einheitlichen MDE [FAA20], [OPC21]. Einheitliche Kommunikationsstandards allein reichen jedoch nicht aus, denn notwendige dezentrale Prognose- und Optimierungsprozesse sind ebenfalls nicht vorhanden [KAR19]. Somit werden die zuvor skizzierten, integrierten Ansätze fast ausschließlich simulativ betrachtet [GLA19, KRÖ14]. Um diese Produktions-planungsansätze in den Praxiseinsatz zu überführen und damit in **MES** zu integrieren, sind Agentensysteme aufgrund ihrer dezentralen und individuellen Entscheidungs-, Optimierungs- und Prognoseeigenschaften äußerst geeignet [FOE19].

II.2.2 Maschinendatenerfassung bei Werkzeugmaschinen

Die Maschinendatenerfassung (MDE) dient grundsätzlich dazu, Zustands- und Prozessdaten, von Fertigungsressourcen (u.a. Werkzeugmaschinen) systematisch, manuell oder automatisiert zu erfassen. Diese Daten stehen damit in einem aggregierten Zustand zur Verfügung und können für die kontinuierliche Nachverfolgung, statistische Auswertung und Überwachung von Maschinen und Anlagen in MES verwendet werden. Bei systematischer Aufzeichnung und Verwendung können Maschinendaten darüber hinaus genutzt werden, um maschinenspezifischen Langzeitbetrachtungen aufzuzeichnen und somit Probleme an Maschine und Anlagen mittel- bis langfristig zu erkennen [KLE15].

Zur Anbindung von Werkzeugmaschinen an MES oder anderen Systemen hat sich in der industriellen Praxis die IP-basierte Vernetzung etabliert. Falls Werkzeugmaschinen nicht IP-basiert angesprochen werden können, sind in der Regel sog. Gateways erforderlich, die eine Bus-spezifische Kommunikation (Profibus, Profinet) in eine IP-basierte Kommunikation übersetzen und so eine Anbindung prinzipiell erlauben [INR21]. Über diese Kommunikationsschnittstellen können Maschinendaten oftmals schon herstellerübergreifend mittels standardisierter Schnittstellen und Protokolle wie *OPC UA* oder *MT Connect* einheitlich und mit geringem Aufwand ausgelesen werden [GIT19].

Neben allgemeinen Schnittstellenstandards existiert für die *OPC UA* Schnittstellen der werkzeugmaschinen-spezifische Schnittstellenstandard *OPC UA Specification for Machine Tools*, der jedoch erst kürzlich veröffentlicht wurde [OPC21]. Gleiches gilt für den werkzeugmaschinen-spezifischen Schnittstellenstandard *Umati* [FAA20]Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben., der in der Version 2.0 zusätzliche Maschinendaten sowie vorverarbeitete Key-Performance-Indikatoren enthalten wird. Diese Schnittstellenstandards werden damit erst zukünftig Berücksichtigung finden und sind in der industriellen Praxis noch nicht oder nur sehr vereinzelt vorzufinden.

II.2.3 Multiagentensysteme

Agentensysteme (engl.: multi agent system, MAS) bestehen aus lokalen Softwareagenten, die allgemein als flexible und autonome Entitäten zu definieren sind. Eine verbreitete Form sind sog. Belief-Desire-Intention-Agenten (BDI-Agenten). Sie sind befähigt, auf Basis der wahrgenommenen Umgebung und ihren individuellen Zielen Handlungsentscheidungen zu treffen [WOO08]. Somit können z.B. Instandhaltungsprognosen über zur Verfügung stehende Maschinendaten individuell ermittelt und Wartungsintervalle gesamtoptimal verhandelt werden. Weiterhin verfügen Agenten über Fähigkeiten wie Reaktivität, Proaktivität und Adaptivität und sind in der Lage, untereinander zu kommunizieren. Die Kommunikation und Infrastruktur von Agentenplattformen ist in den Normen der „Foundation For Intelligent Physical Agents" (FIPA) standardisiert. Durch FIPA-Standards wie der sog. „Agent-Communication-Language" verfügen sie über genormte Kommunikationsrichtlinien und Semantik.

In der Produktionstechnik hat sich außerdem eine holonische Systemstruktur etabliert, die Autonomie und Robustheit stärkt und gleichzeitig **RAMI-4.0-konform** ist [CRU19]. Dadurch bieten Agentensysteme eine Grundlage für die **Realisierung Cyber-physischer Produktionssysteme** [KAR17]. Die Eignung zum Einsatz im Rahmen der PPS ist nachgewiesen [CRU19], [KAR17]. Trotzdem sind sie kaum in Industrieanwendungen überführt [LEI16]. Gründe hierfür sind die Vernachlässigung industrieller Anforderungen wie ein fehlender Middleware-Standard. Die VWS bietet jedoch das Potenzial dieses Hindernis zu beheben [KAR19], wodurch **lokale Middleware-Dienste** in **einer modularen I4.0-Referenzarchitektur** mit standardisierten Anbindungen an IT-Systeme entstehen.

II.2.4 Verwaltungsschale

Eine Lösung für informationstechnische Herausforderungen heutiger Produktionsanlagen, wie eine durchgängige virtuelle Repräsentation aller Betriebsmittel, ist der Digitale Zwilling. Ein konkreter Vorschlag der Plattform Industrie 4.0 und der Industrial Digital Twin Association (IDTA) zur Realisierung des digitalen Zwillings ist die Verwaltungsschale (VWS). Das Ziel der VWS ist es, ein einheitliches Beschreibungsmittel für Assets bereitzustellen und somit einen interoperablen Datenaustausch über den gesamten Lebenszyklus entlang des

Wertschöpfungsprozesses zu ermöglichen. Zur Gewährleistung der Interoperabilität stützt sich die VWS auf standardisierte Informationsmodelle, sogenannte Teilmodelle und deren Teilmodellelemente, welche im Metamodell der VWS definiert sind [PLA20a].

Angesichts ihrer Rolle im Wertschöpfungsprozess existieren drei verschiedene Formen der VWS: passiv, reaktiv und proaktiv [PLA18]. Die proaktive VWS beinhaltet die Datenmodelle der VWS, wie sie in der passiven und reaktiven Form verwendet werden und ergänzt diese um Autonomie und aktive Interaktionsfähigkeit durch Nutzung der I4.0-Sprache. Bisher ist das Interaktionsprotokoll „Ausschreibungsverfahren" spezifiziert, welches am Contract Net Protocol der FIPA angelehnt ist. Damit sind Verhandlungsprozesse zwischen mehreren VWS umsetzbar. Für ein autonomes, zielgerichtetes Verhalten von Komponenten sind außerdem Entscheidungs- und Optimierungsalgorithmen in der proaktiven VWS eingebettet. Diese Strukturen sind bislang nicht Teil der Spezifikationen und decken im aktuellen Entwicklungsstand der VWS nicht die notwendige Autonomie und Flexibilität für eine Umsetzung von z.B. dezentralen Prognoseprozessen ab.

II.2.5 Integration Verwaltungsschale und Agentensysteme

Bei Agentensystemen sind solche Strukturen dagegen Stand der Technik. Folglich ist es vielversprechend, die VWS und BDI-Agenten architektonisch so zu verbinden, dass der standardisierte Ansatz der VWS mit den für mehr Autonomie und Flexibilität geeigneten Strukturen der BDI-Agenten kombiniert werden kann. Bislang gibt es wenig Literatur, die sich mit der Integration von Agenten und VWS auseinandersetzt und Konzepte hierfür anbieten. Fay et al. haben in einem VDI-Statusreport aufgezeigt, dass Agenten zur Realisierung von VWS geeignet sind [FAY19]. Die Begründung der Autoren ist, dass die Anforderungen der I4.0-Sprache [PLA18] durch die Eigenschaften der Agenten umgesetzt werden. Verbeet und Baumgärtel verfolgen einen ähnlichen Ansatz und weisen die Eignung von BDI-Agenten zur Realisierung von VWS nach, indem sie Anforderungen an I4.0-Systeme von Trunzer et al. mit den Eigenschaften von Agentensystemen bzw. BDI-Agenten abgleichen [VER20]. Die vorgeschlagene Gesamtsystemarchitektur setzt auf ein Framework aus Arrowhead als I4.0-Middleware in Kombination mit BDI-Agenten der Agentenplattform JADEX und der VWS. Jedoch bilden beide Ansätze nicht die Struktur der Teilmodelle der VWS auf die inneren Strukturen der (BDI-)Agenten ab.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt gliedert sich in sieben AP nach Abbildung 2. Diese bzw. etwaige UAP wurden jeweils durch einen Partner verantwortlich geleitet. Die Bearbeitung erfolgte jeweils in Kooperation mit mehreren Partnern. Die Planung und Durchführung folgten dem V-Modell mit den Phasen Anforderungsanalyse, Architekturdefinition, Softwareentwurf und Umsetzung sowie dem Test der einzelnen Bausteine, der Systemintegration und dem Test und der Evaluierung gesamten Systems. Das Projektmanagement begleitete alle Phasen.

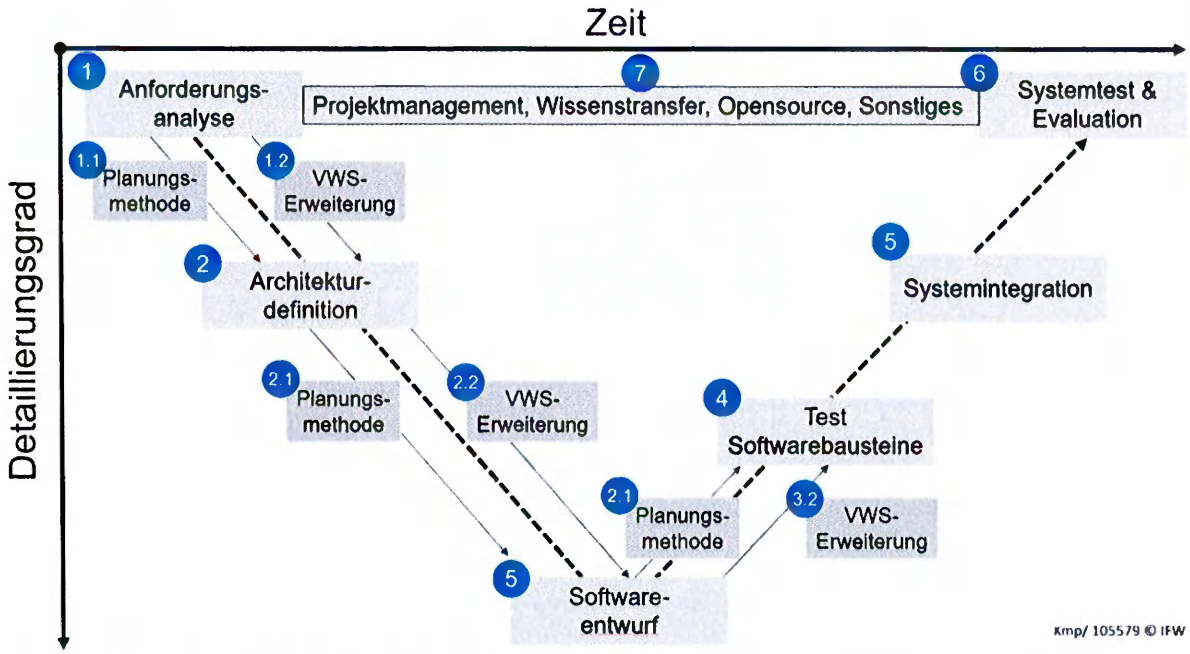

Abbildung 2: Vorgehensweise und Arbeitspakete im V-Modell

Dieser Ablauf wurde zwei Mal durchlaufen, da zwei Instandhaltungskonzeptvarianten umgesetzt worden sind, die geplante Instandhaltung basieren auf den von den Herstellern der Komponenten angegebenen, betriebsstundenbasierten Wartungsintervallen und einer prognostischen Instandhaltung basierend auf Zeitreihendaten und Verfügbarkeiten von Ersatzteilen und qualifizierten Personal. Die Einzelheiten werden in II.4 beschrieben.

