



Digitale Transformation produktionsnaher Prozesse in KMUs des metallverarbeitenden Gewerbes

Lars Eberhardt

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Konrad-Zuse-Straße 2, 97421 Schweinfurt, lars.eberhardt@fhws.de

Alexander Dobhan

Professor für Business Process Management and Business Application, Leiter ERP- und FIS-SAP-Labor, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Konrad-Zuse-Straße 2, 97421 Schweinfurt, alexander.dobhan@fhws.de

Michael Heidenreich

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Heidestraße 3/1, 71296 Heimsheim, heidenreich-michael@gmx.net

Felix Markert

Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Uhlandstraße 18, 97072 Würzburg, markert.felix@outlook.de

1	Einleitung.....	213
2	Stammdatenpflege	215
3	Reihenfolgeplanung.....	220
4	Produktionsdatenerfassung.....	224
5	Werkzeugverwaltung.....	227
6	Entscheidungen in IoT-Architekturen	231
7	Zusammenfassung	234
8	Literaturverzeichnis	236

Abstract:

Die Potentiale der Digitalisierung für kleine und mittlere Unternehmen KMU sind heute allgemein anerkannt (vbw, 2017 und Kahn et al., 2012). Diesen Potentialen gegenüber stehen die Ressourcenstrukturen von KMUs, welche im Durchschnitt eine ältere Belegschaft und weniger spezialisierte Experten aufweist (Calzavera et al., 2020, Akyazi et al., 2020 und Lee et al., 2009). Dieser Artikel beschreibt mit Fallbeispielen, auf welche Weise die digitale Transformation produktionsnaher Prozesse in KMUs des metallverarbeitenden Gewerbes mit einem Fokus auf die Application Layer erfolgen kann. Die Fälle gehören zum Forschungsprojekt OBERA, das von der bayerischen Regierung initiiert wurde. Im Detail handelt es sich um folgende vier Fallbeispiele aus dem Geschäftsprozess des Produktionsbereiches:

- KI-basierte Stammdatenpflege von Preisen und Werkzeugen*
- Heuristisches Planungsverfahren zur hybriden Make-To-Stock-(MTS) und Make-To-Order-(MTO) Planung*
- Produktionsdatenerfassung für die Auftragsbuchung*
- Werkzeugverwaltung in KMUs*

Zusätzlich zu den Anwendungsfällen wird die Entscheidungsfindung bezüglich IoT-Architekturen, als übergreifendes Thema, untersucht. Jeder der Anwendungsfälle basiert auf einer Forschungsagenda und zielgerichteten Methoden. Daher werden hauptsächlich qualitative Erhebungsmethoden (wie Interviews, Umfragen, Beobachtungsprotokolle und andere) gewählt. Als Ergebnis der Anwendungsfälle und der Recherche zur IoT-Architektur wurden einige Faktoren identifiziert, um das Potential der Digitalisierung mit den vorhandenen Ressourcen in metallverarbeitenden Unternehmen erfolgreich zu nutzen. Über alle Ergebnisse hinweg ist die Betonung der beiden Aspekte Einfachheit und Anschlussfähigkeit hervorzuheben.

JEL Classification: L690 Industry Studies: Manufacturing: Other

Keywords: case studies, heuristic production planning, KI, Master Data Maintenance, metalworking industry, SME, quotation costing, IoT-Architecture, Target/actual comparison, Tool Management.

1 Einleitung

Das Umfeld von produzierenden Unternehmen unterliegt seit Jahren einem stetigen und schnellen Wandel. Das Internet of Things (IoT) und die Industrie-4.0-Initiativen zeigen zahlreiche Potentiale und Entwicklungsmöglichkeiten zur Umsetzung von digitalen Geschäftsprozessen innerhalb der Produktion auf (Wan et al., 2016). Diese Potentiale für kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) sind heute allgemein anerkannt (vbw, 2017; Khan et al., 2012). Deren Realisierung gegenüber steht vor allem die Ressourcenstruktur der KMUs. Im Mittel haben die Betriebe eine ältere Belegschaft, die mit neuen Anforderungen an ihre Fähigkeiten konfrontiert sind. Darüber hinaus sind oft keine, oder nur wenige spezialisierte Experten vorhanden (Calzavera et al., 2020; Akyazi, et al., 2020; Lee et al., 2009). Dies zeigt auch die Verteilung der IKT-Fachkräfte (Informations- und Kommunikationstechnologie) in Abbildung 1. Um Lösungen für diese Problematik zu entwickeln, wurde das Forschungsprojekt OBerA⁴¹ vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie initiiert.

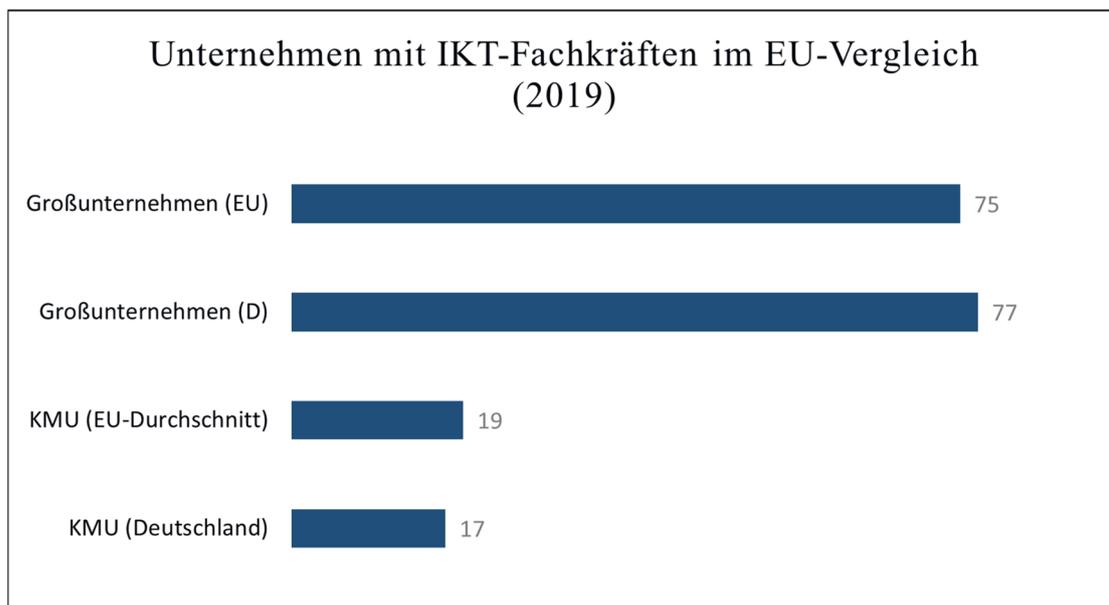


Abbildung 1: Verteilung der IKT-Fachkräfte auf die Unternehmensklassen in Deutschland und der EU (Schröder, 2020)

Das Ziel des Forschungsprojektes ist es, Transparenz zwischen geplanten und realen Produktionsabläufen zu schaffen und auf dieser Basis die digitale Transformation einzelner Prozessschritte und Prozesse zu erreichen. In Use Cases soll exemplarisch aufgezeigt werden, auf welche Weise die digitale Transformation von Prozessschritt-

⁴¹ Optimierung von Prozessen und Werkzeugmaschinen durch Bereitstellung, Analyse und Soll-Ist-Vergleich von Produktionsdaten

ten unter Berücksichtigung der zuvor aufgezeigten Barrieren in KMUs erreicht werden kann. In Summe wurden im Projekt OBERA zehn relevante Use Cases von den Projektpartnern initiiert. Dieser Artikel fokussiert sich auf Use Cases, die sich durchgängig auf die Application Layer einer Internet of Things(IoT)-Architektur beziehen. Als IoT-Architektur wird dabei in Anlehnung an den Begriff IT-Architektur die Organisation von Anwendungen, Daten und I(o)T-Infrastruktur bezeichnet, die in einer Sammlung von Richtlinien und technischen Entscheidungen, mit dem Ziel die Unternehmensstrategie umzusetzen, verwirklicht wird (Ross 2003, 2).

Grundsätzlich wurden in der Literatur zahlreiche unterschiedliche Architekturen vorgestellt. Die hier verwendete 5-Layer-Architektur nach Khan et al. (2012) und Dobhan et al. (2021) in Abbildung 2 zeichnet sich unter anderem durch die Business Layer, die sich auf die Geschäftsprozesse bezieht, aus. Die Application Layer beinhaltet die Anwendungssoftware in Unternehmen. Die restlichen Layer dienen den Programmen der Application Layer zur Bereitstellung von Inputdaten oder bei der Weiterverarbeitung des Programmoutputs.

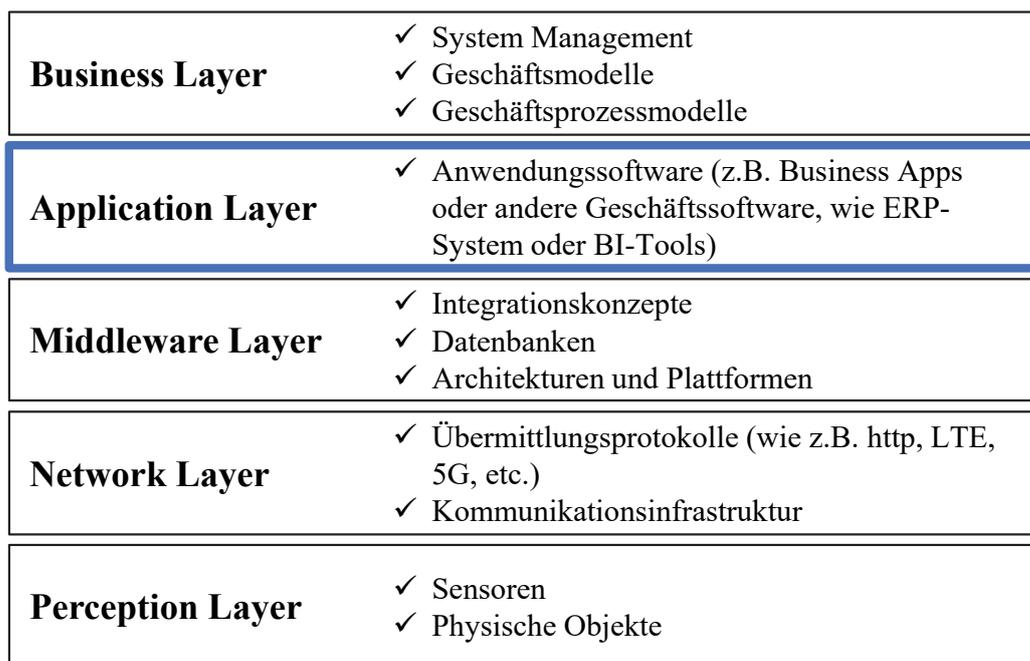


Abbildung 2: IoT-Architekturmodell (Kahn et al., 2012; Dobhan et al., 2021)

Der vorliegende Artikel beschreibt die Use Cases des Projektes OBERA, die einen Bezug zur Application Layer besitzen. Dabei soll fallbeispielhaft der Forschungsfrage nachgegangen werden:

Auf welche Weise kann die digitale Transformation produktionsnaher Prozesse in KMUs des metallverarbeitenden Gewerbes mit einem Fokus auf die Application Layer erfolgen?

Diese Frage wird im folgenden Artikel anhand der Projekt-Use-Cases „Stammdatenpflege“, „Reihenfolgeplanung“, „Werkzeugverwaltung“ und „Produktionsdatenerfassung“ untersucht. Die von den Praxispartnern initiierten Use Cases folgen dabei einem typischen Geschäftsprozess im Produktionsbereich (siehe Abbildung 3).

