

Dynamische Risikoorientierung durch Predictive Analytics am Beispiel der Instandhaltungsplanung

Dynamic risk orientation through predictive analytics on the example of maintenance planning

Fabian Förster¹
Arkadius Schier¹
Michael Henke^{1, 2}
Michael ten Hompel^{1, 3}

¹Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund

²Lehrstuhl für Unternehmenslogistik (LFO), Technische Universität Dortmund

³Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW), Technische Universität Dortmund

Autonome Steuerungsverfahren gelten als vielversprechender Ansatz, um einer zunehmend dynamisch und komplexer werdenden Produktionsumgebung gerecht zu werden. Während Steuerungsverfahren im Rahmen der Produktionsplanung immer kürzere Planungszyklen anstreben, konnte die Planbarkeit für Instandhaltungsmaßnahmen durch Predictive Maintenance-Ansätze erst gewonnen werden. Um die Potenziale eines kombinierten Ansatzes nutzen zu können, stellt diese Arbeit eine Verhandlungsumgebung dar, die auf dem Contract Net Interaktionsprotokoll basiert. Durch die Gewährleistung der Vergleichbarkeit zweier Auftragsarten soll eine bessere Integration von zustandsabhängigen Instandhaltungsaufträgen in die reaktive Maschinenbelegungsplanung von autonomen Steuerungsverfahren erreicht werden.

[Schlüsselwörter: prädiktive Instandhaltung, dynamische Sequenzierung, Multiagentensysteme, dezentrale Entscheidungsfindung, Contract Net Protokoll]

Autonomous control methods (ACMs) are considered as a promising approach to deal with an increasingly dynamic and complex production environment. However, existing ACMs do not sufficiently utilize the potential arising out of the plannability offered by condition based maintenance orders in the context of predictive maintenance when doing dynamic and myopic production scheduling. In order to better leverage the potentials of a combined approach, this work presents a negotiation environment based on a reversed contract net protocol to enable a monetary comparability of both order types. This is intended to realize a better integration of condition based maintenance orders into the reactive machine allocation decision-making of ACMs.

[Keywords: predictive maintenance, autonomous control, dynamic sequencing, multi-agent-systems, decentral decision-making, contract net protocol]

1 EINFÜHRUNG

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie die Rolle der Instandhaltung sind von großer Bedeutung für einen hocheffizienten Fabrikbetrieb. Der daraus resultierende Mehrwert durch eine integrierte Sichtweise dieser beiden Disziplinen ist für die Realisierung einer intelligenten Fabrik von besonderer Bedeutung [RST+16]. Die Zielsetzung dieses Beitrags ist deshalb die integrierte Betrachtung von zustandsabhängiger Instandhaltung und autonomer Produktionssteuerung.

Eine zunehmend digitalisierte Produktionsumgebung führt zunächst zwangsläufig zu erhöhten Anforderungen an die Instandhaltung, die reibungslose Produktionsabläufe eines immer komplexer werdenden Systems zu gewährleisten versucht. Auf der anderen Seite kann genau diese Innovation dazu genutzt werden, den damit einhergehenden Herausforderungen gerecht zu werden. Ausgehend von der zugrundeliegenden Datenbasis können zukünftige technische Störungen antizipiert werden und eine zustandsorientierte Planung im Sinne von Predictive Maintenance erfolgen. Planbare Wartungsaktivitäten vermeiden Produktivitätsverluste und finanzielle Risiken durch unerwartete Ausfallzeiten im Gegensatz zu konventionell reaktiven Wartungsstrategien [Mat13]. Dementsprechend wird die Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen durch Predictive Maintenance überhaupt erst ermöglicht und der Planungshorizont dieser Disziplin erweitert [MKB+16].

Die zunehmende Dynamik und Unsicherheit des Produktionsumfeldes führt zu einer Entwicklung der PPS von einer weitreichend deterministischen und statischen Vor-

planung zu einer autonomen und reaktiven Selbststeuerung, d. h. einer dynamischen Planung, um ein hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten [MVD+15]. In diesem Zusammenhang werden immer kürzere Planungshorizonte angestrebt, um auch kurzfristig handlungsfähig zu sein und häufige Neuplanungen zu vermeiden [GFS17].

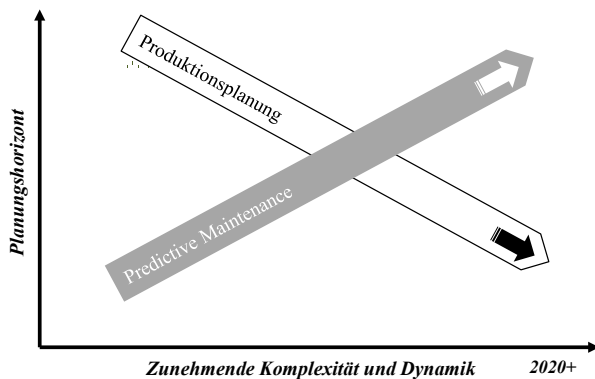


Abbildung 1. Diskrepanz unterschiedlicher Entwicklungstrends der Planungshorizonte von Produktions- und Instandhaltungsplanung

Für eine integrative Sichtweise besteht die Herausforderung darin, den Konflikt gegensätzlicher Planungshorizonte zu lösen, indem durch eine interdisziplinäre Lösung ein verbessertes wirtschaftliches Optimum erreicht wird. Ziel ist es, das Potenzial der vorausschauenden Instandhaltung in autonomen Produktionssteuerungssystemen mit kurzfristigen Planungshorizonten zu nutzen. Die Kombination ist für Wissenschaft und Industrie gleichermaßen essentiell, da kurzfristige und autonome Verfahren als unverzichtbare Zukunft der Produktionssteuerung und als wesentliches Element für die Realisierung intelligenter Fabriken angesehen werden. Die Zusammenführung beider Disziplinen trägt somit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit bei [MFV18; MMK].