II.4 Erzielte Ergebnisse

II.4.1 Instandhaltungskonzepte

II.4.1.1 Geplante Instandhaltung – Instandhaltungsvariante 1

Bei der geplanten zeitabhängigen Instandhaltung werden Instandhaltungsaktivitäten unabhängig vom tatsächlich erfassten Zustand der Komponente in periodischen Zeitabständen durchgeführt. 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].

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 ausfallbasiert 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.

Abbildung 3 zeigt den Informationsfluss und die Funktionen der Instandhaltungsvariante 1. Diese umfasst die instandhaltungstechnischen Aufgaben zur Einordnung der Wartungsarbeiten in die Produktionsabläufe (Terminplanung) auf Basis der Überwachung tatsächlich vorliegender Betriebsstunden.

Abbildung 3 a) zeigt das zyklische Pollen der Maschinendaten, insbesondere zur Ermittlung der Betriebsstunden in Instandhaltungsvariante 1. Abbildung 3 b) zeigt 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.

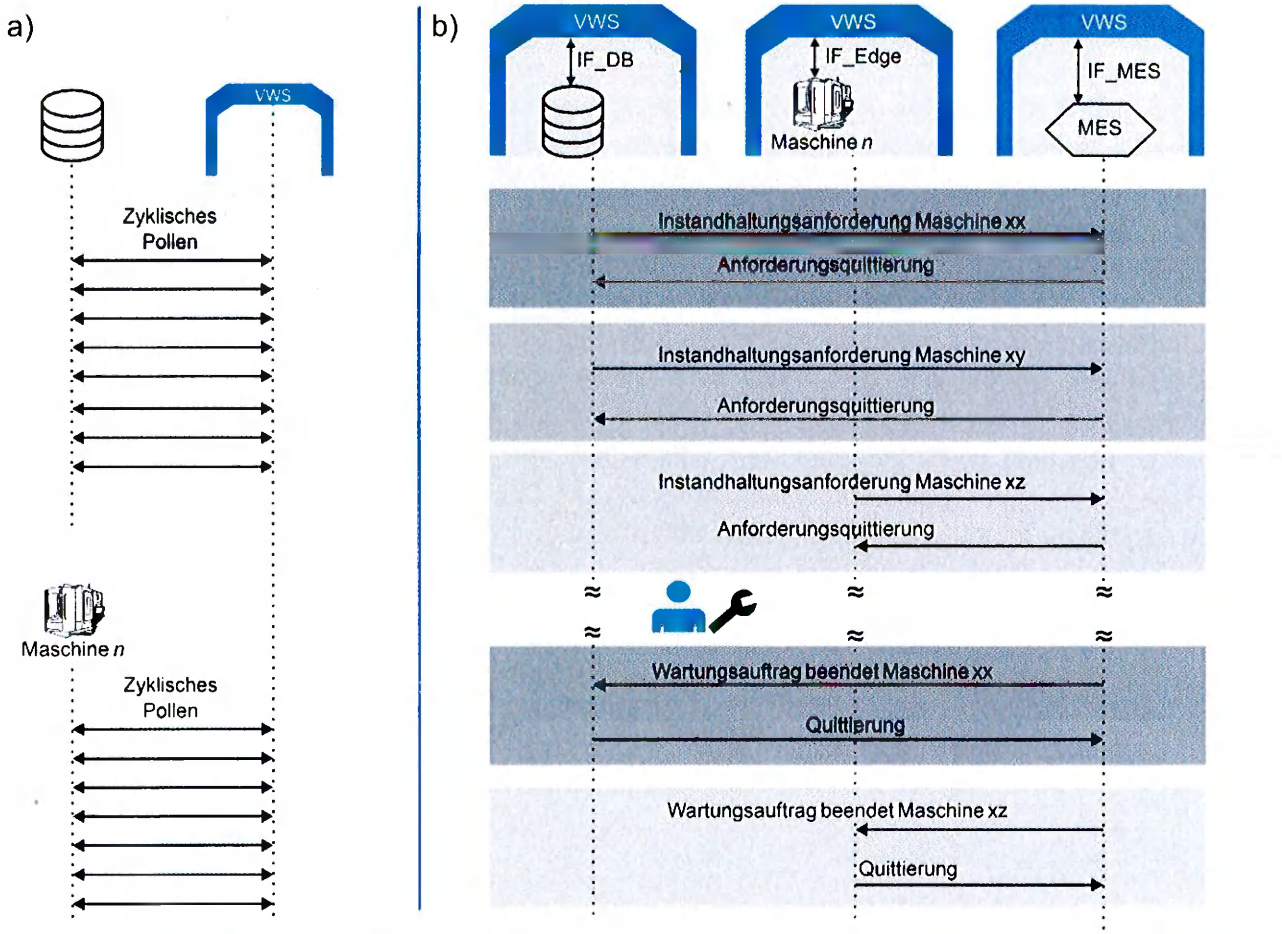

Abbildung 3: Betriebsstundenüberwachung für Wartung bei Maschinensteuerung mit Datenbankanschluss

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), da nach erfolgreich durchgeführter Wartung der Stundenzähler für die jeweiligen Wartungsintervalle zurückgesetzt werden muss. 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 Datensenke (MES) charakterisiert, die bei einem Ereignis (Überschreibung der Betriebsstunden für ein Wartungsintervall) aktiviert wird. Eine zentrale Einrichtung, die den Gesamtprozess organisiert, entfällt. Zusammenfassen liegen "peer-to-peer", zustandsbasierte und ereignisgesteuerte Interaktionsmuster vor. 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.

Abbildung 4 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 benötigen 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. Um die Instanziierung des Prozesses und der Kommunikation zu bestätigen, sendet die MES-VWS eine "notify_accepted" Nachricht. 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 eine Resend-Policy der „notify-init" Nachricht initialisiert. Die Maschinen-VWS sendet die Nachricht so oft, bis eine „notify-accepted" Nachricht empfangen wurde. Ebenfalls startet die MES-VWS eine Resend-Policy für die „notfiy-accepted" Nachricht, die wiederum durch Empfangen der „respond" Nachricht beendet wird.

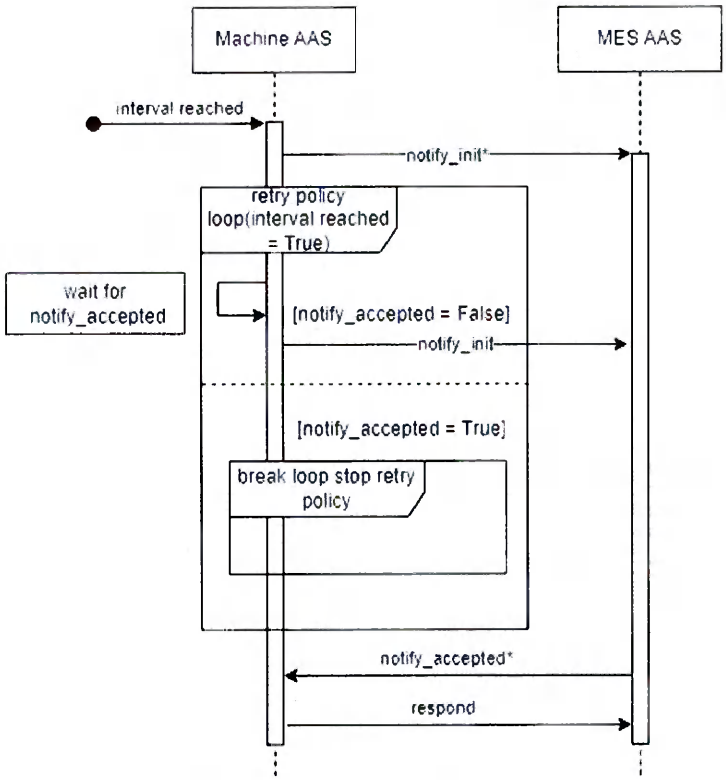

Abbildung 4: Nachricht von Maschinen-VWS and MES-VWS nach Interaktionsmuster von IEC 62264-5

Wie zuvor bereits beschreiben, kann die Ausführung der physischen Wartungsarbeiten Stunden oder Tage dauern. Ist der Auftrag erfüllt, sendet das MES eine Nachricht an die MES-VWS. Die Verwaltungsschale erstellt aus den empfangenen Informationen intern eine "change"-Nachricht und sendet diese an die Maschinen-VWS (Abbildung 5). Die Maschinen-VWS hat diese Nachricht ebenfalls zu quittieren ("respond"), um sicher zu gehen, dass die VWS aktiv ist und die „change" Nachricht empfangen wurde. 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).

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.

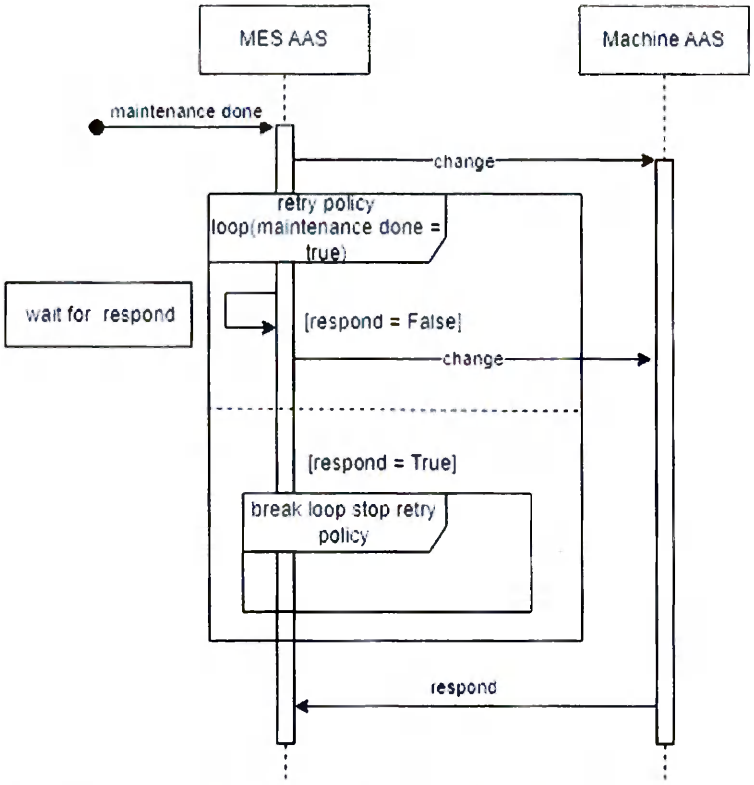

Abbildung 5: Nachricht von MES VWS an Maschinen VWS nach Interaktionsmuster von IEC 62264-5

II.4.1.2 Vorausschauende Instandhaltung – Instandhaltungsvariante 2

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 [PEN10]. Die zustandsorientierte Wartung ist gegenüber der zeitorientierten Wartung bei Komponenten mit einer stark streuenden Lebensdauerverteilung im Vorteil.