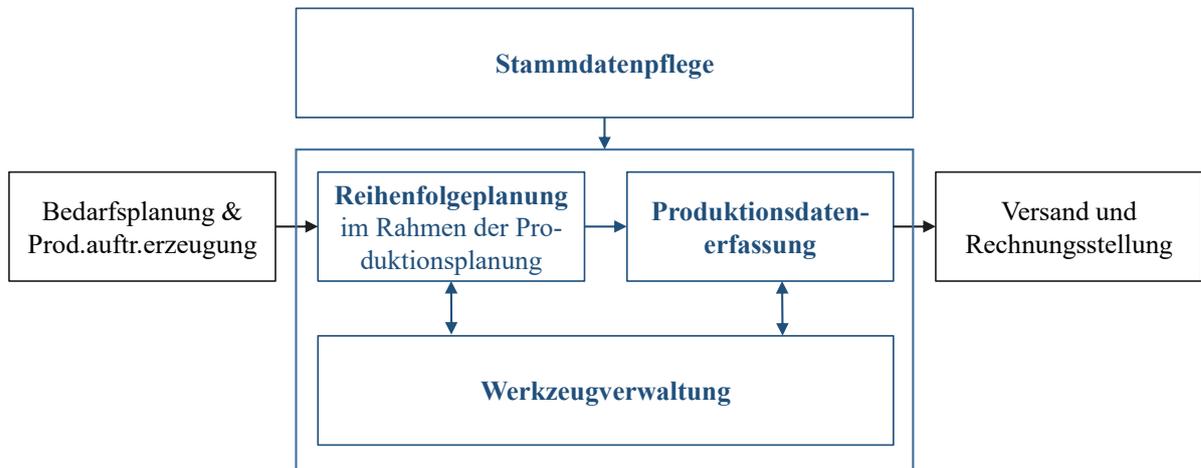


Abbildung 3: Logischer Zusammenhang der Use Cases

Nach der Stammdatenpflege, die die Voraussetzung für nahezu alle ERP-basierten produktionsnahen Tätigkeiten ist, werden die Produktionsaufträge auf Basis der Daten aus dem Vertrieb erzeugt und terminiert. Mit der Freigabe werden zudem mögliche Werkzeuge zur Verfügung gestellt (Werkzeugverwaltung) und schließlich die Auftragsdaten erfasst. Dabei wird für jeden Use Case die allgemeine Forschungsfrage weiter spezifiziert, nachdem kurz der jeweilige Use Case motiviert wurde. Daraufhin wird das methodische Vorgehen im jeweiligen Use Case beschrieben, bevor die Ergebnisse dargestellt werden. Im Anschluss daran werden jeweils die Limitationen der zugrundeliegenden Forschung aufgezeigt und die Ergebnisse in die bestehende Literatur eingeordnet. Abschließend erlaubt ein Ausblick Implikationen für die weitere Erforschung. Darüber hinaus werden Use-Case-übergreifende Forschungsergebnisse zu „Entscheidungen zu IoT-Architekturen“ eingeführt.

2 Stammdatenpflege

Digitale Transformation erfordert Datenpflege. Vertriebsprozesse können nicht ohne Lieferantenstammdaten, wie Adresse oder Zahlungskonditionen, digitalisiert werden, die Produktionsplanung in einem ERP-System würde ohne Stücklisten, Arbeitspläne oder Dispositionsparameter scheitern, und die Finanzabteilung würde nicht von digitalen Workflows profitieren, wenn Buchhaltungsdaten wie Konten oder Buchungsinformationen schlecht gepflegt sind (Zillmann, 2017; Haug et al., 2013). Gerade KMUs haben dabei auf Grund von begrenzten Ressourcen Probleme (Singh & Singh, 2022). Besondere Herausforderungen können sich hierbei bei der Digitalisierung von sich wenig wiederholenden Vorgängen, wie sie im Engineer-To-Order(ETO)-Umfeld vorkommen, ergeben. Hier werden die Produkte kundenspezifisch entwickelt (Pandit

& Zhu, 2007). Aufwändig zu pflegende Stücklisten und Arbeitspläne können – wenn überhaupt – nur in Teilen wiederverwendet werden. ERP-Systeme bieten dafür Musterkalkulationen für typische Produktkonfigurationen an. Die Qualität dieser Funktionalitäten hängt allerdings sowohl von der Ähnlichkeit der Produkte als auch von den gepflegten Daten ab. Vor allem Letzteres ist mit einem immens hohen Aufwand allein für die Angebotskalkulation verbunden. Ein weiteres relevantes Problem stellt die Auswahl der richtigen Werkzeuge dar, wenn der Arbeitsplan gepflegt ist. Helfen kann hier, die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Aufträgen und Angeboten zu erkennen und so aus Aufträgen der Vergangenheit Rückschlüsse für den aktuellen Auftrag oder den aktuellen Arbeitsplan zu ziehen. Zur Lösung dieser Problemstellung eignen sich Machine-Learning(ML)-Modelle und hier insbesondere Künstliche Neuronale Netze (KNN). Diese werden mit Vergangenheitsdaten trainiert und können je nach Modell, Situation und Trainingsdaten, Entscheidungen im aktuellen Kontext übernehmen (Ziegler et al., 2021). KNNs als intelligente⁴² Methoden können aber nur entsprechend effizient und effektiv eingesetzt werden, wenn die Voraussetzungen für den Einsatz von den KMUs geschaffen werden (Schkarin und Dobhan, 2022). Für die digitale Transformation produktionsnaher Geschäftsprozesse in KMUs sind im Kontext der Datenpflege also für die Anwendung und aus wissenschaftlicher Sicht nachfolgende zwei Fragestellungen relevant:

- Welche Voraussetzungen müssen von KMUs für einen erfolgreichen Einsatz intelligenter Methoden zur digitalen Transformation in der Produktionsreihenfolgeplanung geschaffen werden?
- Wie können Machine-Learning-Methoden bei der Datenpflege im Rahmen der digitalen Transformation in KMUs (hier im ETO-Prozess) unterstützen?

Während die zweite Fragestellung getrieben von zwei konkreten Anwendungsfällen im ETO-Kontext verortet ist, wird die erste Fragestellung auf die Reihenfolgeplanung konkretisiert, weil diese als produktionsnahe Aufgabe für alle am Projekt beteiligten Unternehmen von hoher Relevanz ist.

Die unterschiedliche Herangehensweise an die beiden Fragestellungen bedingt auch unterschiedliche *Methoden* (Schkarin und Dobhan, 2022; Ziegler et al., 2021). Zur Sicherstellung einer unternehmensübergreifenden Ausrichtung bei der Beantwortung der ersten Fragestellung dienen Experteninterviews. Der Interviewleitfaden wurde auf Basis einer breit angelegten, systematischen Literaturanalyse erstellt (Webster und Watson, 2002). Die Literaturanalyse umfasst Quellen der Adoption Theory und der AI-Readiness-Forschung (z. B. Jöhnk et al., 2021) genauso wie solche, die sich

⁴² Unter intelligenten Methoden werden hier Methoden der Künstlichen Intelligenz verstanden. Im Hinblick auf Künstlicher Intelligenz wird hier der Definition von Rich (1983) gefolgt, wonach von Künstlicher Intelligenz die Rede ist, wenn Computer Dinge tun, die im Moment Menschen besser können.

explizit auf Anwendungsvoraussetzungen beziehen und im Zuge einer entsprechenden Stichwortsuche in verschiedenen Datenbanken gefunden wurden. Die für die Forschungsfrage relevanten Quellen wurden dann entsprechend der Dimensionen Expertise, Ausstattung, Soft facts, KMUs und Reihenfolgeplanung eingruppiert. Diese Kategorien bilden auch die Grundlage für den Gesprächsleitfaden für das Experteninterview zur Beantwortung der Forschungsfragen. Neun Experten, die sich als solche durch ihre beruflichen Aktivitäten und Erfahrungen im KI-Umfeld auszeichnen, beantworteten im Rahmen von semi-strukturierten Interviews die Fragen, die gemäß einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet wurden (Kuckartz, 2019; Schkarin und Dobhan, 2022). Die Antworten ergänzen die Erkenntnisse aus dem Literaturüberblick. (Schkarin und Dobhan, 2022)

Deutlich anwendungsfallspezifischer ist die zweite Fragestellung zur Datenpflege, die sich direkt auf die Umsetzung von Künstlicher Intelligenz in einem KMU bezieht. Der Einsatz folgte dem CRISP-DM Modell (Wirth und Hipp, 2000). Um den Geschäftskontext zu verstehen, dient eine Geschäftsprozessanalyse mit Hilfe der Business Process Modelling and Notation (BPMN) zur Darstellung der Prozesse (siehe Abbildung 4). Dabei wurde der relevante Teil des Engineer-To-Order Prozesses bei der Franken GmbH & Co. KG, einem Hersteller von Präzisionswerkzeugen und OBERA-Projektpartner, untersucht und auch in Zusammenhang mit bislang veröffentlichten Forschungsarbeiten betrachtet (Ziegler et al., 2021). Dadurch wurden die Probleme, zu deren Lösung KI angewendet werden sollte, präzisiert.

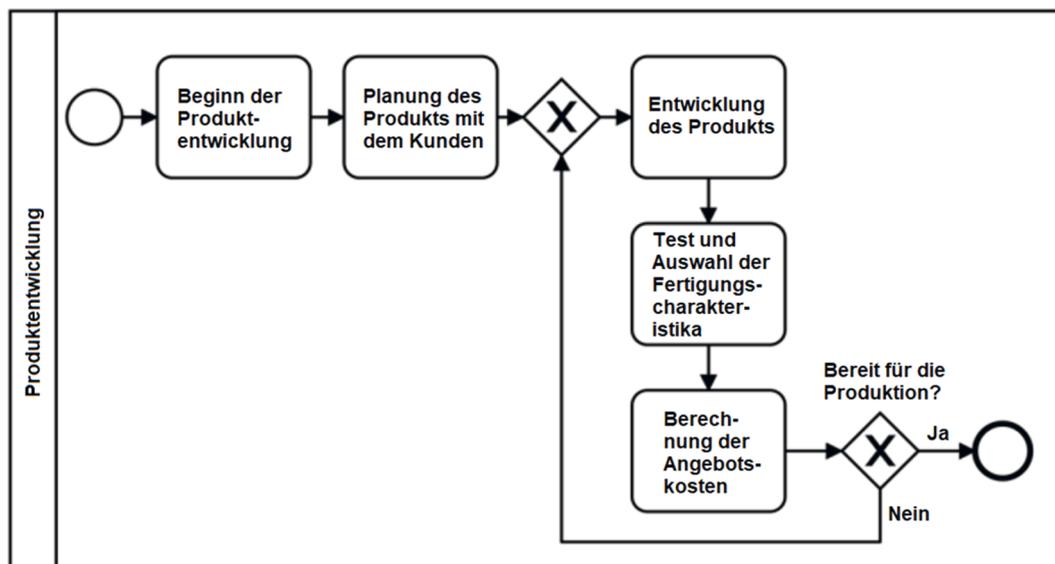


Abbildung 4: BPMN der Produktentwicklung in einem ETO-Prozess (Ziegler et al., 2021)

Die Anwendung erfolgte - wie in Ziegler et al. (2021) beschrieben wurde - mit Hilfe zweier Multi-Layer-Perceptrons (MLP) für die Angebotskalkulation (Regression) und die Werkzeugauswahl (Klassifikation). In einem Simulationsexperiment wurden

auf Basis für 52 Produkteigenschaften in den Rohdaten, die bereits bei der Angebotserstellung verfügbar sein mussten, und über 4000 Datensätzen die neuronalen Netze trainiert und getestet. Dabei wurde dem für Simulationsexperimente typischen Vorgehen z. B. nach Berger et al. (2018, S. 3–8) gefolgt. Die Modell- und Ergebnisqualität wurde dann für die Angebotskalkulation mit Hilfe des Mean Absolute Errors (MAE) und für die Werkzeugauswahl mit Hilfe des Jaccard-Index durchgeführt. (Ziegler et al., 2021)

Die *Ergebnisse* der Literaturanalyse und der Experteninterviews in Schkarin und Dobhan (2022) zeigen zunächst, dass als Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Künstlicher Intelligenz in KMUs die allgemeinen, nicht größen- oder bereichsspezifischen Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Dazu zählen das Vorhandensein von ausreichenden Hardwareressourcen und einer entsprechenden Netzwerkinfrastruktur, sowie Geschäftsapplikationen als Datenlieferanten. Im Bereich der Expertise sind zum einen KI-spezifische Kompetenz zum anderen aber auch soziale Fähigkeiten gefordert. Eine weitere wichtige Komponente ist der Aufbau von Vertrauen bei den KI-Anwendern. Darüber hinaus müssen die entsprechenden zeitlichen, finanziellen und menschlichen Ressourcen zur Verfügung stehen, sowie ein entsprechender Methodenbaukasten und fachspezifisches Wissen im Unternehmen verbreitet sein. Neue Erkenntnisse liefern die Ergebnisse der Experteninterviews. Hier wird deutlich, dass die Voraussetzungen anwendungsfallspezifisch und damit bis zu einem gewissen Grad auch bereichsspezifisch sind. Für die Reihenfolgeplanung sind teilweise andere Voraussetzungen notwendig als zum Beispiel für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz bei Maschinen im medizinischen Bereich. Hinsichtlich der Unternehmensgröße ergibt sich kein klares Bild. Während einzelne Veröffentlichungen zur Adoption Theory eher davon ausgehen, dass die Unternehmensgröße entscheidend ist, wird in der Expertenstudie in Schkarin und Dobhan (2022) eher die Bedeutung des Anwendungsfalls unabhängig von der Unternehmensgröße beschrieben. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse dieser Studie im Vergleich zu den drei Modellen der Adoption Theory und der AI Readiness Forschung (Alsheibani et al., 2018, 2019; Jöhnk et al., 2021; Bettoni et al., 2021).