Nach der Vorstellung des Ansatzes zur Integration zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen in die dezentrale Produktionsplanung in Form einer Verhandlungsumgebung, erfolgt die Ausführung des übergeordneten Forschungsrahmens, in dem die Ergebnisse schließlich eingebettet werden. In diesem Zusammenhang wird das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt PlatonaM „Plattform-Ökosystem für innovatives Instandhaltungsmanagement durch Predictive Maintenance“ vorgestellt. Ein Ziel hierbei ist die Entwicklung eines Plattform-Service, der in das Plattform-Ökosystem von PlatonaM integriert werden kann und den entwickelten Planungsansatzes widerspiegelt.

2 VERHANDLUNGSUMGEBUNG ZUR INTEGRATION ZUSTANDSORIENTIERTER INSTANDHALTUNGS-AUFTRÄGE

Um einen konzeptionellen Verhandlungsrahmen zu schaffen und reaktiv sowohl Produktionsaufträge als auch zustandsabhängig ausgelöste Instandhaltungsaufträge in einem autonomen und dezentralen Produktionssystem planen zu können, ist analog eine dezentrale und dynamische Systemarchitektur auszugestalten. In diesem Zusammenhang bedienen agentenbasierte Ansätze die hierfür notwendigen Charakteristika wie Flexibilität, Dynamik sowie Autonomie und stellen somit ein effizientes, dezentrales Planungssystem dar [BNW00; SHY+06]. Darüber hinaus bieten agentenbasierte Planungssysteme zusätzliche Aspekte wie Modularität, Rekonfigurierbarkeit, Skalierbarkeit oder Robustheit [SWH06]. Insbesondere der autonome und selbststeuernde Charakter des Planungssystems kann durch einen agentenbasierten Ansatz realisiert werden, da Multi-Agenten-Systeme für die Implementierung rein reaktiver Planungsansätze geeignet sind [ALM+05]. Die Reaktivität bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Reaktionsfähigkeit einer Planungsinstanz, die damit auf sich plötzlich ändernde Außeneinwirkungen, wie prädiktive Instandhaltungsmaßnahmen, reagieren kann.

2.1 MULTI-AGENT-BASIERTER ANSATZ

Ein Multi-Agenten-System besteht grundsätzlich aus mehreren miteinander interagierenden Agenten, welche die jeweiligen Teilnehmer im Produktionsumfeld repräsentieren. Durch die Aufteilung eines Gesamtproblems in weniger komplizierte Teilprobleme können komplexe Aufgaben, wie die Sequenzierung mehrerer Aufträge, durch Agenten gelöst werden [BLA+15; LO14]. Die einzelnen Akteure sind dabei autonom, d. h. sie handeln auf der Grundlage eigener interner Regeln und nicht auf der Grundlage externer Interventionen [Woo01]. Aufgrund dieses heterarchischen Ansatzes sind dezentrale Systeme flexibler und dynamischer als zentrale hierarchische Planungssysteme, obwohl nicht immer das gleiche Maß an Optimalität der klassischen Ansätze gewährleistet werden kann [BLA+15]. Bei unvorhergesehenen Ereignissen können sich agentenbasierte Systeme während ihrer Laufzeit anpassen und bieten somit große Vorteile für ein dynamisches Umfeld [BNW00]. Dies führt zur allgemeinen Eignung von Multi-Agenten-Ansätzen für die notwendige dynamische Sequenzierung, die bereits in zahlreichen Studien herausgestellt wurde [BNW00; ISM11; Lei09; MVK06; QP09; SWH06]. Um zustandsorientierte Instandhaltungsaktivitäten in diesen Sequenzierungsansätzen umzusetzen, müssen die bestehenden Konzepte angepasst und erweitert werden.

Für einen solchen Ansatz müssen sowohl die Mikroarchitektur, d. h. die interne Logik innerhalb der Agenten, als auch die Makroarchitektur, also die Beziehungslogik mehrerer Agenten, entsprechend konzeptioniert werden

[Woo08]. Ein Großteil agentenbasierter Planungsansätze basiert dabei auf Auktions- oder Marktverhandlungen [SWH06]. In einer Marktorganisation entscheiden eigennützige Akteure auf der Grundlage ihrer eigenen Ziele und führen Verhandlungen mit konkurrierenden Agenten durch [DWX01]. Diese Verhandlung wird durch Protokolle geregelt, von denen insbesondere das Contract Net Protocol (CNP) und modifizierte Ansätze beliebt und weit verbreitet sind [BH04; VTM+11].

Das CNP beschreibt eine Gebotsauktion und ist durch den FIPA-Standard SC00029H standardisiert [Smi08]. Zusammenfassend bittet ein Agent (Manager) alle anderen Agenten (Contractors), eine beschriebene Aufgabe auszuführen. Wenn ein Agent diese Aufgabe erfüllen kann, sendet dieser Agent ein Angebot an den Manager, um am Bewertungsprozess teilzunehmen. Nach einer definierten Zeit analysiert der Manager die abgegebenen Angebote und wählt den Höchstbietenden aus [Smi80; Wu08].

