

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

vor Ihnen liegt nunmehr die bereits elfte Ausgabe des E-Journals **Anwendungen und Konzepte in der Wirtschaftsinformatik (AKWI)**.

Die Beiträge decken ein breites Spektrum an Themen ab. Dies korreliert mit einer Buchbesprechung über anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik, in dem vor allem auf die strategische Planung, die Entwicklung und die Nutzung von Informationssystemen eingegangen wird. Fortwährend ist die Prozessverbesserung durch ERP-Systeme ein Gegenstand anwendungsorientierter Forschung. Sehr klassisch ist in diesem Sinne der Beitrag über die „Digitalisierung des Berichtswesens im Bereich Operative Locomotives and Budget Planning der DB Cargo AG“ sowie vor allem die „Teilautomatisierung von Prozessschritten in einem mittelständischen ITK-Unternehmen mithilfe der ERP-Lösung Microsoft Dynamics NAV“. Generell entscheidend ist, ob Projekte tatsächlich erfolgreich sind. Dazu stellt ein Beitrag einen entsprechenden Prozess vor und ein weiterer analysiert den Einfluss der Digitalisierung in einer Lieferkette. Thematisch eng verknüpft mit diesen Arbeiten sind Analysen neuer Konzepte: die aktuellen Transformationsprozesse in der deutschen Automobilindustrie für autonome und elektrische Fahrzeuge, eine urbane Mobilitätsplattform aus Sicht der Nutzer, eine Prozessautomatisierung mit Robotic Process Automation bei einem Automobilhersteller, eine Kombination aus Computer-aided-Design-Systemen und Virtual-Reality-Technologien um schnellere Entwicklungszyklen in der Automobilindustrie mit höherer Qualität zu erreichen und schließlich eine Verbesserung des Entwicklungsablaufs für ein Lagerverwaltungssystem durch die Virtualisierungstechnologie Docker. Stellvertretend für typische Entwicklungsarbeiten in Unternehmen wird über die Implementierung eines verteilten Systems zur Kommunikation von Betriebsdaten und Statistiken in Intralogistikanlagen zur Regelung der Ein- und Auslagerungen in Lagern berichtet. Ferner wird die Programmierung einer DICOM-Schnittstelle (zur Anbindung bildgebender Medizingeräte an Praxis-Software) in einem Data Lake (sehr große Speicher von Daten in ihrem Rohformat) in der Cloud am Beispiel von Microsoft Azure vorgestellt. Bei den genannten Themen stehen mehr die Konzepte der Informatik im Vordergrund. Bei den nächsten geht es zusätzlich um die optimale Lösung konkreter Planungsprobleme und zwar im Detail um eine Zielvorgabe für die Zykluszeit an Arbeitsplätzen zur Herstellung von Wafern bei Infineon sowie um die Planung einer zweistufigen Reentrant-Hybrid-Fließfertigung für einen Wärmebehandlungsprozess. Bei großen Problemen liegen sehr große Lösungsräume vor. Ihre Struktur bestimmt entscheidend, ob mit relativ kurzer Rechenzeit sehr gute oder sogar optimale Lösungen gefunden werden können. Für die Ressourcenbelegungsplanung wird hierzu vorgestellt, wie eine Analyse von Lösungsräumen durchgeführt werden kann und mit welchen Ergebnissen im Hinblick auf die Güte der Lösungen bei moderater bzw. relativ kurzer Rechenzeit zu rechnen ist. Neuere Technologien werden zunehmend häufiger erforscht. Drei Publikationen befassen sich mit dem Fällen von Entscheidungen auf der Grundlage großer Datenmengen. In einem werden für die Verarbeitung von Echtzeitdaten Stream-Process-Engines evaluiert. Die Gewinnung und Nutzung von Daten aller Art gewinnt zunehmend an Bedeutung. Inwieweit Amazon Web Services die Limitierung klassischer Business-Intelligence-Methoden aufgrund unstrukturierter und komplexer Datenbestände überwinden kann, beleuchtet ein zweiter Beitrag. Ergänzend zu diesen technischen Möglichkeiten wird eine hohe Datenkompetenz benötigt, für deren Steigerung ein Framework vorgeschlagen wird. Schließlich wird die Leistungsfähigkeit von maschinellem Lernen anhand personalisierter online Produktempfehlungen und der Prognose von Aktienkursen evaluiert.

Über Ihr Interesse an der Zeitschrift freuen wir uns und wünschen Ihnen Freude bei der Lektüre.

Regensburg, Fulda, Wildau und Luzern, im Juli 2020

Frank Herrmann, Norbert Ketterer, Konrad Marfurt und Christian Müller



Christian Müller



Konrad Marfurt



Norbert Ketterer



Frank Herrmann

Entwicklung eines Reifegradmodells zur Bewertung des Digitalisierungsgrades von Geschäftsprozessen

Birgit Große-Schwiep
Fakultät Wirtschafts- und
Sozialwissenschaften

Hochschule Osnabrück
Caprivistrasse 30a
49076 Osnabrück
E-Mail:

birgit.grosseschwiep@gmail.com

Frank Bensberg
Fakultät Wirtschafts- und
Sozialwissenschaften

Hochschule Osnabrück
Caprivistrasse 30a
49076 Osnabrück
E-Mail:

f.bensberg@hs-osnabrueck.de

Heike Schinnenburg
Fakultät Wirtschafts- und
Sozialwissenschaften

Hochschule Osnabrück
Caprivistrasse 30a
49076 Osnabrück
E-Mail:

h.schinnenburg@hs-osnabrueck.de

ABSTRACT

Durch die anhaltende Diffusion des Internet als Basis für ökonomische Aktivitäten intensiviert sich der Wettbewerb. Infolgedessen suchen Unternehmen verstärkt nach Möglichkeiten zur Optimierung ihrer Geschäftsprozesse. Mit dem vorliegenden Beitrag wird ein Reifegradmodell entwickelt, das Unternehmen bei der systematischen Bewertung des Digitalisierungsgrades ihrer Geschäftsprozesse unterstützt. Ziel ist es, Unternehmen die Istanalyse ihrer Geschäftsprozesse zu ermöglichen, sodass deren digitale Reife ermittelt werden kann. Grundlage für die Entwicklung bildet eine systematische Literaturanalyse zur Identifikation bestehender Reifegradmodelle im Kontext der Forschungsfelder Digitalisierung, Industrie 4.0 und insbesondere Prozessdigitalisierung. Dadurch werden insgesamt 22 Reifegradmodelle ermittelt und inhaltlich sowie methodisch untersucht. Die Analyse zeigt, dass keines der Reifegradmodellen den Gegenstandsbereich der Geschäftsprozesse abdeckt und zugleich die zu stellenden methodischen Anforderungen erfüllt. Hierauf aufbauend wird ein neues Reifegradmodell konzipiert und in einem unternehmensbezogenen Anwendungskontext evaluiert. Das konzipierte Reifegradmodell besteht aus drei Dimensionen: *IT-Systeme*, *Daten* und *Strategie*. Diese drei Dimensionen sind wiederum in insgesamt neun Sub-Dimensionen untergliedert. In jeder Sub-Dimension sind drei Reifegradindikatoren zur Beurteilung der digitalen Reife der Geschäftsprozesse verankert. Durch die Bewertung sämtlicher Reifegradindikatoren wird anschließend eine von fünf möglichen Reifegradstufen ermittelt. Zur vereinfachten Durchführung der Bewertung der digitalen Reife von Geschäftsprozessen wird ein Excel-basiertes Bewertungssystem entwickelt, das von Unternehmen zur Prozessdiagnose genutzt werden kann.