Die Wartungs- und Instandhaltungsplanung ist für produzierende Unternehmen ein fester Bestandteil des operativen Geschäfts. Die spanende Fertigung ist häufig durch einen heterogenen Park von Werkzeugmaschinen geprägt, die dem Auftragseingang entsprechend unterschiedlich ausgelastet sind. Hierdurch ergeben sich auch unterschiedliche Laufzeiten der Maschinen. Dies führt zu zeitlich versetztem Auftreten von Wartungen der Maschinen. Zusätzlich wird eine Vielzahl von Komponenten in den Wartungsvorgeben der Hersteller nicht erwähnt. Es bedarf daher einer kontinuierlichen Überprüfung der Laufzeiten der Maschinen und der Einplanung von Wartungen in den operativen Ablauf der Produktion, sobald ein Wartungsbedarf auftritt.

Das Einplanen von Wartungsaufträgen findet in Teilen manuell statt. Hierbei erfolgt zunächst die Feststellung der Wartungsaufwände. Diese beinhalten eine Approximation der Stillstandsdauer der Maschine für die Wartung, sowie die für die Maßnahme benötigte

Ersatzteile (z.B. Filter). Sobald der Wartungsaufwand bekannt ist, nimmt die Produktionsplanung eine Einplanung des auszuführenden Wartungsplan als Wartungsauftrag vor. Dafür werden sowohl das Produktionsprogramm (u.a. Liefertermine der Aufträge) als auch das notwendige Personal herangezogen. Entsprechend der Kompetenzen des Personals und deren Anwesenheit (Schichtplan) im Unternehmen, müssen dann geeignete Zeitfenster für die Wartung einer entsprechenden Maschine gefunden werden. Sobald an mehreren Maschinen gleichzeitig eine Maßnahme geplant werden muss, wird die Planung aufwändig und es kann nicht gewährleistet werden, dass geeignete Zeitfenster gefunden werden. Dieser manuell geprägte Ablauf soll im Zuge des Projektes in ein digitales, assistierendes System überführt werden, bei dem die Einplanung der jeweiligen Wartungsaufträge automatisch stattfindet.

Auf Basis dieser Zustandsüberwachung und Restnutzungsdauerprognose (RUL-Prognose) können Instandhaltungsmaßnahmen vorausschauend geplant werden. 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.

Die Funktionen des Moduls zur Bewertung der zustandsbasierten Ausfallwahrscheinlichkeit basieren auf der Arbeit von Denkena et al. [DEN21]. In Abbildung 6 sind die Ein- und Ausgangsgrößen des Moduls dargestellt.

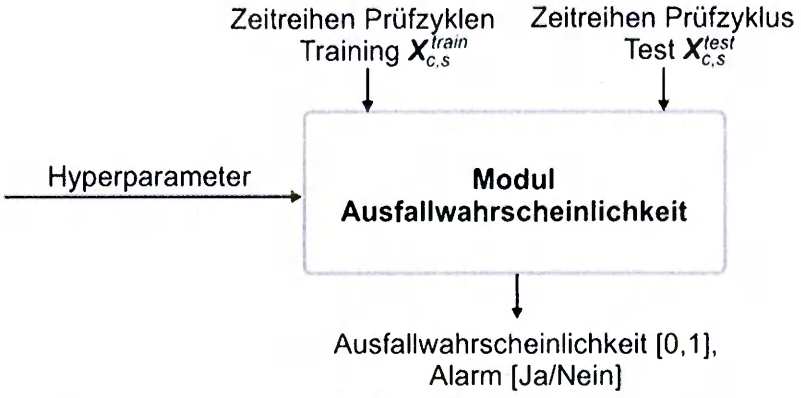

Abbildung 6: Ein- und Ausgangsgrößen des Moduls Ausfallwahrscheinlichkeit

Das Modul gibt als Ausgabegröße eine einheitliche Zustandskenngröße (unified outlier-score) aus, die das Intervall [0,1] einhält. Liegt die ausgegebene Zustandskenngröße über einem vordefinierten Schwellwert, so wird ein Alarm ausgegeben. Die erste Eingangsgröße des Moduls stellen die segmentierten Zeitreihen der Prüfzyklen $X_{c,s}^{train}$ für Komponente c und Sensor s dar, die den Normalzustand der Maschinenkomponente beschreiben. Bei $X_{c,s}^{test}$ handelt es sich um die zu testenden Zeitreihen des aktuell durchgeführten Prüfzyklus.

Da für die zu überwachenden Komponenten in der Projektlaufzeit keine run-to-failure Daten festgestellt werden konnten, wurde der Ansatz zur Anomalieerkennung anhand von Daten eines Kugelgewindetriebs aus [DEN21] evaluiert. Hierbei wird u.a. das Drehmoment überwacht. Das hier beschriebene Vorgehen lässt sich bei Vorliegen von run-to-failure Daten

auf Trace-Daten (beispielsweise aus dem Warmfahrzyklus von Werkzeugmaschinen) übertragen, um Komponenten von Werkzeugmaschinen zu überwachen.

Die Zustandskenngröße der überwachten Komponente sollte verschiedene Eigenschaften besitzen. Im Normalzustand sollte die Zustandskenngröße möglichst konstante Werte annehmen. Gleichzeitig sollte die Zustandskenngröße mit eintretenden Anomalien variieren. In der aktuellen Version des Moduls wird als Basismodell das k-Nächste-Nachbarn-Verfahren [RAM00] verwendet. Zur Ausgabe der Zustandskenngröße wird die pyOD-Bibliothek [ZHA19] herangezogen. In Abbildung 7 ist der Verlauf der durch das K-Nächste-Nachbarn-Verfahren als Basis ausgegebene Zustandskenngröße für einen Kugelgewindetrieb dargestellt.

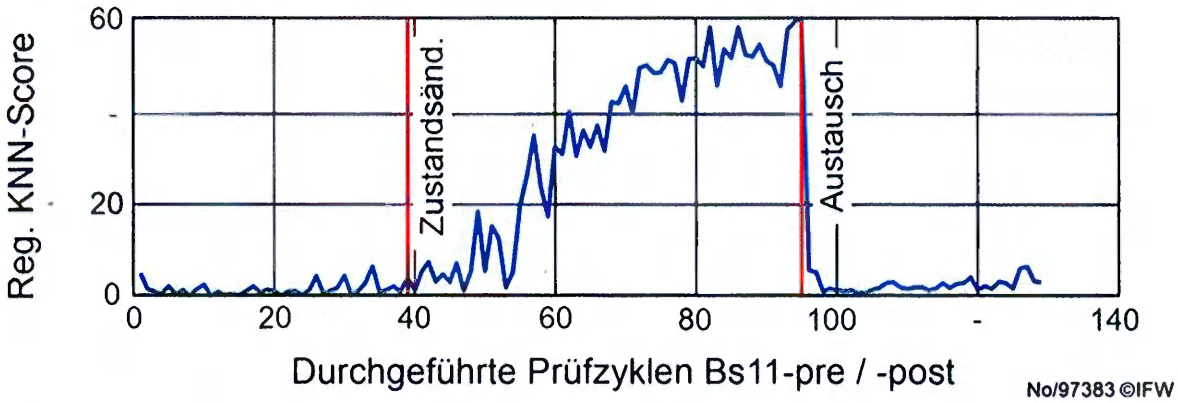

Abbildung 7: Beispielverlauf des unskalierten KNN-Outlier-Scores zur Überwachung eines Kugelgewindetriebs

Um anhand einer Zustandskenngröße eine Zustandsbewertung vornehmen zu können, ist das Festlegen eines Grenzwertes erforderlich. Einige Methoden zur unüberwachten Anomalieerkennung geben keine skalierte Zustandskenngröße bzw. keine Fehlerwahrscheinlichkeit mit einem feststehenden Wertebereich aus. Kriegel et al. [KRI11] schlagen ein Vorgehen zur Berechnung einheitlicher Zustandskenngrößen (engl. „Unified Outlier Scores") für die unüberwachte Anomalieerkennung vor. Die einheitlichen Zustandskenngrößen geben dabei die Wahrscheinlichkeit wieder, dass eine Dateninstanz einen Fehler darstellt. Der Ansatz von Kriegel et al. wurde dahingehend erweitert, dass einheitliche Zustandskenngrößen zur semi-überwachten Anomalieerkennung ausgegeben werden. Das Verwenden der einheitlichen Zustandskenngrößen hat verschiedene Vorteile. Die einheitlichen Zustandskenngrößen besitzen einen feststehenden Wertebereich zwischen 0 und 1 und vereinfachen damit die Grenzwertberechnung.

Auf Grundlage von Vergangenheitsdaten wird anschließend die erwartete Wartungsdauer abgeschätzt. Anschließend erfolgt das Einplanen der notwendigen Wartungsaufträge in das bestehende Produktionsprogramm. Hierbei werden Randbedingungen berücksichtigt, die sich aus Personalkompetenz und -verfügbarkeit, Mehrmaschinenbedienung des Personals sowie Ressourcenverfügbarkeit für die Wartungstätigkeiten ergeben.

Die Optimierung der Instandhaltungszeitpunkte erfolgt kollaborativ durch ein Konsortium von Maschinenagenten, die die zu wartenden Maschinen abbilden. Die Auswertungen der Instandhaltungszeitpunkte werden jeweils durch ein MES durchgeführt. Im Folgenden wird ein hybrides Lösungskonzept zur Instandhaltungsplanung beschrieben, dass in Abbildung 8 visualisiert ist. Lediglich Maschinen und der Management-Agent führen eigenständig und proaktiv Aktionen durch. Aus diesem Grund werden sie als Agenten umgesetzt. Dienste haben keine Verwaltungsschale, da Sie nur von Agenten aufgerufen werden und keine Informationen speichern müssen.