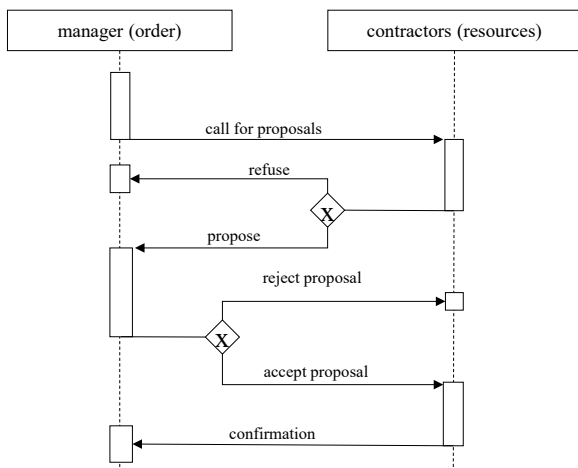


Abbildung 2. Konventionelles Contract Net-Interaktionsprotokoll im Kontext der dezentralen Produktionsplanung [Smi08]

Abbildung 2 veranschaulicht die Interaktion der Agententypen. Hier stehen demnach Ressourcen Aufträgen gegenüber, die diesen Ressourcen zuzuordnen sind. Im Sinne des hier fokussierten Szenarios wird zwischen zwei Auftragsarten unterschieden: Produktions- und Instandhaltungsaufträge, welche die Bearbeitung eines Werkstücks oder die Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme repräsentieren. Dabei gewinnt ein Instandhaltungsauftrag an Dringlichkeit, wenn dessen prognostizierte Ausfallwahrscheinlichkeit steigt.

2.2 UMKEHRUNG DER GEBOTSRICHTUNG

Im Rahmen des konventionellen CNP fungieren die Auftragsagenten als Manager, denen folglich Angebote seitens der Maschinenagenten unterbreitet werden. Die Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme wird in

diesem Kontext als Instandhaltungsauftrag definiert, sodass den Ressourcen zwei Auftragsarten gegenüberstehen. Demzufolge müsste der Contractor bereits zum Zeitpunkt der Angebotsabgabe eine Entscheidung dahingehend treffen, an welche Auftragsart ein Gebot gerichtet wird. Andernfalls würde ein Konflikt bei mehreren akzeptierten Angeboten entstehen. Insofern würde bereits zum Zeitpunkt der Gebotsabgabe durch dessen Adressierung an einen Produktions- oder Instandhaltungsauftrag eine Entscheidung getroffen werden, welche Auftragsart präferiert wird, was wiederum dem formulierten Auktionsgedanken widerspricht. Die Verhandlungsumgebung zielt vielmehr auf eine objektive Vergleichbarkeit der Handlungsalternativen ab, dessen Ergebnis schließlich die Entscheidung hinsichtlich eines Produktions- oder eines Instandhaltungsauftrags ist. Aus diesen Gründen ist die klassische Rollenzuweisung des CNP zu modifizieren.

Dem Konflikt wird durch die Umkehrung der Gebotsrichtungen entgegengetreten. Das führt dazu, dass Produktions- und Instandhaltungsaufträge unabhängig voneinander Gebote an eine Ressource richten können. Durch die Überführung der individuellen Bedürfnisse in Gebotshöhen kann somit ein objektives Auswahlverfahren zweier unterschiedlicher Auftragsarten gewährleistet werden.

2.3 EINFLUSSFAKTOREN DER VERHANDLUNGSLOGIK

Eine marktorientierte Verhandlung bietet einen geeigneten Rahmen, um konkurrierende Interessen und Erfolgsfaktoren vergleichbar zu machen. In diesem Zusammenhang können Produktions- und Instandhaltungsaufträge mit der gleichen "Währung" quantifiziert werden, in der schließlich das höchste Angebot gewählt wird. Insofern ist eine ganzheitliche Betrachtung aller relevanten Einflussfaktoren erforderlich, die durch die Abgabe eines Gebots widerspiegelt werden.

Tabelle 1. Einflussfaktoren für die Gebotshöhenermittlung

	Produktionsauftrag	Instandhaltungsauftrag
zeitlich	Schlupfzeit Differenz aus geplantem Liefertermin und Bearbeitungszeit (inkl. Rüst- und Übergangszeit) [Löd08]	zeitabhängige Ausfallwahrscheinlichkeit
		Vorlaufzeit
		Durchlaufzeit
monetär	(partieller) Wertschöpfungsbeitrag hier: proportionaler Deckungsbeitrag	Opportunitätskosten nicht erzielte Gewinne durch eine Störung
	Konventionalstrafe Strafe für das Nichteinhalten einer Lieferterminvereinbarung	Prozesskosten
	Kapitalbindungskosten	Stillstandskosten
we	Verschleißintensität	

Strategische Bedeutung	Verlängerung der Restlaufzeit Umfang der durchgeführten Maßnahmen
-------------------------------	---

Die relevanten Einflussfaktoren werden in 0 dargestellt und sind im Rahmen der hier vorgestellten Verhandlungsumgebung in eine Gebotshöhenermittlung zu überführen. Die Einflussfaktoren wurden auf der Grundlage der Literatur [RGM07; RKA13; LDL+19] abgeleitet und durch Experteninterviews sowie Workshops ergänzt und validiert. In diesem Zusammenhang wurde die Expertise von zehn Entscheidungsträgern aus Produktions- und Instandhaltungsabteilungen der betrieblichen Praxis sowie neun Vertretern der Wissenschaft zusammengeführt. Die dargestellten Faktoren sind als Differenzierungskriterien für die Auswahl konkurrierender Aufträge zu verstehen. Dabei werden Aspekte, wie ohnehin anfallende Kosten, vernachlässigt, da hier für die Verhandlung relevante Unterscheidungsmerkmale fokussiert werden.