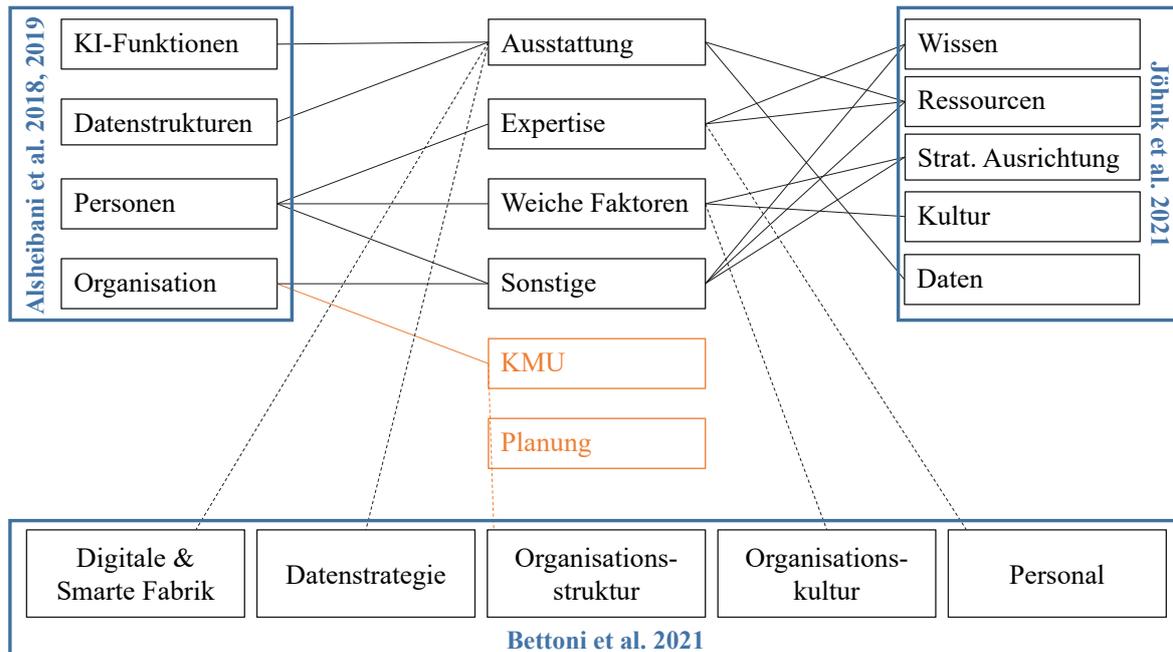


Abbildung 5: Theoretische Modelle im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen von Schkarin und Dobhan (2022)

Im Hinblick auf den Anwendungsfall des KI-Einsatzes im ETO-Prozess der Franken GmbH Co. KG in Ziegler et al. (2021) bestätigen sich diese Voraussetzungen. So wurden entsprechende Ressourcenvoraussetzungen geschaffen und durch entsprechendes Training seitens der KI-Experten Vertrauen und Kompetenz auch im Unternehmen geschaffen. Dazu zählt auch, zunächst gut abgrenzbare Probleme mit einem kleinen Anwenderkreis auszuwählen, um hier individuell auf Probleme und zukünftige Anwender eingehen zu können. Um die Akzeptanz und das Vertrauen zu steigern, müssen die Ergebnisse, die mit der Künstlichen Intelligenz erzielt werden, zumindest genauso gut oder besser sein als beim bisherigen Vorgehen. Dies war bei beiden vorliegenden Problemen für die Projektdaten der Fall. Im Zuge der Angebotskalkulation wurde für die im Projekt vorliegenden Daten ein MAE von 7 Euro erzielt vom nachträglichen im Auftragsfalle kalkulierten Preis. Dies entspricht dem Genauigkeitsniveau, das auch die manuelle, Excel-basierte Kalkulation erreichte. Bei der Werkzeugselektion wurde ein Jaccard-Index von 95,2% erreicht, wobei die Wahrscheinlichkeit sogar bei über 97% lag, dass in einem Werkzeugpaket das richtige Werkzeug enthalten ist. (Ziegler et al., 2021)

Klar aufzuzeigen sind in diesem Zusammenhang allerdings auch die *Limitationen* der Untersuchungen (Schkarin und Dobhan, 2022; Ziegler et al., 2021). Im Hinblick auf die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse und der Literaturanalyse ist darauf hinzuweisen, dass die Suche auf einige Datenbanken und ausschließlich deutsch- und englischsprachige Artikel beschränkt wurde. Gleichzeitig erhöht das Vorgehen, die Literaturanalyse in einen modellbezogenen Teil zur Adoption Theory und in einen zwei-

ten systematischen, auf Vollständigkeit bedachten Teil zu den Voraussetzungen einzuteilen, die Komplexität. Im Hinblick auf die Experteninterviews ist es zum einen die begrenzte Anzahl an Experten, die nur Indizien liefern kann, zum zweiten der Ansatz, zunächst überhaupt erstmal die Existenz bereichsspezifischer und unternehmensgrößenabhängige Anwendungsvoraussetzungen für KI zu identifizieren. Dadurch bleibt die Frage offen, welche Anwendungsvoraussetzungen für welche Bereiche berücksichtigt werden müssen und wie in der praktischen Anwendung damit umzugehen ist. Die Schwierigkeiten bei der Anwendung von Künstlicher Intelligenz haben sich auch im weiteren Verlauf der beiden Anwendungsfälle gezeigt. Hier mussten nach dem GoLive noch Nachjustierungen sowohl hinsichtlich der Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse als auch im Hinblick auf die Erweiterung der Datenbasis geschaffen werden. (Schkarin und Dobhan, 2022; Ziegler et al., 2021)

Als *Zusammenfassung* lässt sich trotz dieser Limitationen allerdings festhalten, dass sowohl die Ergebnisse zur den KI-Voraussetzungen als auch die Ergebnisse der Machine-Learning-Anwendungsfälle Wege aufzeigen, wie die Künstliche Intelligenz auch in KMUs zur Datenpflege im Rahmen der digitalen Transformation von produktionsnahen Prozessen beitragen kann. Weitere Forschungsarbeiten sollten auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen. Das bedeutet, es ist zu untersuchen, wie anwendungsfallspezifische Voraussetzungen identifiziert und gehandhabt werden können und Beispiele für derartige Voraussetzungen über mehrere Unternehmen hinweg gegeben werden. Daneben sollte die KI-basierte Pflege von Stammdaten auf weitere Bereiche ausgeweitet werden und damit einhergehend auch die Stammdatenqualität bestimmt werden. Neben der KI-basierten Stammdatenpflege dürfte auch eine KI-basierte Belegerkennung zur Erhöhung des Automatisierungsgrades bis hin zu der Entwicklung eines autonomen ERP-Systems in ERP-basierten Prozessen beitragen.

3 Reihenfolgeplanung

Nach der Datenpflege stellt sich die Frage nach der Planung von Produktionsaufträgen. KMUs unterliegen grundsätzlich einer Vielzahl von Herausforderungen, zu denen auch die Anpassungsfähigkeit der Produktion auf äußere Veränderungen zählt (Kummer et al., 2008). Die Anpassungsfähigkeit ist hierbei als die Flexibilität zur Anpassung selbst und die Zeit, welche bis zur Anpassung an die neuen Bedingungen verstreicht, zu verstehen. Rein praktisch bedeutet dies, wie gut eine Firma auf äußere Einflüsse reagieren kann und welche Zeit bis zum Inkrafttreten dieser Änderungen verstreicht. Verändern sich beispielsweise Auftragslosgrößen auf Grund von Umweltveränderungen, müssen gerade KMUs in der Lage sein, schnell darauf zu reagieren. So entstehen bei kleinen Losgrößen zusätzliche Rüstaufwände und die Gesamtkomplexität im System steigt an. Wurden zuvor mannlos über Nacht große Lose produziert, erfordern kleine Lose nun in allen Schichten qualifiziertes Personal zum Rüsten. Diese Änderungen beeinflussen direkt die Deckungsbeiträge und die Kosten.

Eine Möglichkeit für KMUs, diese Anforderungen in ihren Produktionsprogrammen zu berücksichtigen, ist eine Mischform aus auftragsbezogener (make-to-order) und lagerbezogener (make-to-stock) Produktion (Rocha et al., 2015). Darüber hinaus existiert noch eine ganze Bandbreite an weiteren Methoden bzw. Lösungsansätzen, um die Flexibilitätsanforderungen in der Produktion zu adressieren. Hierbei kommen mathematische Optimierungsverfahren und -algorithmen, Prioritätsregeln und Optimierungen mit künstlicher Intelligenz zum Einsatz. Was sich für viele dieser Vorgehensweisen jedoch allgemein ableiten lässt, ist der hohe Bedarf an Produktionsdaten und häufig ein Mangel an Praxisauglichkeit oder an Optimalität (Kurbel, 2016). Während Großunternehmen oft noch in der Lage sind, die entsprechenden Daten zu pflegen und Experten dafür einzustellen, finden die Methoden in KMUs oft keine Anwendung und die Produktionssteuerung wird mit einfacher Terminplanung oder dem intuitiven Gespür der Mitarbeiter flexibel gehalten. Eine Umfrage unter den vier mittelständischen Maschinenbetreibern im Forschungsprojekt OBERA unterstreicht diese Annahme und liefert genauere Informationen über die Anforderungen an die Produktionsprogrammplanung aus mittelständischer Sicht. Abbildung 6 zeigt, dass die Verfügbarkeit und die Integration der Planung in die bestehende Systemlandschaft, neben der Nachvollziehbarkeit, sowie der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, von allen Praxispartnern als relevant eingestuft wurden. Darüber hinaus herrscht Einigkeit darüber, dass sich die Planung schnell aktualisieren lassen soll und von der aktuellen Belegschaft bedienbar sein muss.

Anforderung	Nennung
Verfügbarkeit der Planung	100%
Integrierte Planung	100%
Nachvollziehbarkeit	100%
Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	100%
Schnelle Aktualisierung	75%
Keine Spezialisten mit Kompetenz in Produktion und Logistik	75%

Tabelle 1: Anforderungen der OBERA-KMUs an die Reihenfolgeplanung

Entsprechend stellt sich zunächst die Frage, inwiefern die bereits existierenden Planungsmodelle für KMUs geeignet sind und – zur Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen auf den Produktionsplan – welche Parameter für die Produktionsplanung von Bedeutung sind. Sind die Parameter bekannt, können die bestehenden Modelle vor dem Hintergrund der Anforderungen der Projektpartner evaluiert und falls notwendig angepasst werden.