SCHLÜSSELWÖRTER

Digitalisierung, Reifegrad, Geschäftsprozesse, Digitale Transformation

EINLEITUNG

Die Geschäftsprozesse von Unternehmen bilden einen zentralen Ansatzpunkt für die Sicherung des Geschäftserfolgs (Scheer Consulting 2014, Kollmann 2016). In der aktuellen Diskussion um die Digitalisierung werden diese jedoch häufig nicht als zentraler Gestaltungsgegenstand erfasst, sodass unter Digitalisierung in der Unternehmenspraxis häufig nur die Adoption einzelner Technologien in singulären Funktionsbereichen der Unternehmung verstanden wird (z. B. 5G, Big Data, Cyber-Physische Systeme). Durch die Fokussierung auf medial stark popularisierte Technologien – etwa die künstliche Intelligenz (KI) – werden die Digitalisierungspotenziale von Geschäftsprozessen nicht konsequent erschlossen. Die Dynamik der informationstechnologischen Entwicklung führt dabei auch dazu, dass hinsichtlich der Adoptionsentscheidung bei der Technologieselektion eine hohe wahrgenommene Unsicherheit besteht (Botzkowski 2017) und eine kontinuierliche Auseinandersetzung mit dem Markt und den erforderlichen Geschäftsabläufen notwendig wird (swisscom 2016).

Die Digitalisierung umfasst jedoch nicht nur die digitale Datenerfassung, z. B. durch Scannen analoger Medien, sondern vielmehr die Vernetzung der Geschäftsprozesse und Geschäftsmodelle durch das Internet der Dinge (Sames u. Dinges 2018). So ist zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit laut *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013* „eine Digitalisierung der Geschäftsprozesse durch moderne Informations- und Kommunikationstechnik erforderlich“. Die hiermit induzierte digitale Transformation wird derzeit in zwei Strömungen unterteilt: einerseits thematisiert die Digitalisierung von *Geschäftsmodellen* die (Weiter-)Entwicklung neuer Produkte und Dienstleistungen eines Unternehmens. Dieser Bereich, der auch als *Produktdigitalisierung* bezeichnet wird, hat bislang in der Wissenschaft eine größere Aufmerksamkeit erhalten. Demgegenüber steht die Digitalisierung von *Geschäftsprozessen*, welche im Rahmen des Prozessmanagements die Steigerung der Effizienz bzw. Produktivität anstrebt (Ensinger et al. 2016), oder auch die Qualitätsverbesserung des Leistungsangebots intendiert (Becker et al. 2009b). Hiermit geht die Fragestellung einher, wie eine Bewertung von Geschäftsprozessen in Bezug auf ihren digitalen Reifegrade erfolgen kann.

Relevanz der Thematik und Problemstellung

Durch die Digitalisierung von Geschäftsprozessen werden massive ökonomische Potenziale erwartet, die gleichermaßen zu deutlichen gesellschaftlichen Veränderungen führen können (Becker u. Knop 2015). Analog hierzu drohen bei fehlender Digitalisierung für Unternehmen hohe Verlustpotenziale (Bloching 2015). Um diesen zu begegnen, sind zukunftsfähige Geschäftsprozesse zur Wertschöpfung zu implementieren, die eine gründliche Prozessanalyse erforderlich machen (Wolf u. Strohschen 2018). Im Zuge dieser Prozessanalyse ist auch eine Bewertung der bestehenden Geschäftsprozesse hinsichtlich ihres digitalen Reifegrades notwendig. Generell können hierfür Reifegradmodelle eingesetzt werden, die sich zur Erhebung des Entwicklungsstadiums bestimmter Objekte und zur Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen etabliert haben. Dabei wird der Entwicklungs- bzw. Reifeprozess in verschiedene Stufen unterteilt und eine Zuordnung des Status quo zur entsprechenden Stufe ermöglicht. Da die Optimierung von Prozessen eine zentrale Aufgabe des Prozessmanagements ist, finden hier Reifegradmodelle besonders häufig Anwendung (Hecht 2014). Diese Standortbestimmung der Prozesse ist im Zuge der Digitalisierung erforderlich, damit Potenziale zur Optimierung der Prozessfähigkeit erkannt und ausgeschöpft werden können (Röglinger u. Kamprath 2012). Dabei kann das Reifegradmodell zusätzlich als Leitfaden dienen, welcher die Unternehmen bei der Überwindung der Diskrepanz zwischen Ist- und Sollzustand bei der Prozessdigitalisierung unterstützt.

Bislang wurde die Relevanz der Geschäftsprozesse bei der Umsetzung von Digitalisierungsstrategien vor allem von etablierten Beratungsunternehmen erkannt, und in der Literatur nur oberflächlich thematisiert (Hess et al. 2016). Daher existieren insgesamt nur wenige Reifegradmodelle, die wiederum nicht wissenschaftlich fundiert sind und keine systematische Dokumentation vorweisen, wie es von *Becker et al. 2009a* und *De Bruin 2005* gefordert wird.

Zielsetzung

Aufgrund der bestehenden Gestaltungslücke verfolgt der vorliegende Beitrag zwei Zielsetzungen. Die erste Zielsetzung besteht in der systematischen Erhebung des Forschungsstands im Kontext der Bewertung von Geschäftsprozessen in Bezug auf ihren Digitalisierungsgrad. Darauf aufbauend erfolgt die Konstruktion eines neuen, branchenneutralen Reifegradmodells, das Unternehmen bei der Ermittlung des derzeitigen Entwicklungsstandes, dessen Bewertung sowie Verbesserung der Geschäftsprozessdigitalisierung unterstützt.

SYSTEMATISCHE LITERATURANALYSE

Die systematische Literaturanalyse (SLA) beinhaltet einen Vergleich der existierenden Reifegradmodelle im Forschungsbereich der Digitalisierung von Geschäftsprozessen und liefert damit die konzeptionelle Basis für deren Weiterentwicklung. Für das Verständnis von Reifegradmodellen im Rahmen der Digitalisierung ist es

notwendig zu erfassen, wie diese in früheren Untersuchungen entwickelt wurden. Das Ziel der Literaturanalyse ist es, die Grundlage für die Entwicklung des neuen Reifegradmodells zu schaffen, indem die zentralen Charakteristika bestehender Reifegradmodelle in Bezug auf die Digitalisierung von Geschäftsprozessen ermittelt und dokumentiert werden.

Bevor die Identifikation und Analyse der bestehenden Reifegradmodelle vorgenommen werden kann, wird zur Zielerreichung der Fokus der Literaturanalyse nach den von *Cooper 1988* definierten Eigenschaften festgelegt. Demnach wird der Fokus auf die Ergebnisse und die angewandten Methoden gelegt. Ziele sind die Integration der Ergebnisse sowie die Kritik vorhandener Modelle. Es wird eine neutrale Darstellung zur Anwendung in Wissenschaft und Praxis angestrebt. Die Literaturanalyse wird vollständig-selektiv anhand definierter Selektionskriterien realisiert; sie orientiert sich am konzeptionellen Bezugsrahmen der Digitalisierung.