In diesem Zusammenhang müssen vergleichbare Zeithorizonte sowie die Verhältnismäßigkeit des jeweiligen Aufwands und der Kosten gewährleistet sein. Im Sinne der autonomen Selbststeuerung wird reaktiv der jeweils nächste Arbeitsschritt eingeplant. Ein solcher Schritt kann sowohl umfassende Bearbeitungsmaßnahmen als auch sehr kurze Arbeitsvorgänge bedeuten. Gleiches gilt für Instandhaltungsaufträge: Ein umfassender Bauteilwechsel erfordert in der Regel einen erheblich größeren Zeitaufwand als kleine Reparaturarbeiten. Insofern ist hier die Vergleichbarkeit der jeweiligen Zeithorizonte zu gewährleisten. Analog ist die Verhältnismäßigkeit einer Maßnahme bezüglich der drohenden Ausfallfolgekosten zu wahren. Aus diesem Grund konzentriert sich dieser Verhandlungsrahmen auf Wartungsaufträge mit verhältnismäßig geringem Aufwand und hohen Folgekosten im Fehlerfall (siehe Abbildung 3).

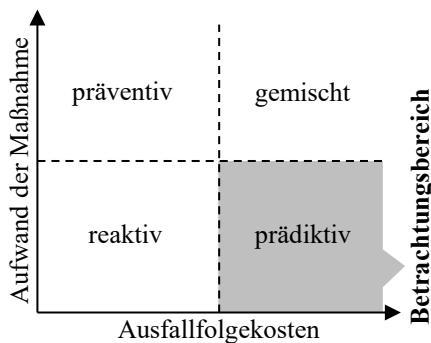


Abbildung 3. Eingrenzung des Betrachtungsbereichs für eine sinnvolle Integration von zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen (in Anlehnung an [Str12])

Auf diese Weise werden vergleichbare Zeithorizonte adressiert und gleichzeitig die Instandhaltungsaufträge auf

diejenigen Anwendungsfälle beschränkt, die aufgrund ihrer hohen Opportunitätskosten das größte wirtschaftliche Potenzial für das Szenario dieser Arbeit bieten - autonome Systeme (Kurzzeitplanungshorizonte) und vorausschauende Instandhaltungsstrategien (Früherkennung).

2.4 VERHANDLUNGSPROZESS

Bei der Überführung der aufgeführten Kriterien im Rahmen einer Gebotshöhenermittlung besteht die primäre Herausforderung darin, Einflussfaktoren verschiedener Merkmalsausprägungen zu berücksichtigen und dabei einen kompatiblen Vergleichswert für eine marktorientierte Verhandlung sicherzustellen. Hier sind Inkonsistenzen zu vermeiden, um Fertigungs- und Instandhaltungsaufträge sinnvoll miteinander vergleichen zu können. Insbesondere zeitliche und monetäre Charakteristika sind bei der Verhandlungsführung gleichermaßen zu berücksichtigen.

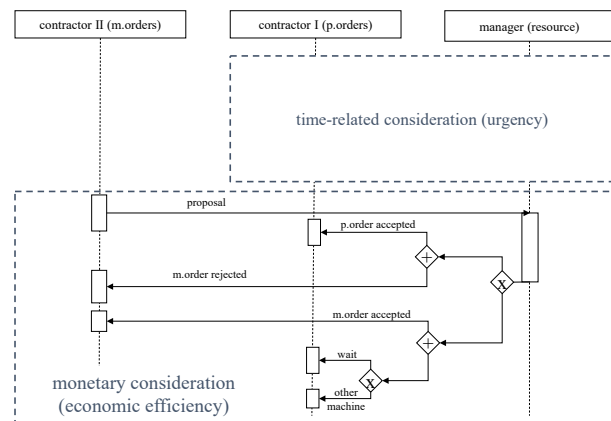


Abbildung 4. Modifiziertes Contract Net-Interaktionsprotokoll zur Integration zustandsorientierter Instandhaltungsmaßnahmen in die dezentrale Produktionsplanung

Das in Abbildung 4 visualisierte CNP-Interaktionsprotokoll quantifiziert individuelle Bedürfnisse durch die Kalkulation eines Gebotes. Würden die in 0 aufgeführten Faktoren hier berücksichtigt werden, so müssten sowohl zeitliche als auch monetäre Größen in die Ermittlung eines Gebots einfließen. Um diesen Konflikt zu vermeiden, wird neben der Änderung der Gebotsrichtung (siehe Kapitel 2.2) eine weitere Modifikation vorgenommen. Demnach beschreibt das CNP zunächst lediglich die Ermittlung des dinglichsten Produktionsauftrags, sodass ausschließlich zeitliche Einflussgrößen berücksichtigt werden. Nach der Auswahl desjenigen Auftrags, der demnach sich am ehesten zu verspäten droht, folgt eine zweite Stufe der Verhandlungsführung, indem der zuvor ermittelte Produktionsauftrag der Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme gegenübergestellt wird. Abbildung 4 veranschaulicht die vorherigen Ausführungen. Insofern erfolgt in zwei aufeinanderfolgenden Stufen zunächst eine Berücksichtigung der Dringlichkeit, bevor abschließend im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die ökonomisch sinnvolle Handlungsalternative determiniert wird.