Werden die Anforderungen der Projektpartner mit der Flexibilität, die eine MTO-/MTS-Produktion bieten kann, verknüpft, stellt sich also nachfolgende Frage:

Welche Parameter sind bei Methoden zur Produktionsplanung in einer flexiblen MTO-/MTS-Umgebung von Bedeutung und wie können mittelständische Unternehmen diese Parameter im Rahmen der digitalen Transformation der Produktionsplanung berücksichtigen?

Um auf der bisherigen Forschung aufzubauen, wurden im Zuge einer Literaturrecherche sieben aktuelle Forschungsbeiträge identifiziert, die sich mit der hybriden (make-to-order und make-to-stock) Produktionsplanung befassen (Beemsterboer et al., 2016; Chang et al., 2010; Hadj et al., 2009; Renna, 2016; Soman et al., 2006; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2013). Auf diese sieben Beiträge wurde eine strukturierte Inhaltsanalyse als *Methodik* angewendet, mit deren Hilfe die verwendeten Parameter der Produktionsplanung identifiziert werden. Bei der angewendeten Inhaltsanalyse handelt es sich um das sogenannte Vertiefungsmodell. Hierbei werden im ersten Schritt mögliche signifikante Parameter quantitativ bestimmt und im nächsten Schritt qualitativ ausgewertet (Hug et al., 2010). Eine zentrale Bedeutung kommt hierbei der Frequenzanalyse zu. Mit Hilfe der Frequenzanalyse wird die Wichtigkeit einzelner Parameter bestimmt; hierbei gilt, je häufiger ein Begriff im Text zu finden ist, desto wichtiger ist er (Weber, 2015). Die Ergebnisse der Frequenzanalyse werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen, codiert und letztlich inhaltlich untersucht (Weber, 2015). Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse fließen dann wiederum in eine prioritätsbasierte Heuristik ein. Im Zuge dessen wurde das Produktionsplanungsproblem auf ein Reihenfolgeplanungsproblem, das für die relevanten Projektpartner von hoher Bedeutung war, reduziert. Prioritätsbasierte Heuristiken sind ein erprobtes Mittel, um Komplexität aus Terminierungsproblemen zu eliminieren (Heger, 2014). Diese Komplexitätsreduktion adressiert die mitarbeiterbezogenen Anforderungspunkte Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit, die in direkter Verbindung damit steht, dass die kleinen und mittelständischen Unternehmen keine Spezialisten einstellen können. Weiterhin hilft die reduzierte Komplexität, eine einfache Integrierung in Fremdsysteme zu ermöglichen. Beispielhaft sei hier der zuständige Projektpartner genannt, der die neuen Regeln in verhältnismäßig kurzer Zeit in die bestehende SAP-Installation implementieren und in Betrieb nehmen konnte. Ein weiteres markantes Merkmal von Heuristiken ist die Tatsache, dass der Verzicht auf die optimale Lösung dazu führt, dass kurzfristige Aktualisierungen möglich sind. Dies adressiert direkt die schnelle Aktualisierung der Planung und indirekt die Verfügbarkeit in der Produktionssteuerung (Jaehn und Pesch, 2014).

Als *Ergebnis* der Frequenzanalyse konnten 8340 Wortkombinationen identifiziert werden, von denen 76 den Kriterien der Plausibilitätsprüfung entsprochen haben. Durch die strukturierte Inhaltsanalyse auf Basis der gewählten Codierung wurden 4

Parameter als häufigste Parameter identifiziert. Es handelt sich hierbei um die Parameter:

- Höhe des Lagerbestandes
- Durchlaufzeit der Produkte
- Nachfrage nach den verschiedenen Produkttypen pro Periode
- Kapazität des Produktionssystems und dessen Auslastung

Diese Parameter wurden dann in eine prioritätsbasierte Heuristik überführt, die es in der Praxis erlaubt (unter den Voraussetzungen der Praxispartner) den Auftragsbestand einer Maschinengruppe von 14 Maschinen innerhalb von 2 Minuten für eine ganze Woche neu zu terminieren. Die Praxispartner nutzen dieses Grundmodell, um die vier identifizierten Planungsparameter zu adressieren. Ergänzend hierzu haben die Praxispartner individuell ihre Formeln um weitere spezielle Parameter ergänzt. Mit der Formel werden – analog zu anderen prioritätsbasierten Verfahren – Gesamtprioritäten gebildet, die dazu genutzt werden, iterativ die Maschinengruppen zu befüllen. Die Praxispartner haben die Möglichkeit, die Parameter hierbei einzeln zu gewichten. Dabei werden die Durchlaufzeit direkt, die periodische Nachfrage gemeinsam mit den Lagerbeständen in der bekannten Kennzahl Lagerumschlagshäufigkeit, sowie die Kapazität des Produktionssystems indirekt über die Schlupfzeit abgebildet. Die Schlupfzeit ist hierbei die Zeit, welche verbleibt, wenn die Bearbeitungszeit zum heutigen Datum vom Liefertermin subtrahiert wird. Positive Schlupfzeiten zeigen somit einen vorhandenen Puffer an, während negative Schlupfzeiten eine Verspätung ausweisen. Die Einzelprioritäten g_1 bis g_j müssen in Summe immer 1 ergeben, um die Vergleichbarkeit sicherzustellen. Die Prioritätswerte g_j bestimmen die Nutzer durch Simulation und ein entsprechendes Monitoring. Die Gesamtpriorität eines Auftrags i lässt sich dabei wie folgt berechnen:

$$G_i = (g_1 \cdot \text{Durchlaufzeit} + g_2 \cdot \text{Schlupfzeit} + g_3 \cdot \text{Lagerumschlagshäufigkeit} + \dots + g_j \cdot \text{Parameter } j)$$

Die Untersuchung unterliegt einigen *Limitationen*. So wurden die Anforderungen der Firmen nur innerhalb des Projektes OBERA bestimmt. Die Stichprobe mit fünf beteiligten Firmen ist nicht repräsentativ und muss zukünftig unabhängig vom Projekt in einer breiten Studie untersucht werden. Weiterhin befinden sich alle Praxispartner innerhalb der Branche der metallverarbeitenden mittelständischen Unternehmen, es besteht somit keine Allgemeingültigkeit. Als Grundlage der Formel dienen die vier in der Literatur am häufigsten genannten Parameter. Allerdings wurden hier sieben für MTO/MTS-Produktionen besonders relevante, wissenschaftliche Artikel untersucht. Die Übertragbarkeit auf andere Fertigungsarten ist zumindest fraglich.

Zusammenfassend lässt sich trotz der genannten Limitationen sagen, dass die Auswertungen zeigen, dass die Formel und die damit verbundene Digitalisierung der bislang manuellen Produktionsplanung von erheblichem Nutzen für den Praxispartner

sind. Es ermöglicht den für die Planung verantwortlichen Personen eine zielgerichtete und graduelle Konfiguration der Reihenfolgeplanung als Teil der Produktionsplanung. Dadurch kann insbesondere das Verhältnis aus Termintreue und Rüstzeit ausbalanciert werden. Gleichzeitig müssen diese Ergebnisse in einer umfangreichen Untersuchung, in der das aktuelle Planungsvorgehen mit der auf diesem Ansatz basierten Planung verglichen wird, bestätigt werden. Parallel dazu müssen insbesondere die bislang projektbezogenen Ergebnisse zu den Anforderungen mittelständischer Unternehmen mit Hilfe einer deutlich größeren Stichprobe und einem weiter gefassten Branchenfokus verallgemeinert werden. Unabhängig davon zeigt der Use Case beispielhaft auf, wie die Reihenfolgeplanung als Teilgebiet der Produktionsplanung KMU-gerecht digital transformiert werden kann.

4 Produktionsdatenerfassung

Nach der digitalen Transformation der Stammdatenpflege und der Planung wird in diesem Abschnitt beispielhaft auf die digitale Transformation in der Produktionsdatenerfassung eingegangen. Diese offenbart häufig eine unrealistische Planung (Lux et al., 2007). Dennoch ist die Planung unverzichtbar, um die Ungewissheit greifbar zu machen und somit die Steuerung des Unternehmens zu ermöglichen (Fuchs et al., 2015). Die Abweichungsanalyse zwischen Planung und tatsächlichen Produktionsdaten hilft, die Soll-Ist-Differenzen zu analysieren und zählt zu einer der wichtigsten Formen des organisatorischen Feedbacks (Luckett et al., 1991). Die Abweichungsanalyse kann mit drei Prozessschritten beschrieben werden. Im ersten Schritt werden die Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Situation erfasst und bewertet. Im zweiten Schritt werden die Gründe für die Abweichungen gesucht und im dritten Schritt werden die Problemursachen identifiziert (Horngren et al., 1991). Dabei muss das vorrangige Ziel die Eliminierung systematischer, immer wiederkehrender Abweichungen sein. In diesem Kontext stellt sich die Frage: Welche systematischen Fehler in der Produktionsdatenerfassung existieren und wie können diese im Rahmen der digitalen Transformation vermieden werden?

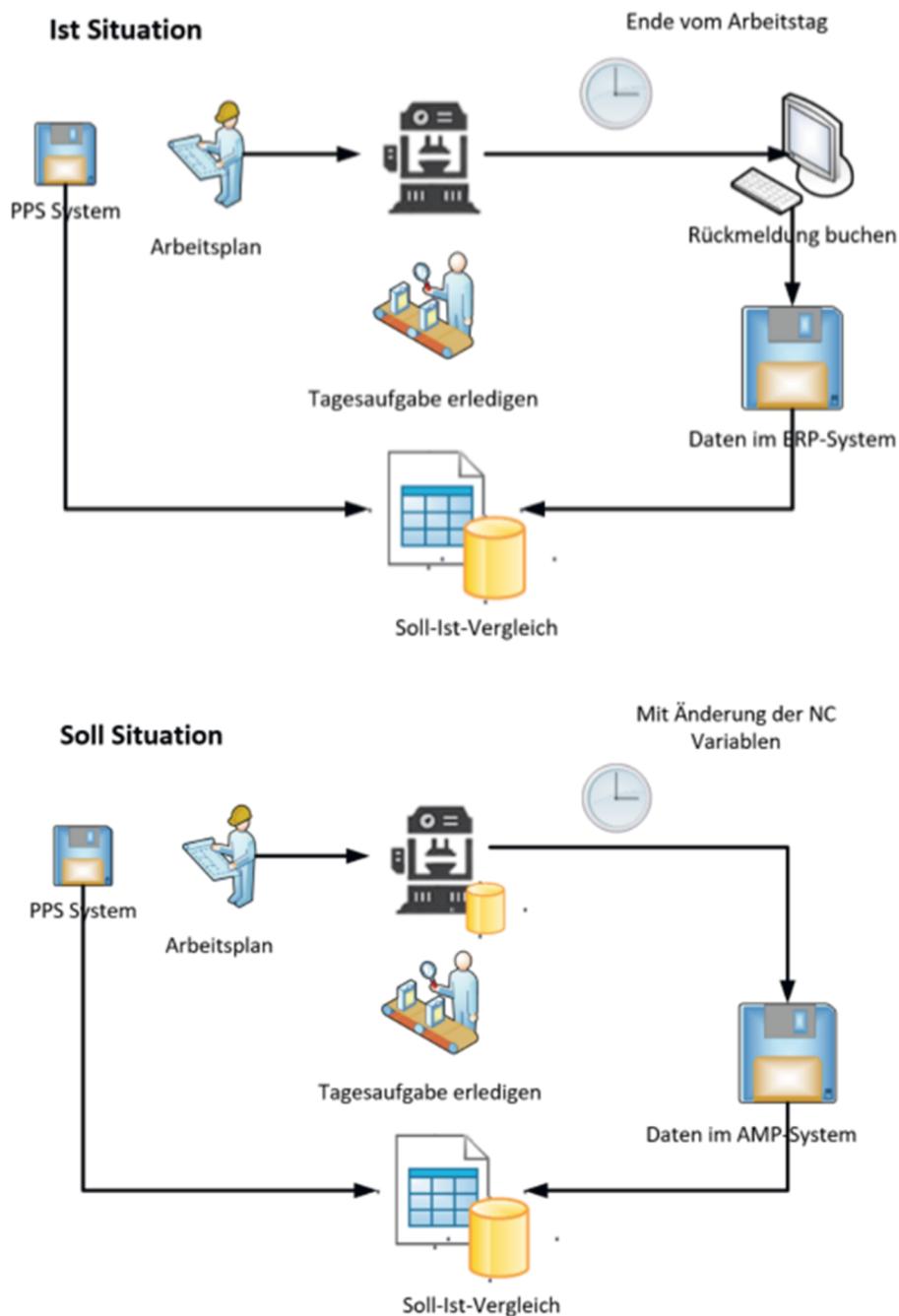


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Erzeugung von Daten für eine Abweichungsanalyse