Literatursuche

Die Phase der Literatursuche umfasst die Ermittlung adäquater Literatur zur festgelegten Forschungsfrage (Becker 2012). Demnach sind solche Literaturquellen zu identifizieren, die sich auf Reifegradmodelle beziehen und in Zusammenhang zum digitalen Geschäftsprozessmanagement, zur Digitalisierung von Unternehmen bzw. Geschäftsmodellen oder zur Industrie 4.0 stehen. Des Weiteren sind auch Vorgehensmodelle und Referenzmodelle zur Digitalisierung sowie weitere Publikationen zum Thema digitaler Geschäftsprozesse in die Synthese zu integrieren, um modellübergreifend relevante Erkenntnisse identifizieren zu können. Um Objektivität und Reproduzierbarkeit im Forschungsprozess zu gewährleisten, sind die vorab definierten Kriterien zur Literatursuche zu dokumentieren (Fettke 2006). Die Ein- bzw. Ausschlusskriterien der Literatursuche zeigt Tabelle 1.

Kriteriumstyp	Kriterium
Veröffentlichung	Publikationen zwischen Q1 2006 bis Juni 2019
Zugänglichkeit/ Zugang	Frei zugängliche Publikationen
Sprache	Englische oder deutsche Sprache
Publikationstyp	Keine kurzen Dokumente (kürzer als zwei Seiten, wie z.B. Poster, redaktionelle Beiträge)
Publikationsinhalt	Publikationen mit relevantem Inhalt zur Beantwortung der Forschungsfrage
	Dimensionen und Reifegradindikatoren sind hinreichend genau erläutert und nachvollziehbar
	Keine Duplikate (nach Titel oder Inhalt)
Formalien	Publikationen mit Studiengrundlage oder Literaturverzeichnis

Tabelle 1: Selektionskriterien der Literatursuche (in Anlehnung an *Sanchez-Puchol u. Pastor-Collado 2017*)

Die Literatursuche ist auf die wichtigsten Datenbanken in der Betriebswirtschaft und Wirtschaftsinformatik beschränkt. Es wurden die Datenbanken EBSCOhost, ProQuest, WISO und Springer Link ausgewählt (Association for Information Systems 2011). Darüber hinaus wurde die Bibliothek der Hochschule Osnabrück (scin.os) und Google Scholar für die wissenschaftliche Literaturrecherche verwendet. Aufgrund der hohen Relevanz für die Praxis und der starken Dynamik sowie Aktualität innerhalb des betrachteten Forschungsfeldes wird ebenfalls eine Google-Suche durchgeführt. So wird sichergestellt, dass zusätzlich praxisorientierte Quellen und Informationen über Trends in der Suche Berücksichtigung finden. Die Suche erfolgte mithilfe der folgenden Abfrage:

((("maturity" OR "capability" OR "assessment") AND "model") OR ("Reifegradmodell" OR "Reife*")) AND ("digital business" OR "e-business" OR "digital enterprise" OR "digital transformation" OR "digital strategy" OR "digital business strategy" OR "digitization" OR "digital process" OR "process digitization" OR "digital readiness" OR "digitale Prozesse" OR "prozessdigitalisierung" OR "digitalisierung" OR "digital* transformation" OR "digitale strategie") AND ("Process*" OR "Prozess*" OR "operation*").

Literaturauswertung

Die Literaturauswertung verfolgt das Ziel der Relevanzprüfung der ermittelten Literatur sowie die Verarbeitung und Systematisierung der Literatur (Becker 2012). Die Abfrage ergab 23.005 Quellen (Tabelle 2), welche die Basis für die weiteren Untersuchungen darstellen. In einem weiteren, iterativen Vorgehen wurden sämtliche Fundstellen nach den Selektionskriterien aus Tabelle 1 gefiltert und auf inhaltliche Relevanz geprüft. Dabei wurden vier Schritte zur Sichtung der Literatur zugrunde gelegt:

1. **Sichtung:** Ausschluss durch Titel (Relevanz),
2. **Sichtung:** Ausschluss durch Abstract und Schlüsselwörter (feinere Relevanzanalyse),
3. **Sichtung:** Ausschluss durch formale Kriterien,
4. **Sichtung:** Ausschluss anhand Volltextanalyse.

Trotz der bereits umfangreichen Anzahl an relevanten Beiträgen wurde eine Rückwärtssuche durchgeführt, um keine in der Literatur relevanten Beiträge außer Acht zu lassen. Dabei wurden die identifizierten Beiträge auf relevante Quellen im Literaturverzeichnis untersucht und weitere vier zu analysierende Quellen nach der Durchführung der vier Sichtungsschritte ermittelt (Webster u. Watson 2002). Im Rahmen der Anwendung der Kriterien und der Auswertung der Literatur wurden zur weiteren Analyse 44 Beiträge in sieben Datenbanken identifiziert. Dabei handelte es sich um 21 deutschsprachige Beiträge und 23 englischsprachige Beiträge. Anhand der oben beschriebenen Literatursuche wurden innerhalb der 44 Beiträge insgesamt 22 Reifegradmodelle identifiziert.

Datenbank	Suche	1. Sichtung	2.	3.	4.
Google Scholar	7.960	476	65	59	12
Google-Suche	719	209	35	31	5
WISO	60	30	9	8	1
Springer Link	13.927	96	37	18	18
scin.os	165	71	13	13	2
EBESCO-host	107	30	13	13	2
ProQuest	18	5	5	3	0
Summe vor Rückwärtssuche	23.005	933	177	147	39
Rückwärtssuche	29	29	22	22	4
Summe	23.034	962	199	169	44

Tabelle 2: Anzahl der verbleibenden Beiträge unter Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien nach Sichtung

Literaturdatenanalyse

Zur softwaregestützten Inhaltsanalyse der resultierenden Fundstellen wurde das Text Analytics-System *IBM Watson Explorer* (IBM WEX) eingesetzt (Bensberg et al. 2018). Dabei wurden Quellen ohne Abstract sowie Duplikate eliminiert, sodass 511 Beiträge in die Analyse einfließen. Die Zeitreihe in Abbildung 1 zeigt, dass ein deutlicher Anstieg der Frequenz für das untersuchte Forschungsfeld von Digital-Reifegradmodellen in den ausgewählten wissenschaftlichen Datenbanken seit dem Jahr 2011 zu verzeichnen ist. Das Jahr 2018 ist mit 85 Fundstellen das Jahr mit der höchsten Publikationsfrequenz. Sowohl die Zahlen der Veröffentlichungen als auch der in den Beiträgen überwiegend gewählte qualitativ-explorative Forschungsansatz weisen darauf hin, dass es sich um ein junges Forschungsfeld mit zunehmender Aktualität handelt.

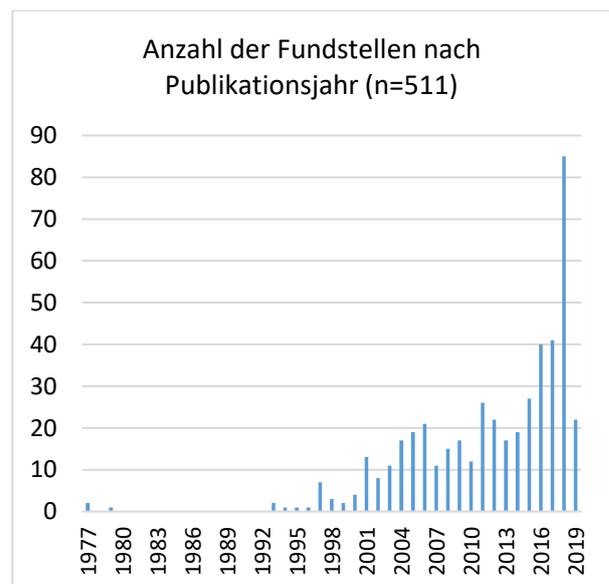


Abbildung 1: Anzahl der Fundstellen nach Publikationsjahr (Analyse mit IBM WEX)

Innerhalb dieser 511 Beiträge weisen jedoch nur 14 Beiträge die Adjektiv-Substantiv-Kombination *digital process*, *digital business process*, *digitale Prozesse* oder *digitale Geschäftsprozesse* auf. Dadurch wird deutlich, dass im Zusammenhang mit den ermittelten Reifegradmodellen die digitalen Prozesse kaum untersucht wurden. In allen 14 Beiträgen wird die Digitalisierung von Prozessen lediglich als zu betrachtender Teilaspekt erwähnt, sodass diese Fundstellen die zu digitalisierenden Prozesse nicht ausführlich thematisieren.