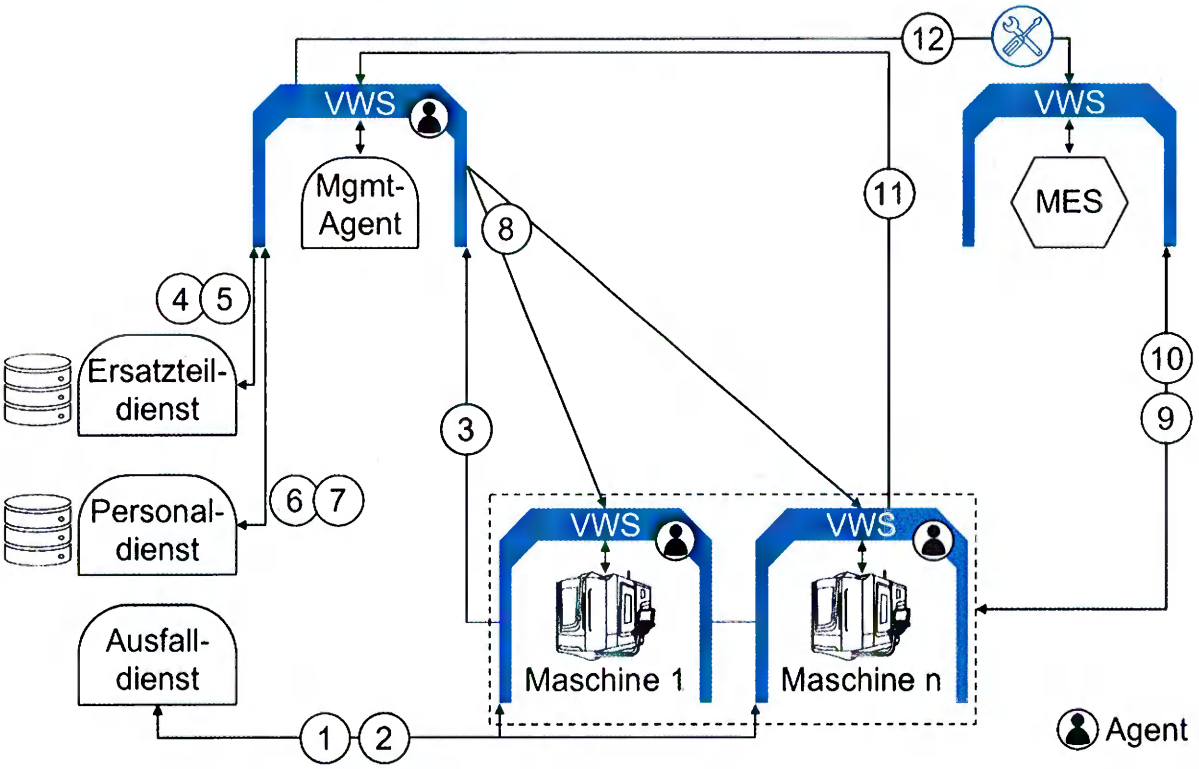

Abbildung 8: Konzept der agentenbasierten Instandhaltung

Das Konzept sieht vor, dass der algorithmische Anteil der vorausschauenden Planung des Zeitpunkts eines Wartungseinsatzes von einem Agentensystem in Zusammenarbeit mit dem MES durchgeführt wird. Das Agentensystem führt zunächst die Verarbeitung ((2) in Abbildung 8) der Zeitreihen ((1) in Abbildung 8) von zustandsrelevanten Prozessgrößen von Maschinendaten durch. Im Fall eines erwarteten Komponentenausfalls wird der berechnete Zeitpunkt an den Managementagenten kommuniziert ((3) in Abbildung 8). Anschließend wird im Agentensystem auf der Basis verfügbarer Ersatzteile ((4,5) in Abbildung 8) (lokal vorhanden, zu bestellen, Lieferfristen) und des verfügbaren Personals unter der für die Maßnahmen notwendigen Kompetenzen ((6,7) Abbildung 8) ein möglicher Zeitraum für die Wartung ermittelt. Dieser wird den Maschinenagenten mit den zugehörigen Personalverfügbarkeiten zugesendet ((8) Abbildung 8). An dieser Stelle beginnt die kollaborative Lösungsfindung der Maschinenagenten. Diese stellen im Verlauf der Planung wiederholt Anfragen an das MES, die Wartungszeitpunkt beinhalten ((9) in Abbildung 8). Die berechneten Auswirkungen auf das Produktionsprogramm werden an die anfragenden Maschinenagenten zurückgegeben ((10) in Abbildung 8). Das MES fungiert also als Zielfunktion bzw. Simulationsumgebung der kollaborativen Planung. Die Maschinenagenten passen ihre Lösungsvorschläge auf Grundlage der zurückgemeldeten Auswirkungen kollaborativ und iterativ an. Nach Abschluss der Planung liegen für die durchzuführenden Wartungen Pläne vor, die das Wartungspersonal sowie Wartungszeitpunkte beinhalten. Das iterative Vorgehen ist an dieser Stelle abgeschlossen. Das finale Planungsergebnis wird vom Konsortium der Maschinenagenten an den Managementagenten kommuniziert ((11) in Abbildung 8). Dieser speichert das Planungsergebnis ab und gibt es zusätzlich an das MES weiter, damit die Wartungen final in das Produktionsprogramm eingeplant und in der zukünftigen Planung berücksichtigt werden können ((12) in Abbildung 8).

Dieses Vorgehen wird hier als „hybrid" bezeichnet, da das MES weiterhin einen aktiven Anteil an der Instandhaltungsplanung hat. Die Ermittlung der möglichen Instandhaltungstermine

erfolgt auf der Basis der Agententechnologie. Die jeweilige Abschätzung der Auswirkungen auf das Produktionsprogramm erfolgt jedoch durch das MES.

II.4.2 Algorithmen der Agenten

Für die kollaborative Planung wird ein bestehender Algorithmus zur Ressourcenallokation in verteilten Systemen verwendet. Hierbei handelt es sich um eine angepasste Version des „Asynchronous Forward Bounding for Distributed COPs" [GER09]. Die Maschinenagenten, die ihre Wartung auf das verfügbare Personal einplanen müssen (Ressourcenallokation), stellen ein verteiltes System dar. Der Algorithmus ist ein verteilter Optimierungsalgorithmus, der zu jeder Zeit eine konsistente Teilzuweisung beibehält. Die Agenten weisen ihre Instandhaltungsaktivität schrittweise dem Verfügbarkeitsplan des Personals zu. Während der Planung werden solche Abzweigungen vermieden, bei denen keine Verbesserung gegenüber der bisher besten Lösung möglich ist. Der in der Literatur beschriebene Algorithmus wird für den Anwendungsfall angepasst, damit die Möglichkeit zur optimalen Lösungsfindung weiter gewährleistet ist: Ursprünglich hat jeder Agent einen eigenen Lösungsraum (Informationen über Personalverfügbarkeit), der für die Ressourcenallokation verwendet wird. Im Anwendungsfall der Instandhaltungsplanung hätte also jeder Maschinenagent die Verfügbarkeit des Personals, das für die notwendige Maschinenwartung qualifiziert ist. Bei der Instandhaltungsplanung kann eine Person jedoch für verschiedene Wartungen infrage kommen kann. Entsprechend kann die Situation eintreten, dass verschiedene Maschinen parallel versuchen, diese Person für ihre Wartung einzuplanen. Aus diesem Grund wurde der Algorithmus so angepasst, dass alle Agenten auf einen gemeinsamen Lösungsraum zugreifen.

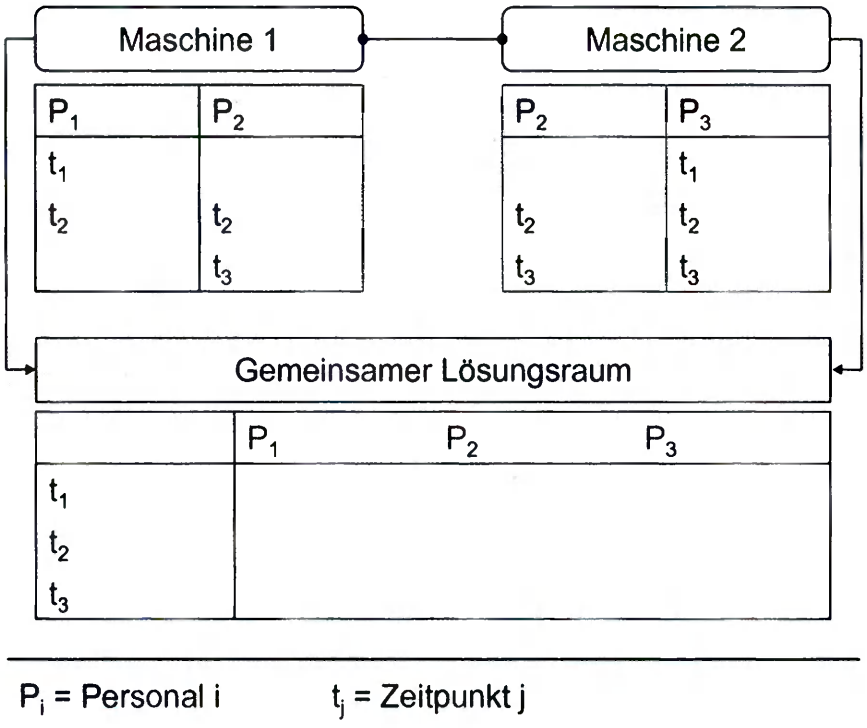

Abbildung 9: Lösungsraum der Agenten

Der gemeinsame Lösungsraum sowie die Lösungsmöglichkeiten der Agenten ist beispielhaft für zwei Agenten (Maschine1, Maschine 2) in Abbildung 9 dargestellt. Jede der Maschinen kann für ihre notwendige Wartung unterschiedliches Personal auswählen, das zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfügbar ist. Hierbei können auch Überschneidungen

auftreten. Die Maschinenagenten allokieren im Verlauf der Planung jeweils das Wartungspersonal zu verschiedenen Zeitpunkten. Jede Kombination aus Wartungspersonal und einem möglichen Wartungszeitpunkt (beispielsweise Personal P_1 zum Zeitpunkt t_1). Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus kann [GER09] entnommen werden. Eine beispielhafte Planung hat folgenden Ablauf:

1. Zu Beginn der Planung wird eine zufällige Reihenfolge der Agenten festgelegt.
2. Der erste Agent (hier: Agent 1) fügt dem gemeinsamen Lösungsraum eine Teillösung (eine seiner Lösungsmöglichkeiten) hinzu, hinterlegt diese als erprobte Teillösung und meldet dem folgenden Agenten (hier: Agent 2), dass dieser eine Teillösung hinzufügen soll.
3. Agent 2 fügt eine Teillösung hinzu. Hierbei ist wichtig, dass nur mögliche Teillösungen erprobt werden. Hat Agent 1 bereits P_2 zum Zeitpunkt t_2 eingetragen, wird diese Teillösung von Agent 2 übersprungen. Die Lösung ist in der Folge vollständig, da alle notwendigen Wartungen eingeplant sind. Anschließend wird die entstehende durchschnittliche Lieferterminverzögerung bestimmt. Dies erfolgt, in dem die Lösung an das MES gegeben wird, das die Auswertung vornimmt und eine Lieferterminverzögerung zurückgibt. Wenn dies die beste bisher bekannte Lösungsmöglichkeit ist, wird die entstandene Lieferterminverzögerung an alle Agenten kommuniziert.
4. Agent 2 erprobt iterativ alle weiteren seiner Teillösungen. Die jeweils berechnete Lieferterminverzögerung wird den anderen Agenten nur mitgeteilt, wenn diese niedriger als die bisher beste Lösung ist.
5. Hat Agent 2 keine Lösungsmöglichkeiten mehr übrig, meldet er dies an Agent 1. Dieser entfernt die bisherigen eingetragen Lösungsmöglichkeiten aus dem gemeinsamen Lösungsraum und trägt iterativ neue Teillösungen ein, die er bisher noch nicht erprobt hat. Er lässt die entstehende Lieferterminverzögerung jeweils auswerten. Sobald die Verzögerung geringer ist als die bisher beste bekannte Lösung, meldet er dies an Agent 2 (da jetzt eine Verbesserung der Lösung möglich ist).
6. Das Vorgehen ab Schritt 3 wird iterativ durchgeführt, bis keiner der Agenten neue Lösungsmöglichkeiten erproben kann.