Im Projekt OBERA wurde exemplarisch für die Problemstellung eine Abweichungsanalyse als *Methodik* bei einem Lohnfertiger angewendet. Dazu wurde für einen Zeitraum von 3 Monaten die NC basierte Software Analyse My Performance (AMP) des Projektpartners Siemens auf zwei Werkzeugmaschinen installiert. Parallel zur automatischen Erfassung der Ist-Zeiten wurden auch die händischen Ist-Zeiten erfasst. Dies erlaubt eine Auswertung der systematischen Fehler bei der manuellen Erfassung. Die Abweichungsanalyse erfolgt in drei Stufen. Auf der ersten Stufe werden die manuellen mit den automatischen Buchungen verglichen. Auf der zweiten Stufe

erfolgt ein Vergleich der manuellen Buchungen mit den Soll-Daten und schließlich auf dritter Ebene noch ein Vergleich der automatischen Buchungen mit den Soll-Daten. Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau. Zur Auswertung der Daten wurden die beiden Abweichungsmaße MAPE (Mean Absolut Percentage Error) und RMSE (Root Mean Square Error) herangezogen. Der MAPE gibt hierbei die durchschnittliche absolute Abweichung in Prozent an. Der MAPE vereint die Eigenschaften der Dimensionslosigkeit und der eindeutigen Interpretierbarkeit (Barrot, 2009). Ergänzend hierzu wird der RMSE bestimmt. Bei der Auswahl der Abweichungsmaße wurde ein besonderes Augenmerk auf die Sensitivität und die Beziehung zu einer möglichen Entscheidung gelegt sowie wichtige, bekannte und leicht interpretierbare Kennzahlen zu finden, um eine möglichst einfache Verständlichkeit zu erzielen. Die Schwäche der RMSE hinsichtlich der Verlässlichkeit wird durch den Einsatz des MAPE ausgeglichen (Armstrong et al., 1992).

Die initiale Auswertung der Produktionsdaten des Praxispartners auf zwei Werkzeugmaschinen für den Zeitraum von drei Monaten liefert bereits erste Erkenntnisse. Als initiales *Ergebnis* ist festzustellen, dass die Summe der manuellen Buchungsdaten mit der Summe der automatischen Buchungsdaten auf 1 % genau übereinstimmen. Werden jedoch die einzelnen Datensätze betrachtet, weisen diese deutliche Unterschiede im höheren Prozentbereich auf. Diese Anomalie scheint in nachfolgendem Zusammenhang begründet: Die Abweichungen der einzelnen Datensätze (manuelle mit automatischer Buchung) entsprechen mit ihrer Richtung jeweils dem Fehler zwischen Soll-Daten und automatischen Ist-Rückmeldedaten. Am Beispiel erklärt, bedeutet dies, wenn 5 h im Soll geplant waren und die automatischen Ist-Buchungen nur 4 h aufweisen, liegt der manuelle Buchungssatz bei 4,5 h. Somit gleicht die manuelle Buchung den Unterschied zwischen Soll- und Ist-Daten aus. Eine Ursache davon könnte sein, dass die Mitarbeiter Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Daten begründen müssen. Den Mitarbeitern liegt zudem die Soll-Planung vor. Vermutlich dieser Umstand motiviert Mitarbeiter dazu, den Fehler aus Datensicht zu kompensieren. In der weiteren Folge führt dies bei einer höheren Ist-Zeit zu geringeren Zeitrückmeldungen und bei kürzeren Ist-Zeiten zum Aufbuchen dieser Fehlzeiten. Dadurch kann eine ausführliche Begründung für die Abweichungen vermieden werden. Gleichzeitig fanden dadurch allerdings Verzerrungen hinsichtlich der Bearbeitungszeiten und der Kalkulationen und zukünftigen Planung für die einzelnen Aufträge statt. Um diesen systematischen Fehler zu vermeiden, soll die Produktionsdatenerfassung zukünftig bei möglichst vielen Maschinen – soweit möglich – automatisiert erfolgen. In diesem Fall bedeutet Automatisierung, wie bereits zuvor beschrieben, das Auslesen von Maschinendaten via Manufacturing Execution System (MES) und deren automatisierte Weiterleitung an das ERP-System. Neben den infrastrukturellen Herausforderungen (Portfreigabe, Netzwerkrechte, etc.) sind dabei insbeson-

dere die unterschiedlichen Datenstrukturen und die Datenqualität der Systeme (Maschine, MES, ERP-System) zu beachten. Für die vorliegende Auswertung wurden die verschiedenen Daten über eine entsprechende Datentransformation einmalig synchronisiert. Um dies im laufenden Betrieb zu erreichen, sind weitere organisatorische und informationstechnische Maßnahmen zu treffen.

Diese Tatsache beinhaltet bereits eine von mehreren *Limitationen* dieses Use Cases. So wurden diese Abweichungen im Zuge einer Einmalanalyse identifiziert. Die Herausforderungen und Anpassungen für eine dauerhafte Abweichungsanalyse bzw. eine vollständige Umstellung auf automatisierte Rückmeldung sind für diesen Praxispartner noch weiter im Detail zu analysieren. Insbesondere müssen dabei die Datenstrukturen der beteiligten Systeme angeglichen oder zumindest im Zuge eines Data Mapping vor allem zwischen ERP-Systeme und dem maschinennahen MES systematisch miteinander verbunden werden. Zudem können die Ergebnisse hinsichtlich der Abweichungen auf keinen Fall generalisiert werden, da nur ein Datensatz für zwei Werkzeugmaschinen ausgewertet werden konnte. So besteht die Möglichkeit, dass es sich um ein spezielles Phänomen handelt, das nur bei der untersuchten Firma auftritt. Weiterhin können auf Grund der Planung, der Art der manuellen Rückmeldungen, der organisatorischen Abläufe, bei anderen Firmen vollständig andere Ergebnisse entstehen.

Nichtsdestotrotz lässt sich als *Zusammenfassung* auch auf Grund des langen Versuchszeitraums von drei Monaten die praktische Erkenntnis ziehen, dass im Soll-Ist-Vergleich der Maschinendaten und manuellen Rückmeldungen Optimierungspotential vorhanden ist für KMUs. Deshalb müssen in einer weiteren Studie zusätzliche Daten anderer Unternehmen auf ähnliche systematische Abweichungen hin untersucht werden. Lassen sich diese Erkenntnisse verallgemeinern, erlauben sie Rückschlüsse auf die Abweichungen manueller Rückmeldungen und das Verbesserungspotenzial durch automatisierte Rückmeldungen im Rahmen einer IoT-Architektur. Gleichzeitig ist näher zu untersuchen, welche Schritte die Maschinenanbindung zur regelmäßigen Abweichungsanalyse bedarf.

5 Werkzeugverwaltung

Neben der Stammdatenpflege, der Reihenfolgeplanung als Teil der Produktionsplanung und der Produktionsdatenerfassung stellt die Werkzeugverwaltung zur Planung und Verwaltung von Werkzeugbeständen den letzten betrachteten produktionsnahen Prozess in KMUs dar. Die Werkzeugkosten gerade in zerspanend fertigen Unternehmen liegen bei einem einstelligen Prozentbereich der Gesamtkosten (Vogt, 2007). Es lohnt sich deshalb scheinbar kaum, diese Kosten zu optimieren. Tatsächlich dürfte aber ein deutlich höheres Einsparpotential bei den Werkzeugen durch Kosten, die den Werkzeugen nicht direkt zugeordnet sind, bestehen. Es handelt sich hierbei um Kosten aus ineffektiven Rüstvorgängen, Transportkosten, sowie Ressourcenaufwand für

die Bereitstellung der Werkzeuge (Vogt, 2007). Außerdem machen „die zunehmende Produktvielfalt und der damit einhergehende Anstieg von Rüstvorgängen [...] den Einsatz von Werkzeugverwaltungssystemen in der spanenden Fertigung seit einigen Jahren unabdingbar“ (Zetterer Präzision GmbH, 2016). Aus diesem Anforderungsprofil leitet sich die Herausforderung ab, die bisherigen Prozesse deutlich zu überdenken und im Rahmen der Digitalisierung zu berücksichtigen. Im Projekt OBERA wurden über die Projektpartner hinweg die Anforderungen für das Werkzeugmanagement im mittelständischen, zerspanend fertigenden Unternehmensumfeld untersucht, mit dem Ziel gemeinsame Anforderungen zu finden und so einen Standardanforderungskatalog für KMUs im zerspanend fertigenden Bereich zu finden. Daraus leitet sich folgende Forschungsfrage ab:

Welche Anforderungen existieren bei zerspanend fertigenden KMUs hinsichtlich der digitalen Transformation der Werkzeugverwaltung mit Hilfe einer Werkzeugmanagementsoftware⁴³?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein leitfadengestütztes Experteninterview als *Methodik* bei den beteiligten Projektpartnern eingesetzt. Bei der Auswahl der Experten werden sowohl die operative wie auch die strategische Organisationsebene der Unternehmen berücksichtigt. Für die strategische Perspektive wurden Personen ausgewählt, die “im weitesten Sinne verantwortlich” sind (Helfferich, 2019; Kaiser, 2021), während für die operative Perspektive Personen ausgewählt wurden, die über “relevante Informationen” verfügen (Gläser und Laudel, 2009). Der Leitfaden des Interviews besteht aus vier Themen-Kernblöcken, gefolgt von einem Feedback und einer Danksagung, dies liegt im Zielkorridor von drei bis maximal acht Themenblöcken (Bogner et al., 2014). Tabelle 2 zeigt die Kernthemen- und Subthemenblöcke sowie den Inhalt und Zweck dieser Blöcke. Die Angabe Typ verifiziert, ob es sich um eine strategische oder operative Frage handelt. Um das Interview effizient zu gestalten, wurden die Experten nur zu ihren Kernthemenbereichen befragt.

⁴³ Im Use Case wird auch die Abkürzung TMS verwendet, diese steht für die englische Bezeichnung Tool Management System, was der deutschen Werkzeugmanagementsoftware entspricht.

Nr.	Thema		Inhalt und Zweck	Typ
0	Einstieg	-	Vorstellung, Einführung und Organisation	s/o
1	TMS Allgemeine Fragen	-	Allgemeine Fragen zum Experten und TMS	s/o
2	Aktuelle Elemente der Fertigung	Werkzeuge	Einblicke in die aktuelle Prozesskette und Überblick über verschiedene Elemente der Fertigung	o
		CNC-Maschinen		
		Programmierung		
		ERP/PPS		
3	TMS Anforderungen	Systemarchitektur	Wunschsystemarchitektur des Experten	s/o
		Aufbau/Benutzung	Spezifische Anforderungen an ein TMS	
4	Kosten	-	geplante Anschaffungs- und Unterhaltungskosten zum TMS	s
5	Feedback	-	Feedback zum Interview und mögliche Ergänzung zum Thema	s/o
6	Abschluss	-	Danksagung	s/o

s: strategisch, o: operativ

Tabelle 2: Themenblöcke des Interviews einschließlich adressierter Expertengruppe

In Summe wurden sieben Experten per Zoom Meeting interviewt. Die Experten setzten sich hierbei aus vier operativen Experten (3x Fertigungsleiter, 1x Facharbeiter) und drei strategischen Experten (3x Geschäftsführung) zusammen. Im Nachgang zu den Interviews wurde eine Transkription der Interviews durchgeführt, um eine Inhaltsanalyse mit einem Paarweisen Vergleich nach Mayring durchzuführen (Mayring, 2019).