Eine Korrelationsanalyse mit IBM WEX zeigt zudem, dass in den analysierten Beiträgen Korrelationen zwischen verschiedenen Substantivfolgen und modifizierten Substantiven bestehen. Daraus lassen sich inhaltliche Zusammenhänge zwischen den Begrifflichkeiten ableiten. Methodisch weisen die *maturity models* (Reifegradmodelle) mit dem *literature review* (Literaturanalyse) eine positive Korrelation auf, sodass die ausgewählte Methodik in den untersuchten Beiträgen im Zusammenhang mit der Entwicklung oder Analyse von Reifegradmodellen steht. Dieser Zusammenhang wurde bereits bei der Auswahl der Methodik und der Empfehlung nach *Becker et al. 2009a* berücksichtigt.

Weitere Analysen haben einen inhaltlichen Zusammenhang zwischen *digital maturity* (digitale Reife) und *digital technology* (digitale Technologie) bzw. *digital* und *information systems* (IT-Systeme), *information technology* (IT), den *business processes* (Geschäftsprozesse) und der *business strategy* (Unternehmensstrategie) transparent gemacht. Dies bestätigt die Relevanz der genannten Digitalisierungsaspekte.

Methodische Analyse

Die nachfolgende Analyse basiert auf *Mettler et al. 2010* und nimmt eine Klassifizierung der identifizierten Reifegradmodelle anhand der Kriterien *Herkunft*, *Architektur*, *Anwendung* und *Zuverlässigkeit* vor.

Durch die methodische Analyse konnte festgestellt werden, dass der Großteil (14) der Reifegradmodelle der Wissenschaft entstammen. In ca. 91 % der ausgewählten Beiträge handelt es sich um Textbeschreibungen der Modelle und nur in einem Fall handelt es sich um einen Fragebogen. In vier weiteren Fällen ist eine Kombination aus einer Textbeschreibung sowie einem Fragebogen identifiziert worden. Keines der Reifegradmodelle weist eine formale Architektur mit umfassend definierten Kriterien zur Reifegradbewertung auf. Die Selbstbeurteilung wird in 14 von 22 Beiträgen zu Bewertungszwecken genutzt und nur acht Modelle setzen die Bewertung durch Dritte ein. Dies sind vorrangig Beratungsunternehmen, welche die Modelle auch zur Neukundenakquise anwenden. Ein Indiz der geringen Standardisierung in diesem Forschungsfeld ist, dass keines der identifizierten Reifegradmodelle als Zertifizierungsgrundlage dient. Darüber hinaus lässt die mangelnde Evaluierung von 19 Modellen darauf schließen, dass diese methodisch nicht ausreichend fundiert sind. Daher wird der Bedarf nach einem evaluierten Modell mit einem evaluierten Entwicklungsprozess ersichtlich.

Inhaltliche Analyse

Die inhaltliche Analyse umfasst die Untersuchung der einzelnen Dimensionen, Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren der identifizierten Modelle. Dabei werden die relevanten Themenbereiche, welche die Reifegradmodelle adressieren, ermittelt und auf das spezifizierte Forschungsfeld der digitalen Geschäftsprozesse abgeleitet. Dabei wurde das Modell von *Anderl et al. 2015* aus der inhaltlichen Analyse ausgenommen, da dieses eine unklare Architektur aufweist. Somit bezieht sich die inhaltliche Analyse auf 21 verbleibende Reifegradmodelle. Diese wird im Anhang des Beitrags (Tabelle 4) durch eine Konzeptmatrix nach *Webster und Watson 2002* dargestellt, die einen systematischen Vergleich ermöglicht.

Die Konzeptmatrix visualisiert die unterschiedlichen thematischen Schwerpunkte der identifizierten Modelle und zeigt die relevantesten Dimensionen: *Prozess*, *IT-System*, *Produkt*, *Daten* und *Organisation*. Darüber hinaus werden die zentralen Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren der Modelle detailliert (s. Tabelle 4, Spalte 2). Zur Gewinnung dieser Darstellung sind die unterschiedlichen Fachbegriffe, die in den Modellen zur Bezeichnung der digitalisierungsrelevanten Gegenstandsbereiche verwendet werden, in Bezug auf Homonyme und Synonyme untersucht worden. Durch die Einführung einer Vorzugsbenennung (*Drewer und Schmitz 2017*) konnten bestehende Begriffsunterschiede zwischen den unterschiedlichen Reifegradmodellen abgebaut werden.

Die Matrix in Tabelle 4 verdeutlicht, dass die Modelle verschiedene Schwerpunkte setzen, es jedoch in einigen Punkten starke Überschneidungen gibt. Dabei wird das *Produkt* aber von der bestehenden Literatur am wenigsten als Digitalisierungsaspekt und eigenständige Dimension erwähnt. Innerhalb der identifizierten Dimensionen werden die Reifegradindikatoren der *Kommunikation/Vernetzung* sowie das *Informations- und Datenmanagement* als wesentlich für die Digitalisierung dargestellt. Der Reifegradindikator *Technologie* sowie die Dimension *Daten* und die Reifegradindikatoren *Automatisierung*, *Datengetriebene Prozesse*, *IT Integration*, *(IT-)Sicherheit*, die *Digitalisierungsstrategie* und die *Menschen* innerhalb der Organisation werden als bedeutsam für die Digitalisierung der Unternehmen und dessen Geschäftsprozesse ermittelt.

Synthese der Ergebnisse aus der Literaturanalyse

Neben den analysierten Reifegradmodellen konnten durch die 22 weiteren Beiträge aus der SLA die ermittelten Dimensionen und Reifegradindikatoren bestätigt werden und darüber hinaus noch folgende weitere Indikatoren für digitale Geschäftsprozesse identifiziert werden:

- Überwachung und Steuerung der Prozesse (*Lödding et al. 2017*),
- Applikationen wie ERP, SME, mobile Apps, Big Data und Künstliche Intelligenz (*Basl 2018*),

- autonome Prozesse (Lichtblau et al. 2015) und autonome Systeme (Kleemann u. Glas 2017),
- Sensoren und Aktuatoren (Akdil et al. 2018) sowie
- veränderte Mitarbeiterqualifikationen (Koch et al. 2014).

Auch die theoretischen Grundlagen der Digitalisierung und der digitalisierten Geschäftsprozesse weisen die gleichen Indikatoren auf. Hierzu zählen insbesondere:

- Automatisierung,
- IKT,
- Vernetzung,
- digitale Überprüfung der Prozesse,
- vereinfachte Prozessstandardisierung,
- digitale Daten,
- Schnittstellenmanagement,
- Prozessqualität,
- Basistechnologien wie Internet, Big Data, sowie Cloud-Computing,
- Echtzeitdatenmanagement,
- Integration und Interoperabilität,
- durchgängige Geschäftsprozesse und
- Daten- und Systemsicherheit.