Der Rechenaufwand wird begrenzt, indem in Schritt 4 nur eine weitere Verfolgung einer Lösungsmöglichkeit stattfindet, wenn die Möglichkeit zur Verbesserung der bisher besten Lösung möglich ist (wenn also die Lieferterminverzögerung der Teillösung nicht den Wert der bisher besten Lösung übersteigt).

II.4.3 Nutzung der Verwaltungsschalen für Maschinen, MES und Agenten

Die Verwaltungsschale kann während des gesamten Lebenszyklus von Geräten und Anlagen eingesetzt werden. Die Instandhaltung ist eines der Anwendungen im Lebenszyklus, die durch Digitalisierung mehrwertbringend weiterentwickelt werden kann. Die Instandhaltung wird bereits vereinzelt mit der Verwaltungsschale in Verbindung gebracht:

- In https://aachen.digital/blog/die-verwaltungsschale/ [1] wird nur allgemein davon gesprochen, dass die Verwaltungsschale zur Instandhaltung eingesetzt wird.
- RAHAL [RAH23] zeigt eine umfangreiche Literaturanalyse zum Thema vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) in Verbindung mit der

[1] Zuletzt aufgerufen am 01.07.2024

Umsetzung mittels Verwaltungsschalen. Darin wird festgestellt, dass die Nutzung der Verwaltungsschale auch im Forschungsumfeld noch nicht intensiv betrachtet wird.

- In der IDTA befindet sich ein Teilmodell-Template „Maintenance" in Entwicklung. Es zielt darauf, instandhaltungstechnische Informationen über die Verwaltungsschalenschnittstelle standardisiert zur Verfügung zu stellen. Die einzelnen Inhalte werden in Gruppen untergliedert (SubmodelCollections) die unter anderem die organisatorischen Informationen (Asset Identifkationen, Instandhaltungspersonal) Dokumentationen (Ersatzteile, Arbeitsschritte, Werkzeuge) und die Intervallspezifikation beinhalten. In der Laufzeit des Projektes befanden sich die Arbeiten noch im vollen Gange. So wurde zunächst eine eigne Definition der Teilmodelle vorgenommen. Es ist jedoch festzustellen, dass Überlappungen vorhanden sind, die nach Release des Maintenance Teilmodell-Templates einfach aufgelöst werden können.

Diese bisher bekannten Veröffentlichungen betrachten die Verwaltungsschale nur als standardisierten Datenlieferanten. Verarbeitende Leistungen und die aktive Interaktion mit anderen Anwendungen wurden in der Literatur bisher noch nicht betrachtet.

Deshalb wurden im Projekt sowohl die Typ 3 Mechanismen als auch Teilmodelle für die Maschinen und das MES speziell für die geplante Instandhaltung entwickelt. In dem Maschinen-Teilmodell sind unter anderem die Grenzwerte für die Betriebsstundenintervalle, die Auftragsbeschreibung für den Instandhaltungstyp sowie der Abarbeitungsstatus beschrieben. Zusätzlich werden die tatsächlichen Zeiten der Auftragsabgabe und der Auftragserfüllung für jeden einzelnen Instandhaltungsvorgang in der Verwaltungsschale eingelagert. Diese Eintragungen werden für jedes einzelne geplante Instandhaltungsintervall verwaltet und historisch in der Maschinen-Verwaltungsschale gespeichert. Das Teilmodell des MES enthält die Daten die für den Versand in den I4.0-Nachrichten zwischen Maschine und MES benötigt werden.

Da für diese Instandhaltungsanwendung eine aktive Peer-to-Peer-Kommunikation notwendig ist, wurden die C# und Java SDK um die I4.0-Nachrichtenformate nach VDI/VDE 2193 und die Interaktionsmuster nach IEC 62264-5 erweitert. Da die C#-Variante im Gegensatz zum JAVA-SDK keine persistente Datenhaltung ermöglichte, wurde diese hinzugefügt. Solch eine Kommunikation hat den Vorteil einer sehr guten Skalierbarkeit [KER15]. Diese Erweiterung wurde im Anschluss an das Projekt als Pull-Request im entsprechenden Repository zur Verfügung gestellt. Eine detaillierte Beschreibung der I4.0-sprachbasierte Verwaltungsschaleninteraktion ist in [KER15] zu finden.

Die in II.4.1.1 beschriebene Maschinenverwaltungsschale wurde für die vorausschauende Instandhaltung um Agenten erweitert. Die Integration der Agenten in das bestehende System findet nur für die Java-Implementierung statt. Dies hat vor allem den Grund, dass das genutzte Agenten-Framework JADE (Java Agent Development Framework) ein Java-Framework ist. Eine Integration in die C#-Implementierung ist möglich, würde aber einen erheblichen Mehraufwand darstellen, der im Rahmen des Projekts als nicht gerechtfertigt galt. Wie zuvor diskutiert, wurde die Architektur zusätzlich um eine Managementverwaltungsschale erweitert, welche als Umgebung für den Managementagenten dient. Die Verwendung einer Verwaltungsschale hat den Vorteil, dass sowohl das standardisierte Informationsmodell, die I4.0-Sprache als auch weitere Komponenten des SDKs, wie z.B. die Möglichkeit der persistenten Speicherung der Teilmodelldaten, genutzt werden können. Zur Speicherung wird eine MongoDB verwendet. Zu den beschriebenen Verwaltungsschalen und Agenten werden

noch zusätzliche Dienste benötigt, die alle für die Verhandlung relevanten Informationen bereitstellen. Diese Dienste können per I4.0-Nachricht über MQTT angefragt werden.

Zu Beginn der Verhandlung wird durch die Managementverwaltungsschale ein Agenten-Container initialisiert. Dabei werden die Verbindungsdaten in Form einer I4.0-Nachricht auf ein vordefiniertes MQTT-Topic, auf welches die Maschinenverwaltungsschalen durch Verwendung eines internen MQTT-Clients subscribed sind, gesendet. Nach Empfang der Verbindungsdaten, welche aus Hostnamen und Port bestehen, startet die jeweilige Maschinenverwaltungsschale den Maschinenagenten, welcher sich mit dem Agenten-Container verbindet. Somit gilt die verteilte Agenteninfrastruktur als initialisiert. Die weitere interne Kommunikation der Agenten erfolgt nicht mehr in der I4.0-Sprache, sondern in der ACL-Nachrichtenstruktur. Dieses Format ist die Standard-Nachrichtenstruktur von JADE und ähnelt der I4.0-Sprache zu großen Teilen. Die Kommunikation des verteilten Agentensystems erfolgt in JADE standardmäßig über HTTPS. Das Agenten-Framework ermöglicht die Anpassung des Nachrichtenformats und des Nachrichtenprotokolls. Darauf wurde aber im Rahmen des Projektes aus zeitlichen Gründen verzichtet.

Bevor der Algorithmus, welcher im vorherigen Absatz beschrieben wurde, ausgeführt werden kann, müssen alle für die Verhandlung relevanten Informationen durch Kommunikation mit den Diensten gesammelt werden. Hierzu kontaktieren die Maschinenagenten zuerst den Ausfallwahrscheinlichkeitsdienst, welcher Informationen um den möglichen Ausfall wie Dauer oder Wahrscheinlichkeit ermittelt. Anschließend kontaktiert der Managementagent den Personaldienst und den Ressourcendienst, um die Informationen bzgl. des Personals und der Wiederbeschaffungsdauer notwendiger Ressourcen zu bestimmen. Nachdem alle relevanten Informationen gesammelt wurden, startet der in Kapitel 4.2. beschriebene Algorithmus.

Nachdem die Verhandlung abgeschlossen ist, sendet der Maschinenagent, welcher die beste Lösung ermittelt hat, diese an den Managementagenten. Die Lösung wird in der Managementverwaltungsschale persistiert.

II.4.4 Deployment und Erprobung bei Lauscher Präzisionstechnik GmbH

Für das Deployment und die Erprobung bei der Lauscher Präzisionstechnik GmbH wurde ein separates Testsystem aufgebaut, das synchron zum operativen Netzwerk des Unternehmens arbeitet. Gemeinsam mit dem Partner SEITEC wurde die Integration der Werkzeugmaschinen in die Testumgebung bei Lauscher vorgenommen. Zudem wurde das Testsystem durch Kommunikationsstrukturen und Docker Umgebungen erweitert, damit die AAS vom LIA und Seitec sowie die Kommunikation (durch MQTT und HTTP) aller Partner funktioniert. Die Datenerfassung bei Lauscher wurde auf 10 Maschinen ausgeweitet. Dafür wird ein Bussystem genutzt, das die jeweiligen Maschinenstatus in eine Datenbank schreibt. Die Verbindung von SEITEC erfolgt per TCP über das Netzwerk, hier wurden 3 Werkzeugmaschinen angebunden. Weiterhin enthielt das Testsystem ein von SEITEC bereitgestelltes Edge-Device sowie einen LTE-Router für den Support / Fernzugriff. Allen Partnern wurden entsprechend Zugänge zum Testsystem gewährt. Zur Kommunikation zwischen der Datenbank und der LIA AAS wurde ein Software Backend von Lauscher erarbeitet, das die Herstellung einer Konnektivität zur AAS über MQTT ermöglicht. Die Arbeitsstundenzähler für den Fall 1 erfolgen in der AAS. Hierdurch wurde die Verwaltung der Zähler in den jeweiligen AAS mittels Oberflächen (GUI) geplant.

Zur Einführung des Systems in den Arbeitsablauf des Personals wurde gemeinsam mit dem Partner Fauser die Integration der Lösung in den organisatorischen Ablauf bei Lauscher geplant und die Implementierung der Lösung in die Fauser Umgebung bei Lauscher erarbeitet.

Da die Mitarbeitenden bei Lauscher die Fauser Umgebung (ERP und MES) kennen und in ihrem Umgang geschult sind, wurde von einer separaten Benutzeroberfläche abgesehen. Stattdessen ergab die Zusammenarbeit, dass eine Integration der Funktionen in die Fauser-Umgebung bei Lauscher zu bevorteilen ist. Hierdurch werden die Wartungsaufträge im gleichen Format wie Arbeitspläne an die Mitarbeitenden gegeben. Dies verhindert Medienbrüche beim Einsatz der Lösung in der Fertigung. Der Fokus lag auf der IHPP-Methode und deren Ablaufschritte in der Fauser-Oberfläche. Die Wartungspläne werden als Muster analog zu Musterarbeitsplänen angelegt. Dadurch werden die entsprechenden Wartungspläne in der Datenbank abgelegt. Durch eine eindeutige Identifizierung durch die Kombinationen von Maschinenname und Threshold können bei einer Wartungsauslösung die Musterwartungspläne der entsprechenden Maschinen aktiviert werden und es entsteht ein aktiver Wartungsplan, der im MES sichtbar wird. Für diese Umsetzung wurde bei Lauscher das Testsystem genutzt.