Das erste *Ergebnis* zeigt die **Funktionen** mit dem höchsten Erwartungswert bezogen auf die Verbesserungspotentiale durch den Einsatz einer Werkzeugmanagementsoftware. Die Funktionen wurden mit Hilfe des Paarweisen Vergleichs in nachfolgende Reihenfolge gebracht:

1. Gebündelte Informationen zu Werkzeugen (Definition & Lagerort)
2. Erstellung Einstellblatt
3. Gebündelte Information zu NC-Programmen
4. Bestand (Werkzeug)
5. Indexierung der NC-Programme

Als wichtigste Funktion wird die Informationsfunktion der Werkzeugverwaltung wahrgenommen, die sowohl im Hinblick auf die Werkzeugdaten als auch hinsichtlich des Einstellblattes und der NC-Programme die Informationszeit der Bediener reduziert. Darüber hinaus wird die Transparenz hinsichtlich der Bestände und die Ordnung von NC-Programmen als Nutzen erwähnt.

Der Paarweise Vergleich bringt zusätzlich die **Schnittstellen** in nachfolgende Reihenfolge hinsichtlich ihrer Wichtigkeit:

1. CAM (Computer-Aided Manufacturing)
2. PPS (Produktionsplanungssoftware)
3. Werkzeugmaschinen
4. ERP (Enterprise Resource Planning)

Analog zu den Funktionen ist zunächst die eher werkzeug- und produktorientierte CAM-Schnittstelle zum Austausch von Informationen, welches Werkzeug für welchen Produktionsprozess verwendet wird, von Bedeutung. Erst dann folgen auf Platz 2 und 4 Schnittstellen zu Planungssystemen, die zum Beispiel auch die Verfügbarkeit von Werkzeugen berücksichtigen. Die Anbindung an die Werkzeugmaschine direkt wird an dritter Stelle genannt.

Weiterhin zeigt das Ergebnis der Experteninterviews, dass ein modularer Aufbau der Software wichtiger ist als ein monolithisches System oder eine Komplettlösung und dass bei der Benutzeroberfläche eine schlichte Aufmachung durch bildhafte Darstellung unter Verwendung von Piktogrammen am besten geeignet ist. Die Implementierungskosten hängen gemäß der Studie maßgeblich von drei Größen ab: Stundenlohn der Mitarbeiter, Anzahl der Werkzeuge, sowie die Anlagedauer der Werkzeuge im System pro Stück. Da sowohl der Stundenlohn wie auch die Anzahl der Werkzeuge als fixe Kenngröße angesehen werden darf, kommt der Anlagezeit pro Werkzeuge eine zentrale Bedeutung zu. So lässt sich eindeutig sagen, je mehr Werkzeuge in einem Unternehmen vorhanden sind, desto wichtiger ist es, die Anlagezeit pro Werkzeug so gering wie möglich zu halten. Im Rahmen der Interviews wurde dieses Problem von zwei Experten als zentraler Grund für das Scheitern einer zurückliegenden Einführung aufgeführt. Ergänzend ist zu erwähnen, dass die Experten darin übereinstimmen, dass es nicht zielführend ist, schlecht ausgebildete Ressourcen mit der Anlage der Werkzeuge zu betrauen, um die Kosten pro Stunde zu reduzieren. Dieses Vorgehen führt dazu, dass im Nachgang Qualitätsmängel auftreten.

Als *Limitation* ist festzuhalten, dass die Ergebnisse auf Grund der geringen Stichprobenanzahl von $n=7$ nicht als repräsentativ für die Branche angesehen werden dürfen, zumal weiterhin nur männliche, deutschsprachige Experten befragt wurden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich für die beiden Perspektiven - operativ und strategisch - bereits Tendenzen in den Ergebnissen identifizieren lassen. In einer breit angelegten Umfrage müssen zukünftig die Ergebnisse der Interviews überprüft und über eine repräsentative Stichprobe verifiziert werden. Darauf aufbauend kann dann mit Hilfe einer Fit-Gap-Analyse untersucht werden, welche am Markt verfügbaren Systeme die Anforderungen der zerspanend fertigenden KMUs in welchem Ausmaß erfüllen und somit zur digitalen Transformation der Werkzeugverwaltung beitragen.

6 Entscheidungen in IoT-Architekturen

Die Machine-Learning-basierte Stammdatenpflege und die Produktionsdatenerfassung erfordern direkt Entscheidungen zur eingangs beschriebenen IoT-Architektur, sind doch zumindest Middleware, Application und Business Layer betroffen. Aber auch bei der Werkzeugverwaltung und der Terminplanung werden Prozesse auf der Business Layer und Software auf dem Application Layer modifiziert. Daraus lässt sich ableiten, dass digitale Transformation Entscheidungen hinsichtlich der IoT-Architekturen erfordert. Ein wesentlicher Bestandteil davon sind die Protokolle, die verschiedene Applikationen oder Ebenen miteinander vernetzen. Mit dem Internet der Dinge steigt die Vernetzung innerhalb der Unternehmen und unternehmensübergreifend. Damit gewinnen die Protokolle an Bedeutung. Bereits in der Vergangenheit mussten Unternehmen Entscheidungen zur Systemvernetzung treffen. Weit verbreitet ist zum Beispiel Electronic Data Interchange (EDI). Dabei tauschen Unternehmen Belege elektronisch aus. Seit den 1990er Jahren werden die EDI-Protokolle wie zum Beispiel EDIFACT vor allem in der Automobilbranche, aber auch in anderen Branchen genutzt, um die ERP-Systeme von Unternehmen miteinander zu vernetzen (Chituc, 2017; Anvari, 1992). Weil an der Vernetzung allerdings vor allem KMUs, deren Prozesse weniger digitalisiert sind, nicht partizipieren konnten, wurden neue Möglichkeiten wie WebEdi geschaffen (Beck et al., 2003). Auf Basis der Erfahrungen zu EDI-Entscheidungen in Unternehmen allgemein und KMUs im Speziellen, lassen sich auch Rückschlüsse auf heutige Protokollentscheidungen schließen. Dabei stellt sich die Frage, wie im Zuge der aktuell häufigen Vernetzung von Anwendungssystemen entschieden wird und welche Entscheidungsparameter dabei eine Rolle spielen. Ziel ist es, eine Entscheidung zu treffen, die langfristig im Unternehmen auf Akzeptanz stößt, weil sie zum langfristigen Unternehmenserfolg beiträgt. Entsprechend stellt sich im Hinblick auf die vergangenen Entscheidungen zu EDI die Frage: Wie hoch ist die Akzeptanz von EDI in KMUs im Zuge der digitalen Vernetzung mit anderen Unternehmen, und was sind Gründe für einen möglichen Mangel an Akzeptanz?

Daraus können dann Schlüsse gezogen werden, worauf bei Protokollentscheidungen zu achten ist. Diese Erkenntnisse können dann mit dem Vorgehen hinsichtlich aktueller Entscheidungen zu Protokollen in IoT-Architekturen verglichen werden. Dazu ist folgende Frage zu beantworten:

Wie werden Entscheidungen bei der Vernetzung von Softwareapplikationen im Kontext des IoT getroffen?

Die Softwareapplikationen beziehen sich dabei auf die Application Layer einer IoT-Architektur, auch um die Vergleichbarkeit mit EDI zu gewährleisten.

Zur Beantwortung der Fragen wurden als *Methoden* die systematische Literaturanalyse und Experteninterviews eingesetzt (Balzert und Dobhan, 2021; Ott und Dobhan,

2020; Webster und Watson, 2002). Die systematische Literaturanalyse zu WebEdi basierte auf den Suchergebnissen in den Datenbanken Google Scholar, Ebsco Host, ScienceDirect und Inderscience. Auf diese Weise wurden 60 relevante Artikel identifiziert und unter anderem hinsichtlich der Unternehmensgröße, der Technik und der Akzeptanz, sowie der Methodik kategorisiert (Ott und Dobhan, 2020). Die systematische Literaturanalyse zu den Protokollen bezog sich auf IEEE-, Elsevier- und Springer-Veröffentlichungen, die mit den relevanten Suchwörtern mit Hilfe der Suchmaschinen Google Scholar und ScienceDirect ab dem Veröffentlichungsjahr 2015 gefunden wurden (Balzert und Dobhan, 2021). Dieses Vorgehen resultierte in insgesamt 49 Veröffentlichungen, die unter Anwendung der Dimensionen Protokollarten, -eigenschaften, und -auswahlkriterien, sowie unter anderen den Dimensionen Entscheidungsparameter und -anforderungen an Protokolle eingeordnet wurden. Die Experteninterviews wurden als semi-strukturierte Interviews mit 7 Experten, die Erfahrungen mit der Implementierung von IoT-Architekturen entweder aus Anwender- oder Betreiberperspektive besitzen, geführt. Die Auswertung erfolgte dann mit Hilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse. (Bogner et al., 2014, S. 24–25; Mayring, 2004)

Die *Ergebnisse* in der EDI-Literatur zeigen vor allem folgende Erkenntnisse (Ott und Dobhan, 2020): Ein Drittel der 60 analysierten Quellen beziehen sich auf die Akzeptanz, wobei keine Quelle eine hohe Akzeptanz von EDI in KMUs ermitteln konnte. Stattdessen wird in 18 Quellen darauf verwiesen, dass die Akzeptanz von EDI mäßig bis gering ist (jeweils 9 Quellen). Elf Quellen davon stellen dies explizit für KMUs fest, wobei sich nur eine Quelle explizit auf Web-EDI bezieht. Als Gründe für die geringe Akzeptanz von EDI in KMUs sehen Chwelos et al. (2001) den Druck größerer Partner, der zur Einführung von EDI in KMUs führt, und die nur partielle Nutzung, die die Potenziale von EDI nicht vollständig ausschöpft (Tankosic et al., 2017). Als Hauptursache identifizieren Ott und Dobhan (2020) allerdings die wirtschaftlichen Gründe. Für wenig digitalisierte KMUs ist es kostengünstiger, Belege per E-Mail oder Fax zu versenden, als manuell in eine Web-EDI-Plattform einzutragen oder die bestehenden Systeme und Prozesse, für nur wenige Belege, EDI-fähig anzupassen. (Ott und Dobhan, 2020)

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Protokollen der IoT-Architektur zeichnen ein weniger klares Bild. Sie zeigen, dass Entscheidungen bezüglich Protokollen bei der Vernetzung von Anwendungssystemen bislang nur wenig untersucht wurden. Wenn überhaupt sind in der Literatur nur die wichtigsten Protokolle aus technischer oder Anwendungssicht miteinander verglichen worden (Elhadi et al., 2018; Sethi und Sarangi, 2017; Al-Fuqaha et al., 2015). Die Relevanz möglicher Entscheidungsparameter im Hinblick auf eine erfolgreiche Entscheidung und damit Akzeptanz der Protokolle wurde bislang nicht betrachtet.