ENTWICKLUNG DES REIFEGRADMODELLS

Struktur des Reifegradmodells

Die Digitalisierung von Geschäftsprozessen ist eine Transformation, die stufenweise umgesetzt werden kann. Dieser schrittweise Ansatz führt zu einem Leitfaden für die Unternehmen und verringert gleichzeitig die Risiken für die Investitionen und die Implementierung neuer Techniken und Prozesse. Darüber hinaus weisen die einzelnen Handlungsfelder der Digitalisierung der Geschäftsprozesse wechselseitige Abhängigkeiten auf, sodass ein schrittweises Vorgehen zielführend ist.

Abbildung 2 stellt die Struktur des neuen Reifegradmodells dar. Die *Reifegraddimensionen* (innerer Ring) stellen die übergeordneten Digitalisierungsfelder der Geschäftsprozesse dar. Diese sind untergliedert in *Sub-Dimensionen* (mittlerer Ring). Die *Reifegradindikatoren* (äußerer Ring) werden jeweils bewertet, um den *Gesamtreifegrad* (Ringkern) Bottom Up zu ermitteln. Das Reifegradmodell umfasst insgesamt drei Reifegraddimensionen (Dimensionen), welche durch die Bewertung von 27 Reifegradindikatoren innerhalb der neun Sub-Dimensionen festgelegt werden. Die Bewertung erfolgt auf jeder Ebene des Reifegradmodells anhand von fünf Reifegradstufen.

Das Reifegradmodell

Die Prozessdigitalisierung erfordert einen Ansatz, der nicht singular den Einsatz neuer Technologien fokussiert, sondern vielmehr ein Handlungsprogramm aus Technologien und strategischen, organisatorischen und kulturellen Anpassungen entwickelt. Daher sollen die im folgenden vorzustellenden Reifegradstufen und Dimensionen eine ganzheitliche Bewertung der digitalen

Reife der Geschäftsprozesse eines Unternehmens ermöglichen. Hierzu werden zunächst die *Reifegradstufen* entwickelt. Anschließend werden im zweiten Schritt die *Dimensionen*, *Sub-Dimensionen* und *Reifegradindikatoren* definiert.

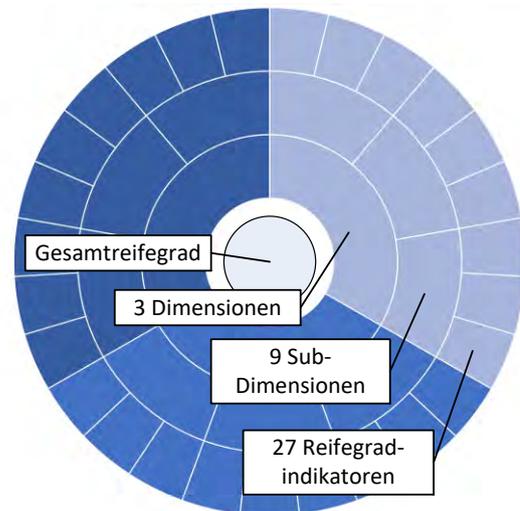


Abbildung 2: Struktur des Reifegradmodells

Reifegradstufen

Reifegradmodelle umfassen in der Regel drei bis sechs Stufen, welche einen idealtypischen, schrittweisen Verbesserungsprozess darstellen (Kamprath 2011). Innerhalb bestehender Reifegradmodelle wird ein gemeinsames Gestaltungsprinzip genutzt, welches die Reife als eine Reihe von kumulativen Phasen darstellt, in denen höhere Stufen auf den Anforderungen niedrigerer Stufen aufbauen, wobei *Stufe 1* eine niedrige und *Stufe 5* eine hohe Reife darstellen. Das entwickelte Modell nutzt diese kumulative, eindimensionale Stufenstruktur und ist demnach dem gestuften Reifegradprinzip zuzuordnen. Das bedeutet, dass ein Unternehmen eine Reifegradstufe erreicht, wenn es sämtliche Anforderungen dieser Stufe erfüllt hat und demnach auch die Anforderungen sämtlicher niedrigerer Reifegradstufen bereits erfüllt (de Bruin et al. 2005). Der Reifegrad einer Sub-Dimension wird somit durch den kleinsten Reifegrad der drei zugehörigen Reifegradindikatoren (Abbildung 2) ermittelt. Erreichen beispielsweise zwei Reifegradindikatoren den Reifegrad 3, ein Reifegradindikator aber nur den Reifegrad 2, so erreicht die gesamte Sub-Dimension lediglich den Reifegrad 2.

Die Spezifikation von Reifegradstufen wird im Rahmen dieser Arbeit Top Down vorgenommen, da es sich um ein relativ wenig entwickeltes Themengebiet handelt. Bei diesem Verfahren werden zuerst die unterschiedlichen Reifegradstufen definiert und anschließend relevante Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren ermittelt. Zunächst sind somit die Reifegradstufen durch Explikation ihrer Anforderungen zu definieren.

Die Stufen basieren auf dem *Capability Maturity Model Integration* (CMMI)-Modell, das in vielen digitalisierungsbezogenen Reifegradmodellen als Basis für die

Stufenbildung genutzt wird und den Fokus auf die Geschäftsprozesse legt. Die CMMI-Stufen werden der angepassten CMMI-Version DREAMY entnommen. Dabei handelt es sich um fünf Reifegradstufen zur Bewertung des Digitalisierungsgrades von Geschäftsprozessen, die – aufbauend auf der untersuchten Literatur – wie folgt ausformuliert werden:

Stufe 1: Initial: Der Geschäftsprozess und die Systeme sind gar nicht oder wenig standardisiert und dokumentiert. Das Prozessmanagement ist reaktiv und verfügt nicht über die richtigen organisatorischen und technischen Konzepte bzw. Werkzeuge für den Aufbau einer digitalen Infrastruktur, welche eine Prozessagilität ermöglicht. Im Unternehmen wird externe Digitalkompetenz genutzt, da keine interne Expertise vorhanden ist.

Stufe 2: Managed: Der Geschäftsprozess ist teilweise digitalisiert und standardisiert. Durch Mängel in der Organisation und/oder den Basistechnologien ist das Prozessmanagement schwach ausgeprägt. In einzelnen Abteilungen oder Prozessschritten ist eine Auseinandersetzung mit digitalen Lösungen und deren Einführung erkennbar. Jedoch herrscht eine geringe Akzeptanz für die entwickelten Insellösungen.

Stufe 3: Defined: Durch zunehmende Kompetenzen im Unternehmen werden umfassendere Lösungen für die Prozessausführung entwickelt. Es herrschen jedoch weiterhin einige Einschränkungen der organisatorischen Verantwortlichkeiten und/oder der Basistechnologien, welche die digitale Umsetzung des Prozessmanagements begrenzen. Daher bestehen noch Mängel in der Planung und Durchführung der Prozesse sowie bei der Integration und Interoperabilität zwischen den Anwendungen und im Informationsaustausch.