2.5 DYNAMISCHE WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG ZUR ENTSCHEIDUNGSFINDUNG

Die Besonderheit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt in der mit der Ausfallprognose einhergehenden Dynamik begründet. Eine Modellierung der Verschleißkurve impliziert die Abhängigkeit der Ausfallwahrscheinlichkeit von der Zeit. Insofern findet eine kontinuierliche sowie dynamische Betrachtung der Handlungsalternativen statt. In diesem Zusammenhang sind die potentiell anfallenden Mehrkosten gegenüber zu stellen, die mit der Entscheidung zugunsten eines Produktions- oder eines Instandhaltungsauftrags einhergehen. Hier ist eine Betrachtung derjenigen Kosten notwendig, die im Falle der jeweils anderen Handlungsalternative nicht angefallen wären. Grundsätzlich bestehen zwei Handlungsoptionen, deren Auswahl jeweils Einfluss auf die Alternative haben. Entweder es wird eine Entscheidung zugunsten des Produzierens getroffen und es besteht die Möglichkeit eines Stillstands währenddessen. Demgegenüber besteht die Möglichkeit, eine Instandhaltungsmaßnahme durchzuführen, womit allerdings die Verspätung eines Produktionsauftrags einhergehen kann.

Würde die Entscheidung zugunsten eines Produktionsauftrags getroffen werden, so sind die potentiell anfallenden Mehrkosten durch eine Störung zu berücksichtigen. Mithilfe der durch die prognostizierte Ausfallwahrscheinlichkeit gewichteten Ausfallfolgekosten kann der Erwartungswert berechnet werden, der der Handlungsalternative Produktionsauftrag zuzuordnen ist. Auf der anderen Seite drohen für den Fall, dass die Entscheidung zugunsten einer Instandhaltungsmaßnahme getroffen wird, Mehrkosten durch einen verspäteten Produktionsbeginn. Zum einen entstehen Opportunitätskosten durch nicht erzielte Erlöse, zum anderen droht bei Nichterfüllen einer Lieferterminvereinbarung eine Konventionalstrafe.

Durch die Berechnung der jeweiligen Mehrkosten können für den Schritt der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die potentiellen Folgen der jeweiligen Handlungsalternativen abgeleitet und gegenübergestellt werden. Die Besonderheit liegt bei der Bestimmung darin, dass hier der Erwartungswert mithilfe der Gewichtung durch die prognostizierte Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmt wird. Dieser dynamische Wert wird im Rahmen des Verhandlungsprozesses den Mehrkosten durch einen verspäteten Liefertermin gegenübergestellt. Schließlich kann eine Entscheidung zugunsten der Option getroffen werden, die durch niedrigere Kosten ökonomisch sinnvoll ist.

3 PLATTFORMÖKOSYSTEM PLATONAM

Das Verbundprojekt „PlatonaM“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb der Förderlinie „Smarte Datenwirtschaft“ gefördert und vom Projektkoordinator InfAI Management

GmbH betreut. Das Gesamtziel von PlatonaM stellt die sichere und rechtskonforme Nutzbarmachung digitaler Maschinendaten als eigenständiges Wirtschaftsgut auf Grundlage eines neuartigen Plattform-Ökosystems dar. Infolgedessen werden die bisherigen komplexen Hersteller-Kunden-Beziehungen abgelöst und in eine plattformbasierte Beziehung überführt. Der Nutzen liegt dabei in der Reduzierung von Datenschnittstellen, der Aufdeckung bislang verborgener Zusammenhänge in der Maschinennutzung und der verbesserten Prognose und Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen. Der zuvor vorgestellte Planungsansatz wird als Plattform-Service integriert, um über die Prognose bevorstehender Ereignisse hinaus Handlungsempfehlungen ableiten zu können.

3.1 PLATONAM-PLATTFORMANSATZ

Instandhaltungsprozesse in der Produktion verlaufen derzeit standardmäßig als Verschränkung zwischen mehreren beteiligten Akteuren mit jeweils spezifischen Rollen. So existieren Hersteller von Maschinen, die diese an verschiedene Kunden liefern. Die Hersteller beziehen benötigte Maschinenteile und -komponenten von entsprechenden Zulieferern. Beim Auftreten von Störungen oder dem Ausfall von Maschinen bei Kunden schaltet der Hersteller einen Instandhaltungsdienstleister ein. Dabei handelt es sich entweder um den Hersteller selbst oder um Fremdfirmen, die vom Hersteller beauftragt werden.

Vor diesem Hintergrund liegt die Neuartigkeit des PlatonaM-Ansatzes in der Nutzbarmachung von Maschinendaten als eigenständiges Wirtschaftsgut. Auf Basis der PlatonaM-Plattform, die als zweiseitiger Markt gestaltet ist, sollen direkte und indirekte Netzwerkeffekte zum Tragen kommen. Diese versprechen konkrete Vorteile auf den drei Untersuchungsebenen: Maschinentyp (Maschinen des gleichen Typs bei verschiedenen Kunden), Maschineninterdependenzen (komplexe Maschinen mit Komponenten verschiedener Zulieferer) und Produktlebenszyklus (Entscheidungsunterstützung für das Reengineering). Erstens liegen Vorteile für Kunden in der Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Maschinennutzung und Maschinenfehlern, die aufgrund der größeren Anzahl von Maschinendaten je Maschinentyp auf der Plattform möglich wird. Zweitens können bislang verborgene Zusammenhänge aus der Nutzung verschiedener Maschinenkomponenten unterschiedlicher Hersteller und Zulieferer in Produktionsprozessen entdeckt werden. Drittens ermöglicht die Plattform Herstellern einen vereinfachten Zugang zu Maschinendaten der eigenen Kunden (Ablösung proprietärer Schnittstellen). Viertens profitieren Hersteller von der Aufdeckung verborgener Zusammenhänge entlang des Produktlebenszyklus und können so Potenziale für Produktverbesserungen und -innovationen identifizieren. Fünftens kann die PlatonaM-Plattform eine Keimzelle für neue Dienstleister sein, deren Kernaufgabe die datenbasierte Prognose, Planung und Koordination von Instandhaltungsmaßnahmen ist, wodurch neue und auch rein digitale Geschäftsmodelle

ermöglicht werden. Zur Realisierung dieser Netzwerkeffekte ist die Erhaltung der Business Privacy bei der Maschinendatenutzung als zwingende Voraussetzung anzusehen.