Die Instandhaltungsvariante 2 setzt auf der vorher implementierten Umgebung der Variante 1 auf. Der Dienste für Ersatzteile und Personal besitzen Schnittstellen in die operative Ebene von Lauscher und greifen unter Einhaltung der DSGVO auf die Schichtpläne, die Kompetenzmatrix und die Lagerverwaltung im ERP zu. Durch eine Anonymisierung wird dabei die Weitergabe von sensiblen Daten vermieden. Beide Dienste sind auf Rechnern im Testsystem installiert. Der Management Agent wird mit der Agentenumgebung zusammen auf dem Edge-Device ausgeführt. Die Kommunikation zwischen den Agenten und den Diensten findet über HTTPS statt. Die Initialisierung der Agentenverbindung erfolgt über MQTT. Das Testsystem wurde mit dem Realsystem im Produktivbetrieb synchronisiert, um die Instandhaltung anhand von Realdaten zu testen.

II.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Mit dem vorgestellten System wird das Erkennen notwendiger Wartungen sowie das Auslösen und Dokumentieren von Wartungen zusammengeführt. Diese Prozesse werden digitalisiert und folglich vereinfacht. Das System trägt dazu bei, dass die Wartungs- und Instandhaltungsplanung optimiert und nicht wertschöpfende Aufwände eingespart werden. Allerdings erfordert so ein System auch eine Reorganisierung der Verantwortung für Wartung. Dies ist daran begründet, dass Entscheidungskompetenzen nicht mehr ausschließlich beim Personal liegen. Stattdessen können auch Maschinen die Instandhaltungsplanung anstoßen, wenn bei ihnen Wartungsbedarf vorliegt. Die Verlagerung der bisher manuellen Aufwände in ein digitales System stellt zudem neue Anforderungen an die digitale Infrastruktur.

Implementierung

Für die dezentrale Instandhaltungsplanung kommunizieren verschiedene Systeme miteinander. Dies führt zu der grundlegenden Anforderung, dass über alle Systeme hinweg eine konsistente Namensgebung verwendet wird. Im Rahmen der Implementierung sind bei der Fa. Lauscher beispielsweise drei verschiedene Namen bzw. IDs für dieselbe Maschine in unterschiedlichen Systemen aufgetreten. Dies führt dazu, dass alle Module entsprechende Namensübersetzer benötigen. Eine weitere Anforderung ist die notwendige Datenqualität. Werden automatisiert Entscheidungen getroffen, muss sichergestellt werden, dass die Datengrundlage nicht fehlerbehaftet ist. Fehlerhafte Informationen über Wiederbeschaffungszeiten Wartungsdauern können zu ineffizienten Planungsergebnissen führen.

Die Bewertung des Instandhaltungsbedarfs hängt je nach Instandhaltungsvariante von den zur Verfügung stehenden Daten ab. Bei Instandhaltungsvariante 1 werden lediglich die Betriebsstunden mit vorgegebenen Wartungsintervallen abgeglichen. Erfolgt dies automatisch, ist das Risiko vollständiger Daten als gering einzuschätzen. Bei der vorausschauenden Instandhaltung (Instandhaltungsvariante 2) müssen „run-to-failure"-Daten vorliegen, damit der aktuelle Zustand einer Komponente sowie der erwartete Ausfallzeitpunkt bestimmt werden kann. Fehlerhafte Daten können hier den Planungsprozess negativ beeinflussen.

Weiter hat sich im Rahmen der durchgeführten Tests der Fa. Lauscher gezeigt, das virtuelle Umgebung (u.a. Docker) hohe Ansprüche an die Leistung des Host-Systems haben. Bei der Überführung des Systems in ein marktfähiges Produkt sollte dies entsprechend berücksichtigt werden. Für die Anbindung von Maschinen ist es zudem wichtig, dass die jeweiligen Portfreigaben gewährleistet werden. Dies ist bei zentraler Struktur aufwändig, jedoch essenziell für die Kommunikation von AAS und Maschinen. Für die Kommunikation zwischen Maschinen und Maschinen AAS ist MQTT gut geeignet.

Evaluierung

Zu Berichtszeitraumende kann für Instandhaltungsvariante 1 ("geplante Instandhaltung") bereits festgestellt werden, dass die Wartungsplanung optimiert werden konnte. Personelle Aufwände für die Planungsdurchführung konnten reduziert werden und ungeplante Ausfälle von Betriebsstunden konnten durch die optimierte Planung reduziert werden.

Für die Bewertung des im Rahmen des Projekts entwickelten Systems für Instandhaltungsvariante 2 ("vorausschauende Instandhaltung") wurde eine szenarienbasierte Evaluierung durchgeführt. In Abbildung 10 sind die Evaluierungsergebnisse des entwickelten Planungsansatzes dargestellt. Für eine bestehendes Produktionsprogramm wurde die agentenbasierte Instandhaltungsplanung bei variierender Wartungsanzahl, ansteigendem Planungshorizont sowie ansteigender Wartungsdauer durchgeführt. In den Teilabbildungen sind zum einen die durchschnittliche resultierende Delay per Order (DPO) nach der Planung aufgetragen. Hierbei handelt es sich um den durchschnittlichen Lieferterminverzug aller Produktionsaufträge im Produktionsprogramm in Tagen. Zusätzlich ist die für die Planung notwendige Iterationsanzahl dargestellt. Eine Iteration beschreibt hierbei die Bewertung einer Planungsalternative durch das MES. Eine Wartungsanzahl bzw. ein Planungshorizont von null beschreibt die Ausgangssituation des Produktionsprogramms.

Bei der Variation der Wartungsanzahl (Abbildung 10, oben links) fällt auf, dass der durchschnittliche Lieferterminverzug der dezentralen, agentenbasierten Planung (DPO Agenten) bei der Einplanung von zwei Wartungen zunächst absinkt. Dies lässt darauf schließen, dass die agentenbasierte Planung unter bestimmten Umständen bessere Ergebnisse liefert als der zentrale Planungsalgorithmus des MES. Hier kann davon ausgegangen werden, dass das Produktionsprogramm ohne eingeplante Warnung nicht optimal geplant wurde. Durch Einplanen der Wartungsaufträge werden auch die Fertigungsaufträge neu terminiert. Das geringe Wartungsaufkommen kann so zufällig zu einer besseren Ausgangssituation für die regelbasierte Terminierung der Fertigungsaufträge geführt haben. Anschließend steigt der Lieferterminverzug mit zunehmender Wartungsanzahl an. Diese Tendenz ist vor allem in Szenarien zu erwarten, in denen die Maschinen eine hohe Auslastung aufweisen. Hier führt die Einplanung zusätzlicher Wartungsaufträge zu Verzögerungen in der Produktion. Die Iterationsanzahl steigt durchgehend mit zunehmender Wartungsanzahl an. Dies ist durch die steigende Anzahl an Lösungsmöglichkeiten zu erklären

(da die Anzahl möglicher Kombination von Wartungszeitpunkten zunimmt). Der durchschnittliche Lieferterminverzug bei zentraler Planung durch das MES (DPO MES) nimmt kontinuierlich zu und liegt bei der höchsten Wartungsanzahl deutlich über der dezentralen Planung.

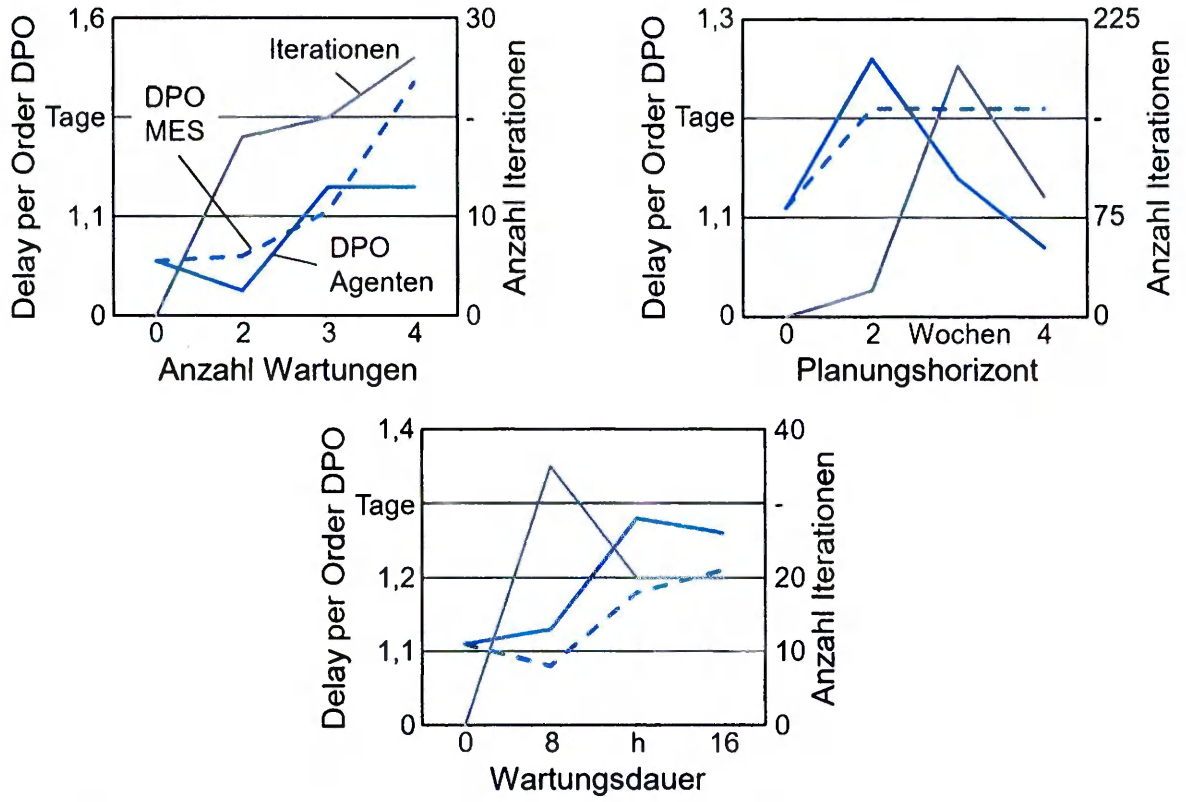

Abbildung 10: Evaluationsergebnis der vorausschauenden Instandhaltung

Bei der Variation des Planungshorizonts (Abbildung 10, oben rechts) von zwei bis auf vier Wochen nimmt der durchschnittliche Lieferterminverzug für die dezentrale Planung mit zunehmendem Planungshorizont konsistent ab. Bei zentraler Planung bleibt dieser Wert dagegen konstant. Diese Tendenz ist darauf zurückzuführen, dass bei längeren Planungszeiträumen die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass geplante Maschinenstillstände vorliegen. Dies verringert die Auswirkungen von Wartungen auf das Produktionsprogramm. Die Iterationsanzahl zur Lösungsfindung steigt nur bis zu einem Planungshorizont von drei Wochen an. Bei einem Planungshorizont von vier Wochen sinkt der Wert signifikant ab. Dies ist durch die Eigenschaft des Algorithmus bedingt, Pfade im Rahmen der Planung abzubrechen, die keine Ergebnisverbesserung ermöglichen. Im vorliegenden Fall führte dies zu einer sinkenden Iterationsanzahl, da es bei vier einzuplanenden Wartungen eine geringe Anzahl zulässiger Lösungsmöglichkeiten gab.