Stufe 4: Integrated and interoperable: Die Prozesse werden nun End-to-End mit einem hohen Standardisierungsgrad innerhalb des Unternehmens ausgestaltet. Die Prozesse sind auf die Integration und Verknüpfung der Systeme und Daten angewiesen, damit sie (teil-)automatisiert ablaufen können. Mit den steigenden Kompetenzen der Prozessbeteiligten steigt auch die Akzeptanz der digitalisierten Prozesse und die digitale Arbeitskultur unterstützt das Unternehmen bei der Zielerreichung. Die Digitalisierung der Geschäftsprozesse wird als strategisch wichtig wahrgenommen.

Stufe 5: Digital-oriented: Die Geschäftsprozesse sind umfassend digital ausgerichtet und basieren auf einer widerstandsfähigen Technologieinfrastruktur und einer umfassenden Integration sämtlicher Systeme und Daten. Sowohl der Informationsaustausch als auch die Systemlandschaft sind stark standardisiert und durch umfassende Sicherheitskonzepte über Unternehmensgrenzen hinweg abgesichert. Sämtliche Datenanalysen werden automatisiert durchgeführt und fließen autonom in die Prozessoptimierung der verknüpften Systeme und Ma-

schinen ein. Die große Digitalkompetenz aller Prozessbeteiligten wird durch einen optimalen Informationsfluss und ein explizites Wissensmanagement aufrechterhalten.

Dimensionen, Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren

Zur Bewertung der Geschäftsprozesse sind nun die unterschiedlichen, strukturbildenden Dimensionen des Reifegradmodells sowie deren Sub-Dimensionen und Indikatoren zu erörtern. Einen vollständigen Überblick über die einzelnen Elemente hierzu liefert Tabelle 3.

Dimension	Sub-Dimensionen	Reifegradindikatoren
IT-Systeme	IT Integration	Horizontale IT-System Integration
		Vertikale IT-System Integration
		Standardisierung
	Sicherheit	IT-Sicherheit
		Sicherheitsmechanismen
		Widerstandsfähige IT-Infrastruktur
	Technologie	Technologiebasis
Prozesstechnologien		
Vernetzung der Prozesse		
Daten	Informations- und Datenmanagement	Datenanalyse/ Data Mining/ Big Data
		Wissensmanagement/ Informationsfluss
		Datenvisualisierung
	Datenanforderungen	Datenqualität
		Digitale & analoge Dokumente
		Datensicherheit
	(Echtzeit-) Datennutzung	Nutzung von Informationen/Daten
Datengetriebene Prozesse		
Integrierte Leistungserbringung		
Organisation	Digitalisierungsstrategie	Strategiekompatibilität der Prozesse
		Echtzeitdatenbasierte Entscheidungsfindung
		Digitales Management
	Digitales Geschäftsprozessmanagement	Prozesstransparenz
		Prozesssimulation
		Prozessqualität
	Change Management	Menschen
Kultur		
Kompetenzen und Expertise		

Tabelle 3: Dimensionen, Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren des entwickelten Reifegradmodells

Dimension IT-Systeme

Die zur Digitalisierung notwendigen IT-Systeme sollten einen hohen Standardisierungsgrad aufweisen, um eine einwandfreie Nutzung zu gewährleisten und gleichzeitig eine Systemvernetzung zu ermöglichen. Eine IT-Integration ist Voraussetzung für die Durchgängigkeit der Prozesse, die im Idealfall als End-to-End-Prozesse ausgeführt werden können. Da störungsfreie Prozessabläufe auf die IT-Systeme angewiesen sind, ist auch deren Sicherheit und die widerstandsfähige Infrastruktur in die Bewertung des Reifegrades miteinzubeziehen. Für vernetzte Systeme sind weitere Digitalisierungstechnologien in den Geschäftsprozessen notwendig, um etwa die Systeme mit Maschinen (S2M) oder die Maschinen untereinander (M2M) zu verknüpfen – und somit auch die Prozesse untereinander zu vernetzen. Im Anschluss werden die Sub-Dimensionen dieser Dimension erläutert.

IT-Integration: Wesentlich zur Beurteilung der digitalen Geschäftsprozessreife sind die IT-Systeme und deren Integrationsgrad in die Geschäftsprozesse. Dabei wird die *horizontale Integration* über verschiedene IT-

Systeme hinweg bewertet, sodass die unternehmensinternen und insbesondere auch unternehmensübergreifende Verknüpfungen der einzelnen Prozessschritte verbessert werden können. Das Ziel der Integration verschiedener IT-Systeme derselben Hierarchieebene ist eine effizientere Wertschöpfung. Es wird angestrebt eine durchgängig automatisierte Wertschöpfung durch die Direktion sämtlicher internen sowie unternehmensübergreifenden Ressourcen zu erreichen.

Die *vertikale Integration* ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt für die Geschäftsprozessdigitalisierung. Es entsteht über den gesamten Geschäftsprozess hinweg ein großes Volumen gesammelter Daten (z. B. Event Logs). In diesem Zusammenhang umfasst die vertikale Integration die Verknüpfung verschiedener IT-Systeme über Hierarchieebenen hinweg, sodass die Maschinenebene und die IT-Systeme der Planungsebene Daten untereinander austauschen können. Dies ermöglicht ein besseres Prozessverständnis und die Auflösung der Hierarchiestrukturen der IT-Systeme (Camarinha-Matos et al. 2017; Zehbold 2018). Darüber hinaus wird der Reifegradindikator der *Standardisierung* der IT-Systeme beurteilt, welcher auch die Durchgängigkeit der IT-Unterstützung der Geschäftsprozesse bewertet. Dabei sind auch die Medienbrüche zwischen den Systemen bzw. Schnittstellenlösungen zu betrachten.

Sicherheit: Da durch die steigende Verknüpfung und Abhängigkeit der Systeme Angriffe zu großen Schäden führen können, ist Sicherheit von zunehmender Bedeutung. Zunächst wird die *IT-Sicherheit* beurteilt, d.h. die Absicherung der IT-Systeme und Schnittstellen durch ein Sicherheitskonzept. Umfassende Sicherheitslösungen sichern sämtliche Systeme, Systemschnittstellen und auch die Cloud-Lösungen ab.

Der zweite Reifegradindikator umfasst *Sicherheitsmechanismen*, die Zugriffe auf Systeme und Maschinen innerhalb des Geschäftsprozesses durch mobile Geräte sowie auf das Internet absichert. Darüber hinaus wird beurteilt, wie *widerstandsfähig* die IT-Struktur gegen Angriffe von außen (z. B. Hackerangriffe) ist und ob es Konzepte zum Aufbau der notwendigen Widerstandsfähigkeit im Unternehmen gibt.

Technologie: Die Sub-Dimension der Technologie bewertet den Einsatz neuer Technologien im Rahmen des Geschäftsprozesses. Der Reifegradindikator *Technologiebasis* bewertet, ob die In- und Outputkanäle der Geschäftsprozesse analog bzw. papierbasiert oder digital sind (Bitkom e.V. o.J.). Das Kriterium der *Prozesstechnologien* beurteilt die Unterstützung der Prozessausführung durch Digitalisierungstechnologien, wie etwa durch Robotic Process Automation (RPA), d.h. der robotergesteuerten Prozessautomatisierung (Appelfeller u. Feldmann 2018, Czarnecki et al. 2019). Ein wesentlicher Faktor für den Einsatz der Digitalisierungswerkzeuge ist die *Vernetzung* sämtlicher Prozessschritte, sodass eine Automatisierung und die Digitalisierung des gesamten Geschäftsprozesses erst möglich werden.