Die dadurch motivierte Expertenstudie in Balzert und Dobhan (2021) zeigt vor allem den Forschungsbedarf auf, der in diesem Kontext noch existiert. Durchgängige Entscheidungsregeln bei der Protokollauswahl existieren bei keinem der Experten. Lediglich ein Experte gibt an, dass er sich von verschiedenen Parametern wie Anforderungserfüllung, technische Umsetzbarkeit, Marktposition oder Kosten des Protokolls bewusst leiten lässt. Zwei weitere Experten betonen die Umsetzbarkeit als Hauptentscheidungsparameter. Weitere Entscheidungsparameter ergeben sich aus der Literaturanalyse und an anderen Stellen der Experteninterviews. Auf einen systematischen Entscheidungsprozess beziehen sich aber weder Experten noch Literatur. Gleichwohl bestätigt die Studie, dass Protokolle diversen internen Anforderungen und externen Anforderungen gerecht werden müssen. Diese Anforderungen sind technischer (z. B. Zykluszeit, Datendurchsatz, etc.) oder ökonomischer Art (z. B. Aufwand). Dazu kommen noch Anforderungen des Kunden (ebenfalls technischer oder ökonomischer Art), falls das Protokoll für die Leistung an den Kunden relevant ist. Darüber hinaus bestätigen die Experten die Erkenntnis in der Literatur, dass unterschiedliche Anwendungen unterschiedliche Protokolle erfordern. Dadurch erhöht sich die Komplexität der Entscheidung und motiviert ein entsprechendes Entscheidungsmodell. (Balzert und Dobhan, 2021)



Abbildung 7: Anforderungen und Entscheidungsparameter bei der Protokollauswahl

Die Ergebnisse sowohl der Literaturanalysen als auch der Expertenstudie müssen auch vor dem Hintergrund der jeweiligen *Limitationen* betrachtet werden (Ott und Dobhan, 2020; Balzert und Dobhan, 2021). So ist zum Beispiel im Forschungsfeld EDI die fehlende Eindeutigkeit bei der technischen Ausgestaltung des Begriffs EDI ein großes Problem. Der Begriff wird dabei für WebEDI ebenso verwendet wie für traditionelle EDI-Techniken, obwohl deren Einsatz sich deutlich unterscheidet. Dies geht damit einher, dass kaum neuere Studien zur EDI-Akzeptanz veröffentlicht wurden. Die Ergebnisse beziehen sich im Wesentlichen (55 der 60 Quellen) auf Artikel, die aus dem Jahr 2010 oder älter sind. Seit 2010 ist die Digitalisierung in KMUs aber

stark vorangeschritten, sodass sich eine veränderte Situation ergeben könnte (Ott und Dobhan, 2020).

Die Experteninterviews in Balzert und Dobhan (2021) wiederum sind hinsichtlich der Expertenwahl limitiert. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass sowohl Experten berücksichtigt werden, die die Systeme im eigenen Unternehmen vernetzen, als auch Experten die entsprechende Lösung verkaufen. Diese Heterogenität führte auch zu einem unterschiedlichen Antwortumfang bei den einzelnen Fragen. Darüber hinaus konnten auf Grund der Covid-19-Pandemie die Interviews nur online durchgeführt werden.

Als *Zusammenfassung* lässt sich zeigen, dass ein großer Forschungsbedarf im Bereich des Datenaustauschs zwischen Softwareapplikationen durch Protokolle gerade auch im Hinblick auf das IoT existiert. Sollte sich die niedrige Akzeptanz von EDI in KMUs auch in einer empirischen Studie belegen, stellt EDI eher ein Negativbeispiel für die Umsetzung von Protokollen zum Datenaustausch in KMUs dar. Darüber hinaus werden die gemäß den Ergebnissen der Expertenstudie, unstrukturierten Entscheidungen der Praxis der Vielzahl an Anforderungen an die Protokollauswahl nicht gerecht. Beide Ergebnisse zeigen den Bedarf für ein Entscheidungsmodell hinsichtlich der Protokolle in IoT-Architekturen, aber auch hinsichtlich von IoT-Architekturen als Ganzes. Letztere Entscheidung dürfte zu den strategischen Entscheidungen eines Unternehmens zählen, da diese nicht nur sicherheitsrelevant und damit erfolgskritisch ist, sondern auch das gesamte Unternehmen betrifft. Forschungsaktivitäten in diesem Bereich müssen auch das Feld des Enterprise Application Managements mit einbeziehen (vgl. z. B. Minakova und Dobhan, 2022). Wie die Qualität derartiger Entscheidungen zur IoT-Architektur während des Entscheidungsprozesses sichergestellt werden kann und welche Aufgabe dabei die Automatisierung oder zumindest Unterstützung dieser Aufgaben durch Künstliche Intelligenz sein kann, sollte Aufgabe zukünftiger Forschungsaktivitäten sein.

7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse des Forschungsprojektes OBERA beschrieben, die sich durchgängig auf die allgemeine Forschungsfrage beziehen, auf welche Weise die digitale Transformation produktionsnaher Prozesse in KMUs des metallverarbeitenden Gewerbes mit einem Fokus auf die Application Layer erfolgen kann. Die Logik der Problemstellungen orientierte sich dabei an dem eingangs skizzierten Prozess der Produktionsauftragsabwicklung.

Im Zuge der digitalen Transformation mit Hilfe einer KI-basierten *Stammdatenpflege* wurden die Voraussetzungen für einen erfolgreichen KI-Einsatz in der Produktionsplanung von KMUs aufgezeigt und zwei Beispiele für den Einsatz von Machine-Learning-Methoden als intelligente Methoden bei der Datenpflege gegeben (vgl. Abschnitt 2).

Die Stammdatenpflege erfolgt logisch vor der Bearbeitung der Belegdaten. In dem strukturgebenden Prozess dieses Artikels ist der entscheidende Beleg der Produktionsauftrag. Nach dessen Erzeugung auf Basis von Bedarfsdaten ist dieser zu terminieren. Für die finale Terminierung von Produktionsaufträgen ist eine *Reihenfolgeplanung* notwendig. Hier wurden zunächst typische Parameter, die bei der Produktionsplanung allgemein und der Reihenfolgeplanung im Speziellen wichtig sind, identifiziert, in einem KMU-geeigneten Verfahren berücksichtigt und dann in eine Software umgesetzt. Damit wurde ein Beispiel zur Digitalisierung der Reihenfolgeplanung in einer flexiblen MTO/MTS-Umgebung in KMUs aufgezeigt (vgl. Abschnitt 3).

Mit der Terminierung und der Freigabe des Auftrags erfolgt auch die Initiierung der Produktionsauftragsdurchführung der Fertigung. Für einen Soll-Ist-Abgleich ist dabei die *Produktionsdatenerfassung* von großer Bedeutung. Der Abschnitt dazu zielte auf die Sichtbarmachung eines systematischen Fehlers in der manuellen Produktionsdatenerfassung und damit das Aufzeigen von Potenzialen einer im Zuge der digitalen Transformation automatisierten Produktionsdatenerfassung (vgl. Abschnitt 4).

Der gesamte Prozess wird begleitet von der *Werkzeugverwaltung*, die während der Planung für die Werkzeugverfügbarkeitsprüfung verantwortlich ist und während der Produktionsauftragsdurchführung Informationen zu den Werkzeugen an den Werker und direkt an die Maschine übermittelt. Hier wurden übergreifende Anforderungen von zerspanend fertigenden KMUs ermittelt, die bei der digitalen Transformation des Werkzeugverwaltungsprozesses helfen sollen (vgl. Abschnitt 5).

In allen vier beschriebenen Bereichen erfordert die digitale Transformation *Entscheidungen im Hinblick auf die IoT-Architektur*. Besonders von Bedeutung ist hierbei die Vernetzung der Systeme, die mit Hilfe von Protokollen erfolgt. Zur Untersuchung der Protokollentscheidungen wurde zunächst die Akzeptanz eines bereits etablierten Protokolls (nämlich EDI) untersucht, um daraus ableiten zu können, welche Faktoren bei der Erzielung von Akzeptanz für ein Protokoll eine Rolle spielen. Darüber hinaus wurde in einer Expertenstudie herausgearbeitet, welche Faktoren aktuell Einfluss auf Entscheidungen zum Einsatz von Protokollen besitzen.

Auffällig über alle Ergebnisse hinweg ist die Betonung der beiden Aspekte Einfachheit und Anschlussfähigkeit. So wurde das Machine-Learning-Verfahren explizit zur Aufwands- und Komplexitätsreduktion in der Datenpflege für den Anwender entwickelt. Hinsichtlich der Reihenfolgeplanung war die Einfachheit ein Hauptkriterium für die Auswahl prioritätsbasierter Verfahren. Beim Werkzeugmanagement spielt die Einfachheit der Datenpflege ebenfalls eine Rolle, gerade in Unternehmen mit vielen Werkzeugen und hinsichtlich von Protokollen wird die Einfachheit bzw. Nachvollziehbarkeit als ein Akzeptanz- und Auswahlkriterium identifiziert. Noch deutlicher

wird die Anschlussfähigkeit genannt. In allen aufgezeigten Bereichen ist eine Geschäftsprozess- und Systemintegration (Reihenfolgeplanung, KI-basierte Datenpflege, Werkzeugverwaltung, Produktionsdatenerfassung) eine wichtige Anforderung oder Auswahl- und Akzeptanzkriterium (IoT-Architekturentscheidungen). Dies betont einmal mehr die Bedeutung der Vernetzung von Systemen.

Gleichzeitig wird in dieser Arbeit auch der hohe Bedarf an zukünftiger Forschung in diesem Bereich deutlich. So muss untersucht werden, inwieweit der Einsatz von KI in der Datenpflege die Automatisierung (z. B. in der Belegerfassung) und die Stammdatenqualität auf dem Weg hin zu einem autonomen ERP-System erhöhen können und die KMU-spezifischen Anforderungen an die Reihenfolgeplanung und das Werkzeugmanagement auch bei einer großen Stichprobe bestätigt werden können. Auch die systematischen Fehler der Produktionserfassung müssen noch unternehmensübergreifend bestätigt werden. Schließlich ist es im Hinblick auf die IoT-Entscheidungen dringend notwendig, diese mit existenten Konzepten wie dem Enterprise Application Management zu verknüpfen, Einflussfaktoren auf die Entscheidungen zu identifizieren, die Messung der Entscheidungsqualität zu ermöglichen und ein Modell zur Kontrolle der Einflussfaktoren zu ermitteln. Insgesamt müssen zukünftige Forschungsarbeiten vor allem auf die Verallgemeinerung der hier beschriebenen Ergebnisse zielen. Die durch die Unternehmenspraxis initiierten Fallbeispiele in diesem Beitrag indizieren aber auf jeden Fall mögliche Lösungen zur digitalen Transformation von produktionsnahen Prozessen in KMUs der Metallverarbeitung.

Diese Forschungsarbeiten fanden im Rahmen des Projektes OBERA aus dem FuE-Programm "Informations- und Kommunikationstechnik" des bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Energie und Technologie (IUK-1709-0011//IUK530/010), eingereicht durch die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS) statt.

8 Literaturverzeichnis

- Akyazi, T.; Goti, A.; Oyarbide-Zubillaga, A.; Alberdi, E.; Carballedo, R.; Ibeas, R.; Garcia-Bringas, P. (2020): „Skills Requirements for the European Machine Tool Sector Emerging from Its Digitalization“. In: *Metals* 2020. 10, S. 1665.
- Al-Fuqaha, A.; Guizani, M.; Mohammadi, M.; Aledhari, M.; Ayyash, M. (2015): „Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications“. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Bd. 17, Nr. 4, S. 2347–2376.