Hinsichtlich der plattformbasierten Datenintegration sind heterogene Datenquellen zu erschließen, die über die heute vorherrschenden Sensordatenströme hinausgehen. Hierzu gehören unter anderem Maschinendokumentationen und Serviceprotokolle als Beispiele für semi- und schwach-strukturierte Daten. Die Dateneigentümer sollen selbstständig über die Datenweitergabe an die Plattform entscheiden. Dies schließt verbindliche Regelungen (Policies) für die Verarbeitung, Anonymisierung und Weitergabe an Dritte (Zerlegung) mit ein. Das dabei zum Einsatz kommende Business-Privacy-Modell wird auf einem Policy-Ansatz und einer Policy-Engine (z. B. unter Verwendung von XACML) basieren.

In Bezug auf die Prozess- und Datenanalytik werden Verfahren für multimodales Machine-Learning entwickelt und hierzu eine Verarbeitungsstrecke (Pipeline) aufgebaut. Kernbestandteil dieser Pipeline ist eine semantische Vorverarbeitung, die zum einen in die konzeptuellen Modelle der Datenintegrationsschicht integriert ist und zum anderen zur domänenspezifischen Feature-Selektion für die ML-Verfahren dient. Die Feature-Selektion beeinflusst maßgeblich die Güte der Verfahren, jedoch ist Wissen über effektive Feature-Selektion im Anwendungsbereich des Instandhaltungsmanagements bislang nicht verfügbar. Dieses gilt es zunächst in Studien mit Realdaten aufzubauen. Die Verfahrensentwicklung erstreckt sich auf Phänomenklassifikation, Mustererkennung und Prognose durch Verarbeitung zeitbezogener Maschinendaten, sodass komplementäre, grundlegende ML-Verfahren zu integrieren sind.

Zur Entscheidungsunterstützung im prädiktiven Instandhaltungsmanagement wird der eingangs ausgeführte Planungsansatz zur Priorisierung der identifizierten Instandhaltungsbedarfe integriert. Grundlage hierfür stellen die von ML-Verfahren klassifizierten Phänomene, detektierten Muster in den Maschinennutzungs- und Instandhaltungsprozessen sowie Prognosen im Prozesskontext dar. Erforderlich ist die Zusammenführung dieser Analyseergebnisse auf den drei Untersuchungsebenen Maschinentyp, Maschinenverbund und Produktlebenszyklus. Dazu sind unter Auswertung des Erfahrungswissens, der Maschinenverbundstrukturen und geplanter Maschinennutzung die potenziellen Ereignisse zu bewerten (u. a. Eintrittswahrscheinlichkeiten, zeitliche Folgeeffekte im Prozesskontext, Instandhaltungs- und Opportunitätskosten). Eine weitere Herausforderung liegt in der Entwicklung nutzerfreundlicher Analyse- und Reporting-Services, welche die bewerteten Entscheidungsalternativen so aufbereiten, dass Produktionsplaner und Instandhaltungsmanager fundierte Einschätzungen erhalten. Bestandteil der Lösung ist ein neuartiger Feedback-Service, mit dessen Hilfe Alternativen von Entscheidungsträgern selbstständig bewertet werden

können. Um einen breiten Transfer der Projektinnovationen zu gewährleisten, wird auf die Verwendung internationaler Standards und Referenzarchitekturen gesetzt.

3.2 BEZUG ZUM INDUSTRIAL DATA SPACE

„Industrial Data Space: Digitale Souveränität über Daten“ (IDS) [OJS+16] ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprojekt. Der IDS ist ein virtueller Datenraum, der den sicheren Austausch und die einfache Verknüpfung von Daten in Geschäftsökosystemen auf Basis von Standards und mit Hilfe gemeinschaftlicher Governance-Modelle unterstützt. Hierdurch wird die digitale Souveränität der Dateneigentümer gewahrt und zugleich eine Basis für smarte Services und innovative Geschäftsprozesse geschaffen. Datensouveränität in diesem Kontext bezeichnet die Fähigkeit einer natürlichen oder juristischen Person zur ausschließlichen Selbstbestimmung hinsichtlich des Wirtschaftsguts Daten. In Bezug auf PlatonaM umfasst dies die rollenbasierte, konfigurierbare Zugriffskontrolle über die nutzereigenen Daten sowie deren Verwendungsmöglichkeiten für andere Plattformakteure. Aufgrund des zunehmenden Interesses an den Nutzungspotenzialen industrieller Netzwerke und den damit verbundenen datenschutzrechtlichen Anforderungen müssen Serviceplattformen eine umfassende Datensouveränität von Unternehmen gewährleisten. PlatonaM versucht genau diese Lücke im Bereich des Instandhaltungsmanagements zu schließen und bietet Unternehmen die Möglichkeit, die Datennutzung an spezifische Anforderungen hinsichtlich der Business Privacy anzupassen.