Dimension Daten

Geschäftsprozesse basieren im digitalen Kontext auf Daten und Informationen, die es ermöglichen, Prozesse zu verknüpfen, zu automatisieren oder autonom auszuführen. Daher sind Daten zur optimalen Ausführung der Prozesse essentiell. Dementsprechend sind wesentliche Anforderungen an die Daten zu stellen, die damit eine wichtige Beurteilungsgrundlage für die Digitalisierung der Geschäftsprozesse darstellen. Auch die (Echtzeit-)Datennutzung durch die Geschäftsprozesse ist ein Indiz für die Ausprägung der Digitalisierung, da die effektive Nutzung der Daten die Vorteile der digitalen Technologien erst ermöglicht. Dabei wird die Flexibilität des gesamten Unternehmens durch zeitnahe Reaktionsmöglichkeiten gesteigert. Die entsprechenden Sub-Dimensionen Informations- und Datenmanagement, Datenanforderungen und (Echtzeit-) Datennutzung werden nun detailliert erörtert.

Informations- und Datenmanagement: Bei der *Datenganalyse* werden Daten verarbeitet, um sie in nützliche Informationen umzuwandeln, die beispielsweise für Entscheidungs-, Steuerungs- und Kontrollzwecke verwendet werden können. Es wird bewertet, ob dazu fortgeschrittene und automatisierbare Analysetechniken wie etwa Process Mining, Data Mining oder Big Data genutzt werden oder ob Datenanalysen noch manuell durchgeführt werden.

Anschließend wird das Kriterium des notwendigen *Informationsflusses* beurteilt. Damit analysierte Daten und daraus resultierende Erkenntnisse nutzbar werden, müssen sie über den gesamten Geschäftsprozess hinweg verteilt werden. Um Informationen dementsprechend unternehmensweit zu verwalten, zu integrieren, zu verbessern und zu nutzen, sind eine Reihe von Strukturen, Richtlinien, Prozessen und Standards erforderlich. Durch klare Richtlinien und Verantwortlichkeiten im Rahmen eines transparenten, gemeinsamen Lernens und der Erforschung von Best Practice-Ansätzen kann ein optimaler Informationsfluss und Informationsnutzen geschaffen werden. Es umfasst die effektive Einhaltung aktueller und zukünftiger Anforderungen auf regulatorischer, rechtlicher, privater, Sicherheits-, Risiko-, Betriebs- und Geschäftsebene im gesamten Unternehmen in Übereinstimmung mit den Unternehmenszielen.

Darüber hinaus ist ein umfangreiches *Wissensmanagement* sinnvoll, damit das generierte Wissen aus den einzelnen Informationen im gesamten Unternehmen verteilt wird und sämtliche Prozessbeteiligte das erforderliche Know-how im Umgang mit Informationen erlangen. Das Wissensmanagement umfasst die Identifikation, Erfassung, Entwicklung, sowie gemeinsame und effektive Nutzung des Wissens im Unternehmen. Dazu sind Rollen und Verantwortlichkeiten klar zu definieren und Strategien, Prozesse und Ansätze für dessen Umsetzung, Überwachung und Verbesserung standardisiert einzuführen. Flankierend hierzu sind Lösungen zur *Datenvisualisierung* erforderlich, um eine intensivere Nutzung relevanter Informationen in Entscheidungs- und

Steuerungsprozessen zu forcieren, z. B. mithilfe personalisierter Dashboards.

Datenanforderungen: Diese Sub-Dimension bewertet den Umfang der definierten Daten- und Informationsanforderungen, d.h. inwiefern diese festgelegt und in den Geschäftsprozessen integriert werden, um die Ziele des Unternehmens zu unterstützen. Dazu müssen stets die relevanten, aktualisierten und zuverlässigen Informationen entsprechend der Bedürfnisse der Benutzer bereitgestellt werden. Die *Datenqualität* stellt einen grundlegenden Faktor dar, der von Unternehmen zur Unterstützung ihrer Geschäftstätigkeit zu berücksichtigen ist, da Prozesse und Entscheidungen qualitätsgesicherte Daten erfordern. Infolgedessen ist die Datenqualität ein wichtiger Indikator zur Bewertung der digitalen Reife der Geschäftsprozesse. Die Datenqualität wird maßgeblich durch die Korrektheit, Vollständigkeit, Konsistenz und Aktualität bewertet.

Die Sicherstellung der Datenqualität ist ein komplexes Thema, das ein effektives Zusammenspiel von Methodik, Standards, Sozialkompetenz und Technologie voraussetzt. Darüber hinaus stellt die Standardisierung ein wesentliches Merkmal dar. Dazu gehört auch die Einrichtung von Datentaxonomien und Standards für die Bereiche Definition, Kodierung und den Datenaustausch. Darüber hinaus wird beurteilt, in welchem Umfang die technologischen Werkzeuge und Ressourcen des Unternehmens zum Datenqualitätsmanagement genutzt werden. Um eine hohe Qualität der Daten des Unternehmens zu gewährleisten, müssen strukturierte und systematische Techniken und Protokolle eingesetzt werden. Des Weiteren wird die Anforderung beurteilt, ob die Daten und Dokumente in *digitaler* oder *analoger Form* vorgehalten werden. Diese Anforderung hängt eng mit der Datenqualität und deren Überprüfung zusammen. Liegen die Daten zu einem Großteil in analoger Form vor, so ist die Überprüfung größtenteils manuell durchzuführen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Sub-Dimension Datenanforderungen ist die *Datensicherheit*. Mithilfe der Datensicherheit wird gewährleistet, dass Geschäftsprozesse nicht durch Angriffe unterbrochen werden können. Da die Daten als der Rohstoff des 21. Jahrhunderts bezeichnet werden, ist auch die Gefahr des Raubes und des Missbrauches sehr hoch (Sondergaard 2011). Deshalb wird beurteilt, ob und in welchem Umfang ein Sicherheitskonzept für Daten im Unternehmen vorhanden ist. Es ist ein umfassendes Sicherheitskonzept zu erstellen, welches etwa Docker-Container und abgesicherte Cloud-Lösungen umfasst. Die Container sind eine Art Behälter, in denen Daten und weitere notwendige Komponenten für sämtliche Anwendungen der jeweiligen Betriebssysteme im Unternehmen gespeichert sind. So kann ein abgesicherter Zugriff auf sämtliche Anwendungen mit qualitätsgesicherten Daten etabliert werden. Die Cloud umfasst eine internetbasierte Infrastruktur, welche es Unternehmen ermöglicht, Speicherplatz, Rechenleistung oder Anwendungssysteme zur

Geschäftsprozessunterstützung online zur Verfügung zu stellen und bedarfsgerecht zu skalieren.

(Echtzeit-)Datennutzung: In dieser Sub-Dimension wird beurteilt, wie die Informationen präsentiert und verwendet werden und ob neuartige, agile, verständliche und nützliche Zugriffstechniken geboten werden. Die *Informationsverwendung* bezieht sich dabei auf die Art und Weise, in der die Informationen (verarbeitete Daten) eines Unternehmens und Wissen (Erfahrungswerte aus dem Wissensmanagement) sowie Know-how in den Prozessen zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden. Im Rahmen der Datennutzung sind auch Techniken des Process Mining zu berücksichtigen, die es ermöglichen, die Istgeschäftsprozesse anhand betrieblicher Realdaten (z. B. Event Logs) induktiv zu modellieren, zu überwachen und in Bezug auf zentrale Zielgrößen (z. B. Durchlaufzeit, Prozesskosten) auszuwerten (van der Aalst 2009). Im Rahmen des Reifegradmodells ist daher zu bewerten, in welchem Umfang diese *datengetriebenen Techniken* im Unternehmen zur Prozessoptimierung eingesetzt werden.