- Alsheibani, S.; Cheung, Y.; Messom, C. (2018): „Artificial Intelligence Adoption: AI-readiness at Firm-Level”. In: PACIS. S. 37.
- Anvari, M. (1992): „Electronic data interchange and inventories”. In: International Journal of Production Economics. Jg. 26, Nr. 1-3, S. 135–143.
- Armstrong, J. S.; F. Collopy (1992): „Error Measures for Generalizing about Forecasting Methods: Empirical Comparison”. In: International Journal of Forecasting. 8, S. 69–80.
- Balzert, E.; Dobhan, A. (2021): „Protokolle der Application Layer im industriellen Internet der Dinge”. In: Mobility in a Globalised World 2020. 25, S. 79.
- Barrot, C. (2009): „Prognosegütemaße”. In: Albers, S.; Klapper, D.; Konradt, U.; Walter, A.; Wolf, J. (Hrsg.), Methodik der empirischen Forschung. 3. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 547–560.
- Beck, R.; Weitzel, T.; König, W. (2003): „The Myth of WebEDI”. In: Monteiro, J. L.; Swatman, P. M. C.; Tavares, L. V. (Hrsg.), Towards the Knowledge Society: ECommerce, eBusiness and eGovernment The Second IFIP Conference on E-Commerce, E-Business, E-Government (I3E 2002) October 7-9, 2002, Lisbon, Portugal, IFIP - The International Federation for Information Processing. Bd. 105, Springer US, Boston, MA, S. 585–599.
- Beemsterboer, B.; Land, M.; Teunter, R. (2016): „Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study”. In: European Journal of Operational Research. 248 (2), S. 453–461.
- Berger, P. D., Maurer, R. E.; Celli, G. B. (2018): "Experimental Design". In: With Applications in Management, Engineering, and the Sciences. Springer, Cham.
- Bettoni, A.; Matteri, D.; Montini, E.; Gładysz, B.; Carpanzano, E. (2021): „An AI adoption model for SMEs: a conceptual framework”. In: IFAC-PapersOnLine. 54 (1), S. 702–708.
- Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W. (2014): „Einleitung: Das Expertinneninterview – eine Methode qualitativer Sozialforschung”. In: Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W. (Hrsg.), Interviews mit Experten. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Bogner, A., Littig, B.; Menz, W. (2014): „Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung“. In: Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Calzavara, M.; Battini, D.; Bogataj, D.; Sgarbossa, F.; Zennaro, I. (2020): „Ageing workforce management in manufacturing systems: state of the art and future research agenda”. In: International Journal of Production Research. 58 (3), S. 729–747.
- Chang, K. H.; Lu, Y. S. (2010): „Queueing analysis on a single-station make-to-stock/make-to-order inventory-production system”. In: Applied Mathematical Modelling. 34 (4), S. 978–991.

- Chituc, C.-M. (2017): „XML interoperability standards for seamless communication: An analysis of industry-neutral and domain-specific initiatives”. In: *Computers in Industry*. 92–93, S. 118–136.
- Chwelos, P.; Benbasat, I.; Dexter, A. S. (2001): „Research Report: Empirical Test of an EDI Adoption Model”. In: *Information Systems Research*. 12 (3), S. 304–321.
- Dobhan, A., Rein, O., Goletz, D.; Alyones, H. (2021): „Computer-Vision-Systeme im Behältermanagement”. In: *Mobility in a Globalised World 2020*. 25, S. 115.
- Elhadi, S., Marzak, A., Sael, N.; Merzouk, S. (2018): „Comparative Study of IoT Protocols“. In: Hamlich, M. (Hrsg.), *The 2nd international conference on Smart Application and Data Analysis for Smart Cities (SADASC'18)*, Casablanca, Marokko, 27.-28.02.2018, Elsevier, Amsterdam, Niederlande.
- Fuchs, C.; Wyszogrodski, A. (2015): „Advanced Planning macht die Steuerung genauer”. In: *ISREPORT*. S. 42–43.
- Gläser, J.; Laudel, G. (2009): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Springer-Verlag.
- Hadj Youssef, K.; Delft, C. van; Dallery, Y. (2009): „Analysis and Optimization of a Combined Make-to-Stock and Make-to-Order Multiproduct Manufacturing System”. In: *Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences* 2009 (8), S. 1–27.
- Haug, A.; Stentoft Arlbjørn, J.; Zachariassen, F.; Schlichter, J. (2013): “Master data quality 110 barriers: an empirical investigation”. In: *Industrial Management & Data Systems*. 113 (2), S. 234–249.
- Heger, J. (2014): *Dynamische Regelselektion in der Reihenfolgeplanung. Prognose von Steuerungsparametern mit Gaußschen Prozessen*. Springer Vieweg, Wiesbaden. Abgerufen von <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=909895>.
- Helfferich, C. (2019): „Leitfaden- und Experteninterviews”. In: Baur, N.; Blasius, J. (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 669–686.
- Horngren, C. T.; Foster, G. (1991): *Cost Accounting: A Managerial Emphasis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Hug, T.; Poscheschnik, G.; Lederer, B. (2010): *Empirisch forschen. Die Planung und Umsetzung von Projekten im Studium*. 1. Aufl., UVK-Verl.-Ges. (UTB Schlüsselkompetenzen, 3357), Konstanz. Abgerufen von <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838533575>.
- Jaehn, F.; Pesch, E. (2014): *Ablaufplanung. Einführung in Scheduling*. Springer Gabler, Berlin.
- Jöhnk, J.; Weißert, M.; Wyrтки, K. (2021): „Ready or Not, AI Comes: An Interview Study of Organizational AI Readiness Factors”. In: *Business & Information Systems Engineering*. 63 (1), S. 5–20.

- Kaiser, R. (2021): *Qualitative Experteninterviews*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Khan, R.; Khan, S. U.; Zaheer, R.; Khan, S. (2012): "Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges ". In: Guerrero, J. E. (Hrsg.), 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, Pakistan, 17.-19.12.2012, IEEE, Piscataway, NJ, USA, S. 257–260.
- Kuckartz, U., (2019): „Qualitative content analysis: From Kracauer's beginnings to today's challenges“. In: Technical report. Forum: Qualitative Social Research (Forum Qualitative Sozialforschung).
- Kummer, S.; Grün, O.; Jammernegg, W. (2008): *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. Pearson Studium, München.
- Kurbel, K. (2016): *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. Von MRP bis Industrie 4.0*. 8. Aufl., De Gruyter Oldenbourg, Berlin, Boston. Abgerufen von http://www.degruyter.com/search?f_0=isbn&q_0=9783110441680&searchTitles=true.
- Lee, S. M.; Kim, J.; Choi, Y. (2009): „Effects of IT knowledge and media selection on operational performance of small firms“. In: *Small Bus Econ.* 32, S. 241–257.
- Luckett, P. F.; Eggleton, I. R. C. (1991): „Feedback and management accounting: A review of research into behavioral consequences“. In: *Accounting, Organizations and Society.* 16 (4), S. 371–394.
- Lux, W.; Hauser, M. (2007): „Mit dem KMU-Barometer am Puls der strategischen Controlling-Praxis“. In: *ZfCM: Zeitschrift für Controlling & Management*, S. 24–29.
- Mayring, P. (2004): *Qualitative content analysis. A companion to qualitative research.* 1 (2), S. 159–176.
- Mayring, P. (2019): *Qualitative Inhaltsanalyse – Abgrenzungen, Spielarten, Weiterentwicklungen*. Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research. Vol. 20, No. 3 (2019): Qualitative Content Analysis I. In: *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research* 20 (3), S. 15.
- Minakova, A.; Dobhan, A. (2022): „Decision-making for the Application & Middleware layers of IoT Architectures in general and in particular within EAM in SMEs“. In: 2022 16th International Conference on Research Challenges in Information Science – eingereicht.
- Ott, A.; Dobhan, A. (2020): „Die Akzeptanz webbasierter EDI-Anwendungen durch kleine Unternehmen“. In: *Mobility in a Globalised World 2019*. 23, S. 225.
- Pandit, A.; Zhu, Y. (2007): „An ontology-based approach to support decision-making for the design of ETO (Engineer-To-Order) products“. In: *Automation in Construction.* 16, S. 759–770.

- Renna, P. (2016): „Production control policies for a multistage serial system under MTO-MTS Production environment”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 83 (1), S. 1–30.
- Rich, E. (1983): *Artificial Intelligence*. McGraw-Hill, New York
- Rocha, F.; Silva, E.; Lopes, Â.; Dias, L.; Pereira, G.; Fernandes, N. O.; Carmo-Silva, S. (2015): „Materials Flow Control in Hybrid Make-to-Stock/Make-to-Order Manufacturing”. In: Corman, F.; Voß, S.; Negenborn, R. R. (Hrsg.), *Computational logistics. 6th international conference, ICCL 2015, Delft, The Netherlands, September 23-25, 2015 : proceedings*, Bd. 9335. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer (Lecture notes in computer science, 9335), S. 559–568.
- Ross, J-W. (2003): *Creating a Strategic it Architecture Competency*, MIT Sloan Working Paper No. 4314-03. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=416180> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.416180> , p. 2.
- Schkarin, T.; Dobhan, A. (2022): „Prerequisites for applying artificial intelligence for scheduling in small- and medium-sized enterprises”. In: *International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2022)* – akzeptiert.
- Schröder, C. (2020): „Mittelstand im Einzelnen“. Abgerufen am 10.11.2021 von <https://www.ifm-bonn.org/statistiken/mittelstand-im-einzelnen/digitalisierung-der-kmu-im-eu-vergleich>.
- Sethi, P.; Sarangi, S. R. (2017): „Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications“. In: *Journal of Electrical and Computer Engineering*. Bd. 2017, S. 1–25.
- Singh, S.; Singh, J. (2022): „A Survey on Master Data Management Techniques for Business Perspective”. In: Tavares J. M. R. S.; Dutta P.; Dutta S.; Samanta D. (eds.), *Cyber Intelligence and Information Retrieval. Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 291. Springer, Singapore.
- Soman, C. A.; Donk, D. P. van; Gaalman, G. (2006): „Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand”. In: *International Journal of Production Economics*. 104 (2), S. 441–453.
- Tankosic, M.; Ivetic, P. Mikelic, K. (2017): „Managing Internal and External Communication in a Competitive Climate via EDI Concept”. In: *International Journal of Communications*. 11 (2), S. 1–6.
- vbw – Vereinigung der Bayrischen Wirtschaft e.V. (Stand Juni 2017): *Zukunftsrat der Bayrischen Wirtschaft – Neue Wertschöpfung durch Digitalisierung Analyse und Handlungsempfehlungen*.
- Vogt, L. (2007): „Durchgängig von der Planung bis zur Werkstatt”. In: *WB Werkstatt + Betrieb*. 140 (10) (2007), S. 68–71.

- Wan, J.; Tang, S.; Shu, Z.; Li, D.; Wang, S.; Imran, M.; Vasilakos, A. V. (2016): „Software-defined industrial IoT in the context of industry 4.0”. In: IEEE Sensors Journal. 16 (20), S. 7373–7380.
- Weber, D. (2015): *Wissenschaftliches Arbeiten für Wirtschaftswissenschaftler. Untersuchungen planen, durchführen und auswerten*. Wiley, Weinheim. Abgerufen von <https://ebookcentral.proquest.com/lib/zbw/detail.action?docID=2059125>.
- Webster, J.; Watson, R. T. (2002): „Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review”. In: MIS quarterly, xiii–xxiii.
- Wirth, R.; Hipp, J. (2000): „CRISP-DM: Toward a Standard Process Model for Data Mining”. In: Proceeding of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining, S. 29–39.
- Zetterer Präzision GmbH (2016): „Zeitaufwand für die Werkzeugsuche halbiert”. In: WB Werkstatt + Betrieb. (12) (2016), S. 40–41.
- Zhang, Z. G.; Kim, I.; Springer, M.; Cai, G.; Yu, Y. (2013): „Dynamic pooling of make-to-stock and make-to-order operations”. In: International Journal of Production Economics. 144 (1), S. 44–56.
- Zhang, T.; Zheng, Q.; Fang, Y.; Zhang, Y. (2015): „Multi-level inventory matching and order planning under the hybrid Make-To-Order/Make-To-Stock production environment for steel plants via Particle Swarm Optimization”. In: Computers and Industrial Engineering. 87 (C), S. 238–249.
- Ziegler, C.; Dobhan, A.; Heusinger, M. (2021): „Applications of Neural Networks in Engineer-to-order Environment”. In: 15th Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME) – im Veröffentlichungsprozess
- Zillmann, M. (2017): “Ohne verlässliche Stammdaten geht es nicht”. In: Controlling & Management. Review, 61 (6), S. 68–72.