Im Rahmen von PlatonaM wird diesbezüglich untersucht, in welcher Form die im IDS erarbeiteten Konzepte nutzbar gemacht werden können. Dies betrifft insbesondere ein Referenzarchitekturmodell und zugehörige Referenzimplementierungen. Der Erhalt der Datensouveränität schließt die Übertragung von Eigentumsrechten an zentrale Instanzen oder Anbieter aus, sodass ausschließlich der Dateneigner über die Art und Weise der Verarbeitung seiner Daten entscheidet. Die Daten können bei Bedarf dezentral bei den Eignern verbleiben und werden nur im Rahmen der Nutzung unter Anwendung strenger Schutzmaßnahmen ausgetauscht. Der IDS stellt somit eine mögliche Referenz für PlatonaM dar, sodass Vorarbeiten, insbesondere vor dem Hintergrund der Datensouveränität, genutzt werden können.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Die größte Herausforderung bei der Integration zustandsbezogener Instandhaltungsaufträge in die Entscheidungsfindung liegt in der mangelnden Vergleichbarkeit der konkurrierenden Zielsetzungen von Produktion und Instandhaltung. Es wurde aufgezeigt, dass die erforderliche Vergleichbarkeit erreicht werden kann, indem die verschiedenen Arten von Aufträgen in Agenten überführt werden,

die unabhängig voneinander einen Auktionsprozess bestreiten. Im Rahmen eines zweistufigen Prozesses wird zunächst der dringliche Produktionsauftrag ermittelt und anschließend der Notwendigkeit einer Instandhaltungsmaßnahme gegenübergestellt. Vor dem Hintergrund der prognostizierten Ausfallwahrscheinlichkeit findet nun eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung statt, die die erwarteten Folgekosten bei Nichterfüllung des Produktions- oder Instandhaltungsauftrags in Relation zueinander setzt. Auf diese Weise kann die ökonomisch sinnvollste Handlungsalternative bestimmt werden. Durch die Ansätze der Predictive Maintenance wird der Zeitpunkt der Kenntnis über eine notwendige Maßnahme vorverlagert (gegenüber einer bisher reaktiv geprägten Strategie). Dieses Wissen wird genutzt, um einen geeigneten Zeitpunkt für die notwendigen Maßnahmen zu identifizieren. Diese müssen ggf. nicht zwingend unmittelbar erfolgen, sondern können – abhängig von einer bspw. dynamischen Risikoeinschätzung – zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden. Auf diese Weise entsteht ein Zeitfenster zwischen der Kenntnis über ein bevorstehendes Ereignis und dem tatsächlichen Stillstand, der demnach einen gewissen Spielraum für einen wirtschaftlich sinnvollen Zeitpunkt bietet. So wird anhand der Analysedaten der Ausfallwahrscheinlichkeiten die Erkenntnis gewonnen, in welchem Zeitfenster bis zum prognostizierten Maschinenstillstand die Instandhaltung der Maschine am wirtschaftlichsten ist und schafft Platz für eine dynamische Risikoorientierung in der Instandhaltungsplanung.

Zukünftiger Forschungsbedarf besteht darin, die Verhandlungsumgebung als Multi-Agenten-System konkret auszugestalten. Nachdem die für den Interaktionsprozess relevanten Einflussfaktoren benannt wurden, konnte durch den zweistufigen Verhandlungsprozess den Konflikt monetärer sowie zeitlicher Charakteristika aufgelöst werden. Dennoch gibt es weitere Faktoren, wie beispielsweise die strategische Bedeutung eines Kunden, die in der Zukunft Berücksichtigung finden können. Außerdem wurde die Annahme einer einzelnen Instandhaltungsmaßnahme getroffen, deren Umfang nicht weiter spezifiziert wurde. Hier wäre eine Unterscheidung der zu treffenden Maßnahmen durch mehrere Handlungsoptionen zukünftig denkbar.

LITERATUR

- [ALM+05] Aytug, Haldun; Lawley, Mark A.; McKay, Kenneth; Mohan, Shantha; Uzsoy, Reha; *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*, in: European Journal of Operational Research, 161, 2005, S. 86–110.
- [BH04] Babayan, Astghik; He, David; *Solving the n-job 3-stage flexible flowshop scheduling problem using an agent-based approach*, in: International journal of production research, 42, 2004, S. 777–799.
- [BLA+15] Barbosa, José; Leitão, Paulo; Adam, Emmanuel; Trentesaux, Damien; *Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution*, in: Computers in industry, 66, 2015, S. 99–111.
- [BNW00] Bussmann, Stefan; Nicholas, R.; Wooldridge, Michael (Hrsg.); *On the identification of agents in the design of production control systems*. Springer, 2000.
- [DWX01] Dignum, Virginia; Weigand, Hans; Xu, Lai (Hrsg.); *Agent societies: towards frameworks-based design*. Springer, 2001.
- [GFS17] Grundstein, Sebastian; Freitag, Michael; Scholz-Reiter, Bernd; *A new method for autonomous control of complex job shops—integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates*, in: Journal of manufacturing systems, 42, 2017, S. 11–28.
- [ISM11] Isern, David; Sánchez, David; Moreno, Antonio; *Organizational structures supported by agent-oriented methodologies*, in: Journal of Systems and Software, 84, 2011, S. 169–184.
- [Lei09] Leitão, Paulo; *Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey*, in: Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22, 2009, S. 979–991.