Bei ansteigender Wartungsdauer (Abbildung 10, unten) ist ein ähnlicher Verlauf des durchschnittlichen Lieferterminverzugs bei dezentraler und zentraler Planung zu beobachten. Die Werte liegen für die zentrale Planung durchgängig unter denen der dezentralen Planung.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die dezentrale, agentenbasierte Planung die Kompetenzen von Mitarbeitern für die Wartungen berücksichtigt. Die zentrale Planung tut dies nicht und plant lediglich die Zeiträume ein. In der Folge sind die Ergebnisse

nicht vollständig vergleichbar, da bei der zentralen Planung auch der Fall eintreten kann, dass für eine Wartung unqualifiziertes Personal eingesetzt wird.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Hinsichtlich der Instandhaltungsstrategie gibt es zusätzlich zu dem im Bericht beschriebenen Stand der Technik keine neuen Erkenntnisse. Der Stand der Technik wurde über den Projektzeitraum hinweg beobachtet.

Es sind keine Aktivitäten außerhalb der im Projekt beteiligten Partner zur Agentenintegration in die Verwaltungsschale bekannt.

In der IDTA wird an dem Teilmodell Template "Maintenance" gearbeitet. Die entsprechenden Teilmodelle von Basys4iPP werden in die Arbeitsgruppe eingebracht.

Die Implementierung von der in der Veröffentlichung berichtet wird, setzt das Ausschreibungsverfahren nach VDI 2193 um (https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-64283-2_10). Es wird beispielhaft ein Teilmodell verwendet. Die Autoren der Veröffentlichungen auf der Konferenz KommA informierten uns bei einer Rücksprache, dass sie die Typ 3 VWS Umsetzung nicht weiterverfolgt haben.

Die Umsetzung in der VWS-Interaktionen in der Umsetzung zugänglich über https://gitlab.hrz.tu-chemnitz.de/vws-demo/vws-spielwiese, wird eine einfaches Beispiel mit binären Größen, die Lampen ein- und ausschalten. Prinzipiell wird eine Art Typ 3 VWS verwendet, jedoch kommen keine I.40-Sprachnachrichten zum Einsatz. In diesem Sinne hat diese Umsetzung keinen Einfluss auf die Umsetzung in Basys4iPPS.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Lauscher

Der Prozess der Wartungs- und Instandhaltungsplanung kann durch ein hier beschriebenes System digitalisiert und automatisiert werden. Dies führt zu jährlichen Einsparungen im fünfstelligen Bereich. Durch das aktive Melden von Wartungsbedarfen der Maschine können Wartungsarbeiten viel schneller durchgeführt und weitere Schäden vermieden werden. Zudem wird der Prozess sicherer, was vor allem für zertifizierte Unternehmen (z. B. in der Luftfahrt oder Medizintechnik) wichtig ist, um die Audit-Anforderungen zu erfüllen.

Seitec

Verwaltungsschalen sind Grundlagen wesentlicher Basistechnologien im Bereich Digitaler Zwilling und im Kontext der I4.0-Datenökosysteme (GAIA-X, Manufacturing-X, ...). Das im Projekt erlangte Know-How im Bereich Entwicklung und Modellierung von Type 3 Verwaltungsschalen bildet eine gute Basis für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die Ergebnisse fließen in neue Cloud-Edge-Softwareprodukte und -Dienstleistungen ein. Dadurch ergeben sich speziell im Kontext GAIA-X neue Geschäftsmodelle für SEITEC.

Die Projektergebnisse tragen dazu bei, dass SEITEC sich als Anbieter für ganzheitliche Lösungen im Bereich Automatisierung und Digitalisierung weiter etabliert bzw. die Marktposition stärken kann.

Die entwickelten Verwaltungsschalenkomponenten werden in die SEITEC-Konnektivität-Suite integriert. Dadurch konnte eine weitere standardisierte Schnittstelle erfolgreich in das

Produktportfolio aufgenommen werden, welche die Grundlage zur Integration in die sich etablierenden digitalen europäischen Datenökosysteme bildet.

Fauser

Die entwickelte Instandhaltungs- und Produktionsplanungsmethode ermöglicht produzierenden KMU die Verknüpfung und Digitalisierung beider Teildisziplinen. Dies führt zu einem automatisierten und durchgängig dokumentierten Prozess. Durch die Integration von Agenten in ein zentrales Planungssystem können individuelle Randbedingungen von Produktionsbetrieben aufwandsarm berücksichtigt werden. Die Nutzung der Verwaltungsschale hat sich für die vertikale und horizontale Verknüpfung des MES mit der heterogenen Systemlandschaft bei dem Anwender Lauscher als sinnvoll und hilfreich erwiesen. Das erlangte Know-How fließt bei FAUSER in zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte ein. Der entwickelte IHPP-Prototyp wird zu einem vermarktbaren Softwaremodul weiterentwickelt und Kunden als Erweiterung des FAUSER MES angeboten.

IFW

Das IFW erlangte durch die Durchführung des Forschungsprojekts ein erweitertes Verständnis über die Anwendung von Verwaltungsschalen und damit einhergehende Anforderungen, um Sie im Rahmen der Produktionsplanung einzusetzen. Weiter wurde ein erweitertes Verständnis zur Verknüpfung bekannter Strukturen aus dem Bereich der Multiagentensysteme mit standardisierten Verwaltungsschalen geschaffen. Neben der Instandhaltungsterminierung kann das neu erlangte Wissen für weitere Problemstellungen in der Produktionsplanung sowie der Fertigungssteuerung angewendet werden. Die Verwendung standardisierter Strukturen und Vorgehen können in zukünftigen Forschungsprojekten auch unternehmensübergreifende Planungsvorgänge betrachtet werden.

OvGU

Im Forschungsvorhaben konnte ein neues Anwendungsgebiet für die Interaktion mit der I4.0 Sprache zwischen den Verwaltungsschalen erschlossen werden. Nach unserem Wissen wurde zum ersten Mal ein MES-System in diese Interaktion eingebunden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Interaktionsmuster der Standards IEC 62264 für die Verwaltungsschalen angewendet werden kann. Dies ermöglicht es nun, weitere Anwendungen zwischen Partnern der Produktionsmanagementebene zu evaluieren und potentiell umzusetzen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass eine Ergänzung der Verwaltungsschale um Agenten prinzipiell möglich ist. Dies bestätigt, dass die Verwaltungsschalen vom Type 3 die Anforderungen an die gewünschte Dezentralisierung in der Produktionsplanung und Instandhaltung erfüllen können. Das verwendete Teilmodell für die Instandhaltung wird in den entsprechenden IDTA-AK eingebracht.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Mit dem IESE als Koordinator des Basys Projektes gab es einige Rücksprachen. Zusammenarbeit mit anderen Partnern gab es nicht.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Auf folgenden Konferenzen wurden Beiträge veröffentlicht:

- Islam, R., Wand, A., Röder, Ch., Stamm, S., Dayeg, A., Winter, F., Salaj, L., Noske, H., Denkena, B., Diedrich, Ch. (2023): Erfahrungsbericht bei der Umsetzung der VWS Typ 3 Interaktionen in einer Maintenance-Anwendung. In 14. Jahreskolloquium

Kommunikation in der Automation (KommA 2023). Magdeburg, 2023. Digitale Kolloquiumsproceedings.

- Noske, H. (2023): Integrierte Instandhaltungs- und Produktionsplanung mit BaSys 4.0. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert

Folgende Beiträge wurden eingereicht, sind zum Zeitpunkt der Berichtserstellung jedoch noch nicht veröffentlicht:

- Denkena, B., Kettelmann, S., Wand, A., Röder, Ch., Stamm, S., Dayeg, A., Winter, F., Salaj, L., Islam R., Diedrich, Ch. (2024): Hybride MES-Agentenlösung für vorausschauende Instandhaltung. Automation Kongress 2024. VDI Tagungsband – digital.

II.9 Literaturverzeichnis

[BUD08] Budai, G., Dekker, R., Nicolai, R.P. (2008): Maintenance and Production: A Review of Planning Models. Complex System Maintenance Handbook. Springer London. London, S. 321–344.

[CRU19] Cruz Salazar L.A., Ryashentseva D., Lüder A., et al. (2019): Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. Int J Adv Manuf Technol 105(9):4005–4034.

[DIN19] DIN (2019) 31051: Grundlagen der Instandhaltung.

[DEN21] Denkena, B.; Dittrich, M.-A.; Noske, H.; Stoppel, D.; Lange, D. (2021): Data-based ensemble approach for semi-supervised anomaly detection in machine tool condition monitoring. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 35, S. 795-802.

[FAA20] Faath, A. (2020): Umati wird zur Weltsprache der Produktion. https://www.vdma.org/v2viewer/- /v2article/render/47923004 (aufgerufen am 26.07.2024).

[FAY19] Fay A., Gehlhoff F., Seitz M., Vogel-Heuser B., Baumgärtel H., Diedrich C., Lüder A., Schöler T., Sutschet G., Verbeet R (2019): Agenten zur Realisierung von Industrie 4.0.

[FOE19] Foerster F., Mueller D., Scholz D., et al. (2019): Integration of condition based maintenance orders into the decision-making of autonomous control methods. Procedia CIRP 81:216– 221.

[FOU01] Foundation For Intelligent Physical Agents (2001): FIPA Ontology Service Specification. http://www.fipa.org/specs/fipa00086/XC00086C.html (aufgerufen am 26.07.2024).

[GER09] Gershman, A., Meisels, A., Zivan, R. (2009): Asynchronous Forward Bounding for Distributed COPs. Journal of Artificial Intelligence Research 34, 61-88.

[GIT19] Gittler, T., Gontarz, A., Weiss, L., et al. (2019): A fundamental approach for data acquisition on machine tools as enabler for analytical Industrie 4.0 applications. Procedia CIRP 79:586–591.

[GLA19] Glawar, R., Ansari, F., Kardos, C., et al. (2019): Conceptual Design of an Integrated Autonomous Production Control Model in association with a Prescriptive Maintenance Model (PriMa). Procedia CIRP 80:482–487.

[KAR17] Karnouskos, S., Leitao, P. (2017): Key Contributing Factors to the Acceptance of Agents in Industrial Environments. IEEE Trans. Ind. Inf. 13(2):696–703.

[KAR19] Karnouskos, S., Ribeiro, L., Leitao, P., et al. (2019): Key Directions for Industrial Agent Based Cyber-Physical Production Systems. 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). IEEE, S. 17–22.

[KER15] Kermarrec, AM., Taïani, F. (2015): Want to scale in centralized systems? Think P2P. J Internet Serv Appl 6, 16.

[KLE15] Kletti, J. (2015): MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung. 2. Aufl. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

[KRI11] Kriegel, H.-P., Kroger, P., Schubert, E., Zimek, A. (2011): Interpreting and Unifying Outlier Scores, in: Proceedings of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining. Proceedings of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, pp. 13–24.

[KRÖ14] Kröning, S. (2014): Integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung und -steuerung mittels Simulationstechnik, Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2014. Leibniz Universität Hannover, IFW, Garbsen.

[KUH17] Kuhnle, A., Kuttler, M., Dümpelmann, M., et al. (2017): Intelligente Produktionsplanung und - steuerung: Erlernen optimaler Entscheidungen. wt Werkstatttechnik online 107(9):625– 629.