- [LO14] Lewandowski, Marco; Oelker, Stephan; *Towards autonomous control in maintenance and spare part logistics—challenges and opportunities for preacting maintenance concepts*, in: *Procedia Technology*, 15, 2014, S. 333–340. https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/industrial-data-space/Industrial-Data-Space_whitepaper.pdf. Abgerufen am 10.07.2019.
- [LDL+19] Liu, Qinming; Dong, Ming; Lv, Wenyuan; Ye, Chunming; *Manufacturing system maintenance based on dynamic programming model with prognostics information*, in: *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 2019, S. 1155–1173.
- [Löd08] Lödding, Hermann; *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*, Berlin Heidelberg. Springer, 2008.
- [Mat13] Matyas, K.; *Instandhaltungslogistik. Qualität und Produktivität steigern*, 5, 2013, S. 107.
- [MMK] Meißner, J; Maasem, C; Kropp, S; *Voruntersuchung „Produktion am Standort Deutschland“*, in: *Pro-sense. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssystem und intelligenter Sensorik*, S. 15–22.
- [MKB+16] Monostori, László; Kádár, Botond; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K.; *Cyber-physical systems in manufacturing*, in: *Cirp Annals*, 65, 2016, S. 621–641.
- [MVD+15] Monostori, László; Valckenaers, Paul; Dolgui, Alexandre; Panetto, Hervé; Brdys, Mietek; Csáji, Balázs Csanád; *Cooperative control in production and logistics*, in: *Annual Reviews in Control*, 39, 2015, S. 12–29.
- [MVK06] Monostori, László; Váncza, József; Kumara, Soundar R. T.; *Agent-based systems for manufacturing*, in: *Cirp Annals*, 55, 2006, S. 697–720.
- [OJS+19] Otto, Boris; Jürjens, Jan; Schon, Jochen; Auer, Sören; Menz, Nadja; Wenzel, Sven; Cirullies, Jan; *Industrial Data Space - Digitale Souveränität über Daten (White Paper)*, München, 2016.
- [QP09] Ouelhadj, Djamilia; Petrovic, Sanja; *A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems*, in: *Journal of scheduling*, 12, 2009, S. 417–431.
- [RGM07] Ruiz, Rubén; García-Díaz, J. Carlos; Maroto, Concepción; *Considering scheduling and preventive maintenance in the flowshop sequencing problem*, in: *Computers & Operations Research*, 34, 2007, S. 3314–3330.
- [RKA13] Rebai, Maher; Kacem, Imed; Adjal-lah, Kondo H.; *Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines*, in: *Operational Research*, 13, 2013, S. 363–383.
- [RST+16] Roy, Rajkumar; Stark, Rainer; Tracht, Kirsten; Takata, Shozo; Mori, Masahiko; *Continuous maintenance and the future—Foundations and technological challenges*, in: *Cirp Annals*, 65, 2016, S. 667–688.
- [SHY+06] Shen, Weiming; Hao, Qi; Yoon, Hyun Joong; Norrie, Douglas H.; *Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review*, in: *Advanced engineering INFORMATICS*, 20, 2006, S. 415–431.
- [Smi08] Smith, Davis; *Foundation for Intelligent Physical Agents, FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification*, 2008.
- [Smi80] Smith, Reid G.; *The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver*, in: *IEEE Transactions on computers*, 1980, S. 1104–1113.
- [Str12] Strunz, Matthias; *Instandhaltung: Grundlagen-Strategien-Werkstätten*. Springer-Verlag, 2012.
- [SWH06] Shen, Weiming; Wang, Lihui; Hao, Qi; *Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey*, in: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 36, 2006, S. 563–577.

- [VTM+11] Vrba, Pavel; Tichý, Pavel; Mařík, Vladimír; Hall, Kenwood H.; Staron, Raymond J.; Maturana, Francisco P.; Kadera, Petr; *Rockwell automation's holonic and multiagent control systems compendium*, in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 41, 2011, S. 14–30.
- [Woo01] Wooldridge, Michael (Hrsg.); *Intelligent agents: The key concepts*. Springer, 2001.
- [Woo08] Woolridge, MJ; *An introduction to multiagent systems*, Chichester. Wiley, 2008.
- [Wu08] Wu, Juhua (Hrsg.); *Contract net protocol for coordination in multi-agent system*. IEEE, 2008.

M.Sc. Fabian Förster, research assistant at the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML, department for plant and service management, since 2017. Fabian Förster was born in 1989 in Gladbeck, Germany. Between 2009 and 2017, he studied Industrial Engineering at the Technical Universities of Dortmund and Lisbon .

Dipl.-Inf. (FH) Arkadius Schier, deputy head of the Software Engineering department, Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML since 2006. Arkadius Schier was born in 1981 in Loben, Poland. Between 2002 and 2006, he studied Technical Computer Science at the University of Applied Sciences and Arts in Dortmund.

Prof. Dr. Michael Henke, director of the Fraunhofer IML and holder of the Chair of Corporate Logistics at the Faculty of Mechanical Engineering at the TU Dortmund University, began his career with a degree in brewing and beverage engineering at the Technical University of Munich. He then earned his doctorate and habilitated at the Technical University of Munich at the Faculty of Economics. From 2007 to 2013, Michael Henke researched and taught as Professor at the EBS University of Economics and Law, where he held the Chair for Purchasing and Supply Management and headed the Institute for Supply Chain Management.

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel is a full professor and holds the Chair of Materials Handling and Warehousing at TU Dortmund University. At the same time, he is Managing Director of Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics. He is also board member of BITKOM, member of acatech (National Academy of Science and Engineering), BVL and Logistics Hall of Fame and founding member of WGTL (Scientific Association of Technical Logistics). He published more than 400 papers and more than a dozen books.

Address:

Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML,
Joseph-von-Fraunhofer Straße 2-4,
44227 Dortmund, Germany