[LEI16] Leitao, P., Karnouskos, S., Ribeiro, L., et al. (2016): Smart Agents in Industrial Cyber– Physical Systems. Proc. IEEE 104(5):1086–1101.

[MAR09] Marmier, F., Varnier, C., Zerhouni, N. (2009): Proactive, dynamic and multi-criteria scheduling of maintenance activities. International Journal of Production Research 47(8):2185–2201.

[OPC21] OPC Foundation (2021) OPC 40001-1- UA CS for Machinery Part 1.

[PEN10] Peng, Y., Dong, M., Zuo, M.J. (2010): Current Status of Machine Prognostics in Condition-Based Maintenance: A Review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50/1–4: 297–313.

[PLA18] Plattform Industrie 4.0 (2018) I4.0-Sprache: Vokabular, Nachrichtenstruktur und semantische Interaktionsprotokolle der I4.0-Sprache.

[PLA20a] Plattform Industrie 4.0 (2020) Details Of the Administration Shell - Part 1: The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC01), Berlin.

[PLA20b] Plattform Industrie 4.0 (2020) Details of the Asset Administration Shell: Part 2 - Interoperability at Runtime - Exchanging Information via Application Programming Interfaces.

[RAH23] Rahal, J.R., Schwarz, A., Sahelices, B., Weis, R., Antón, S. (2023): The asset administration shell as enabler for predictive maintenance: a review. Journal of Intelligent Manufacturing.

[RAM00] Ramaswamy, S., Rastogi, R., Shim, K. (2000): Efficient Algorithms for Mining Outliers from Large Data Sets, in: Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of data - SIGMOD '00. the 2000 ACM SIGMOD international conference, Dallas, Texas, United States. 15.05.2000 - 18. 05.2000. ACM Press, New York, New York, USA, pp. 427–438.

[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.

[VDI19] VDI/VDE (2019) 2193 Blatt 1: Sprache für I4.0-Komponenten.

[VER20] Verbeet, R., Baumgärtel, H. (2020): Implementierung von autonomen I4.0-Systemen mit BDI-Agenten. in Hompel M ten, Vogel-Heuser B, Bauernhansl T (Hrsg.). Handbuch Industrie 4.0. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, S. 1–36.

[VOG20] Vogel-Heuser, B., Seitz, M., Cruz Salazar, L.A. et al. (2020): Multi-agent systems to enable Industry 4.0. at - Automatisierungstechnik 68(6):445–458.

[WAL03] Wald, G. (2003): Prozessorientiertes Instandhaltungsmanagement, Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2003. Shaker, Aachen.

[WER12] Werner, P. (2012): Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten, Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2011. Shaker, Aachen.

[WOO08] Wooldridge, M.J. (2008): An introduction to multiagent systems. Wiley, Chichester.

[ZHA19] Zhao, Y., Nasrullah, Z., Li, Z. (2019): PyOD: A Python Toolbox for Scalable Outlier Detection. Journal of Machine Learning Research.

[ZON20] Zonta, T., da Costa, C.A., da Rosa Righi, R. et al. (2020): Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering 150:106889.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

BaSys4iPPS - Integrierte Instandhaltungs- und Produktionsplanung durch dezentrale Instandhaltungsprognose von Bestandsmaschinen in BaSys 4

in der Fördermaßnahme

„Förderung von Forschungsvorhaben für die Weiterentwicklung des Softwaresystems BaSys 4.0 in der Anwendung“

Autor(en)
Stamm, S.[1]; Röder, Chr.[2]; Wand, A.[2]; Winter, F.[3], Dayeg, A.[3], Salaj, L.[3], Denkena, B.[4]; Kettelmann, S.[4]; Islam, R.[5], Diedrich, Chr.[5]

Projektlaufzeit: 01.01.2022 – 31.03.2024

Erstellungsdatum: tt.mm.jjjj

Projektpartner

Koordinator: Lauscher Präzisionstechnik GmbH[1] (FKZ: 01IS21073A)

SEITEC GmbH[2] (FKZ: 01IS21073B)

FAUSER AG[3] (FKZ: 01IS21073C)

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen[4] (IFW), Leibniz Universität Hannover (FKZ: 01IS21073D)

Lehrstuhl für Integrierte Automation[5] (LIA), Otto-von-Guericke-Universität-Magdeburg (FKZ: FKZ 01IS21073E)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS21073A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

I. Teil I Kurzbericht

I.1 Aufgabenstellung

Eine effiziente Produktionsplanung und -steuerung ist stark von einer präzisen und vorausschauende Instandhaltungsplanung abhängig. Basierend auf einer ausreichenden Datenqualität 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. Folgende Limitierungen sind für eine praxisnahe Überführung ausschlaggebend:

1. Maschinenindividuelle Instandhaltungsprognosen sind aufgrund fehlender Maschinendaten bisher nicht realisierbar.
2. Es existiert zumeist keine einheitliche Anbindung für Maschinendaten.
3. Es findet zumeist keine Verknüpfung mit Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen statt.

Daher ist das Ziel des Verbundprojekts „BaSys4iPPS“, mithilfe der BaSys-4-Referenzarchitektur eine integrierte Produktions- und Instandhaltungsplanung für Werkzeugmaschinen im Bestand der Lauscher Präzisionstechnik GmbH (Lauscher) umzusetzen. Damit soll eine signifikante Reduzierung unerwarteter Produktionsstillstände und eine deutliche Erhöhung der Planungssicherheit ermöglicht werden.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Die Instandhaltungsplanung, die Maschinendatenerfassung, die Agentensystemen und die Verwaltungsschale bilden den thematischen Rahmen des Vorhabens.

Das Ziel der **Instandhaltungsplanung** im Allgemeinen ist eine bestmögliche Abwägung zwischen Sicherung einer langfristigen Maschinenverfügbarkeit und der Verursachung von kurzfristigen Maschinenstillständen. Bei der Planung werden dynamische Wechselwirkungen zwischen einer separaten Instandhaltungs- und Produktionsplanung in der Regel vernachlässigt. Es gibt bereits Ansätze zur integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung, die auf zustandsbasierten Maschineninformationen basieren. Ein Praxistransfer in industrielle Planungssysteme ist u. a. aufgrund äußerst heterogener Schnittstellen zu Bestandsmaschinen kaum erfolgt.

Die **Maschinendatenerfassung** (MDE) dient grundsätzlich dazu, Zustands- und Prozessdaten, von Fertigungsressourcen – u. a. Werkzeugmaschine – systematisch, manuell oder automatisiert zu erfassen. Bei systematischer Aufzeichnung und Verwendung können Maschinendaten darüber hinaus genutzt werden, um maschinenspezifischen Langzeitbetrachtungen aufzuzeichnen und somit Probleme an Maschine und Anlagen mittel- bis langfristig zu erkennen. Üblicherweise erfassbare strukturierte Maschinendaten sind in diesem Zusammenhang herstellerspezifische Stammdaten, Daten über den Maschinenstatus, allgemeine und maschinenspezifische Fehler und Fehler-Logs, sowie typische NC-Daten. Werkzeugmaschinen-spezifische Schnittstellenstandards existieren erst seit kurzem und sind in der industriellen Praxis noch nicht oder nur sehr vereinzelt vorzufinden.

Agentensysteme (engl.: „Multi Agent System“, MAS) bestehen aus lokalen Softwareagenten, die allgemein als flexible und autonome Entitäten zu definieren sind. Eine verbreitete Form sind sog. Belief-Desire-Intention-Agenten (BDI-Agenten). Sie sind befähigt, auf Basis der

wahrgenommenen Umgebung und ihren individuellen Zielen Handlungsentscheidungen zu treffen. Somit können z. B. Instandhaltungsprognosen über zur Verfügung stehende Maschinendaten individuell ermittelt und Wartungsintervalle gesamtoptimal verhandelt werden. Trotzdem sind sie kaum in Industrieanwendungen überführt.

Ein Lösungsansatz für informationstechnische Herausforderungen heutiger Produktionsanlagen ist der digitale Zwilling. Ein konkreter Vorschlag der Plattform Industrie 4.0 und der Industrial Digital Twin Association (IDTA) zur Realisierung des digitalen Zwillings ist die **Verwaltungsschale** (VWS). Das Ziel der VWS ist es, ein einheitliches Beschreibungsmittel für Assets bereitzustellen und somit einen interoperablen Datenaustausch über den gesamten Lebenszyklus entlang des Wertschöpfungsprozesses zu ermöglichen. Die VWS ermöglicht jedoch im aktuellen Entwicklungsstand noch nicht alle Voraussetzungen für dezentrale Prognoseprozesse.

Bei Agentensystemen sind solche Strukturen dagegen Stand der Technik. Folglich ist es vielversprechend, die VWS und BDI-Agenten architektonisch so zu verbinden, dass der standardisierte Ansatz der VWS mit den für mehr Autonomie und Flexibilität geeigneten Strukturen der BDI-Agenten kombiniert werden kann.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Kern des Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung der Instandhaltung in KMUs auf der Basis digitaler Technologien. Dabei wurde zunächst die Einordnung der geplanten Instandhaltung in die gesamte Produktionsplanung mittels Verwaltungsschalen automatisiert. Damit ist eine Verwaltungsschalen-basierte Vernetzung von Maschinen und MES entwickelt und bei Lauscher umgesetzt worden. Im zweiten Szenario konnte eine vorausschauende Einplanung der Instandhaltung entwickelt und getestet werden. Dabei wird aus Echtzeitdaten der Maschinenkomponenten ein potenzieller Ausfall bestimmt und anschließend iterativ mit der Produktionsplanung des MES ein Optimum des tatsächlichen Reparaturtermins bestimmt. Hier konnte gezeigt werden, dass der durchschnittliche Lieferterminverzug und die Wartungsdauer reduziert werden kann. Die softwaretechnische Basis der Verwaltungsschale bilden die Java- und die C#-Variante des BaSyx-SDK.

Im Einzelnen konnten folgende Erfahrungen bei der Umsetzung gemacht werden:

- Die unterschiedliche Namensgebung von Maschinen und Ressourcen ist in gewachsenen Systemen in Unternehmen eine Herausforderung für die Planung
- Durch die Verwendung von Verwaltungsschalen wird das Erfassen, Auslösen und Dokumentieren von Wartungen in einem ganzheitlichen digitalisierten System möglich
- Die Verantwortung für Wartungsvorgänge wurde neu so organisiert, dass die Maschinen eigenständig die Wartungsintervalle überwachen und an das MES melden.
    - Für KMUs ist dies eine Neuerung, da statt einer manuellen Erfassung der Betriebsstunden nun eine automatische, exakte Erfassung durchgeführt wird.
    - Die automatische Integration der Wartungsarbeiten in die bestehende Produktionsplanung stellt eine weitere Verbesserung dar.
- Im Rahmen der Evaluation wurde gezeigt, dass dezentrale Agentensysteme in komplexen Planungssituationen (beispielsweise hohe Anzahl einzuplanender Wartungen oder langer Planungshorizont) bessere Ergebnisse als klassische Produktionsplanungssystem liefern können.
- Die Umsetzung in einem KMU kann die dortige IT vor Herausforderungen stellen, da die virtuelle Umgebung hohe Ansprüche an Leistung der Rechner hat