Als dritter Reifegradindikator dieser Sub-Dimension wird die *integrierte Leistungserbringung* bewertet. Damit ist die direkte Nutzung sämtlicher Daten in dem Prozess der Leistungserbringung adressiert, wie etwa das Feedback eines Kunden, welches umgehend in der Produktentwicklung und in der Produktion umgesetzt wird.

Dimension Organisation

Die digitale Transformation basiert auf der Wissensentwicklung und -weitergabe innerhalb eines Unternehmens (Margherita u. Petti 2010). Daher ist das *Change Management* zu betrachten, um sowohl die digitale Kultur als auch die Expertise fördern zu können. Zudem ist die Ausrichtung der Geschäftsprozesse an einer übergeordneten Digitalisierungsstrategie ein wesentlicher Faktor zur Beurteilung der Digitalisierungsreife. Die Dimension der Organisation umfasst darüber hinaus das Geschäftsprozessmanagement, welches einer digitalen Transformation unterzogen wird. Nicht zielführend ist es, komplexe und mit Verschwendung behaftete Prozesse zu digitalisieren, da dies einen schlechten digitalisierten Prozess ergibt (Wiegand 2018).

Digitalisierungsstrategie: In dieser Sub-Dimension wird beurteilt, ob eine Digitalisierungsstrategie vorliegt und ob die Geschäftsprozesse bereits kompatibel zur Digitalisierungsstrategie ausgerichtet sind. Es gilt die *Strategiekompatibilität* der Prozesse zu bewerten, d.h. inwieweit die Ziele der Strategie mit der Ausführung der Prozesse unterstützt werden können.

Das zweite Kriterium ist die *datenbasierte Entscheidungsfindung*, welche bewertet, in welcher Art und Weise die organisatorischen Entscheidungen in einem systematischen und geplanten Prozess getroffen werden – unterstützt durch nützliche und verwertbare Informationen, die sich aus der Analyse der gesammelten Daten ergeben. Das *digitale Management* umfasst die Ele-

mente, die vorhanden sein müssen, damit der Entscheidungsprozess präzise, objektiv und effizient durchgeführt wird. Es wird beurteilt, in welchem Umfang das Management strategische Entscheidungen für die Prozessausgestaltung und für mögliche Prozesstechnologien mithilfe von Prozesssimulationen und sämtlichen zur Verfügung stehenden Informationen trifft. Dadurch wird wiederum die Entwicklung einer informationsgestützten Kultur und ein angemessenes Management gefördert.

Digitales Geschäftsprozessmanagement: Bei der Beurteilung des digitalen Geschäftsprozessmanagements wird erfasst, inwieweit bereits eine Digitalisierung umgesetzt wurde und demnach neue Maßnahmen zur Optimierung der Geschäftsprozesse angewandt werden. Ein zusätzliches Ziel im Rahmen der Digitalisierung ist es, dass die Prozessschritte die Anforderungen sämtlicher Technologien und Digitalisierungswerkzeuge erfüllen, sodass diese agil und schnell in die Prozesse integriert werden können. Dazu ist eine hohe Transparenz der Prozesse wesentlich. Diese wird durch Prozessbeschreibungen nach den Grundsätzen der ordnungsgemäßen Modellierung (GoM) oder durch Process Mapping geschaffen, sodass alle Prozesse detailliert dokumentiert sind. Zur besseren Anwendung und Optimierung ist auch die Dokumentation zu digitalisieren.

Im Rahmen des digitalen Geschäftsprozessmanagements sind häufig Entscheidungen über Anpassungen der einzelnen Prozessschritte oder einzelner Maschinen, Systeme oder Technologien notwendig. Diese werden bei einem digitalen Geschäftsprozessmanagement durch *Prozesssimulationen* unterstützt, sodass optimale Prozesskonfigurationen identifiziert werden können. Sind demnach einfache Anpassungen der Konfiguration von Systemen und Maschinen vorzunehmen, werden diese bei digitalen Geschäftsprozessen hoher Reife autonom im Anschluss an die Simulation an die betroffenen Systeme weitergeleitet und möglichst autonom umgesetzt. Aufgrund steigender Komplexität in der VUCA-Welt ist die *Prozessqualität* von hoher Relevanz und schlechte Prozesse sind zu eliminieren (Dirks 2015). Die Qualität geht mit der Standardisierung der Prozesse einher, die ebenfalls die Komplexität reduziert. Außerdem ist die End-to-End-Prozessausgestaltung qualitätsrelevant. Sind sämtliche Prozesse durchgängig gestaltet, treten keine Fehler und Schnittstellenprobleme auf. Auch der Automatisierungsgrad, d.h. der Anteil der automatisierten Prozessschritte, ist ein Attribut der Prozessqualität und wird daher zur Reifebeurteilung betrachtet. Zwar bedeutet ein automatisierter Prozess nicht zwangsläufig, dass dieser auch in gleichem Maß digital ist, jedoch ist von einer hohen Korrelation auszugehen, sodass die Automatisierung auch als Indikator für die Digitalisierung zu sehen ist (Appelfeller u. Feldmann 2018). So ist bei einem vollautomatisierten Prozess, dessen Prozessschritte zu 100 % automatisiert ausgeführt werden, die Anforderung erfüllt, dass sämtliche Prozessdaten auch in digitaler Form vorliegen.

Change Management: Zur Beurteilung der digitalen Reife der Geschäftsprozesse ist auch zu bewerten, inwieweit die digitale Transformation auch im Rahmen der *Kultur* und bei den *Menschen* umgesetzt wird. Daher ist ein Change Management zu erwarten, welches die Maßnahmen zur Anpassung an die digitalen Prozesse fördert. Mitarbeiter tragen im Unternehmen die digitale Transformation mit und haben eine zentrale Rolle in den Veränderungsprozessen (Spath et al. 2013).

Um Frustration und Überforderung bei den Mitarbeitern zu vermeiden und die Akzeptanz der digitalisierten Prozesse zu erhöhen, sollten die Prozessbeteiligten frühzeitig eingebunden und ihr Knowhow für die Ausgestaltung und das Vorgehen berücksichtigt werden. Ansonsten entsteht häufig das Gefühl, dass das Unternehmen sich so ausrichtet, dass die Mitarbeiter zukünftig nicht mehr benötigt, ihre Kompetenzen nicht wahrgenommen und Maschinen und Systeme als effektiver empfunden würden. Im Kern geht es nicht nur um Akzeptanz, sondern auch um die Qualität des Prozesses sowie der Ergebnisse. Neben einer rechtzeitigen Einbindung ermöglicht der Aufbau von digitalen *Kompetenzen* der Prozessbeteiligten, dass diese den Changeprozess zur Digitalisierung aktiv unterstützen. Dabei handelt es sich um Anpassungen der erforderlichen Kompetenzen und inwieweit Unternehmen diese vermitteln können. Daher ist bei der Rekrutierung neuer Mitarbeiter darauf zu achten, dass diese eine digitale Affinität aufweisen sowie die bestehenden Prozessbeteiligten weitergebildet und stetig über den aktuellen Stand informiert werden. Zudem ist interne Expertise zur Thematik der Digitalisierung aufzubauen, damit keine Abhängigkeit von externen Beratern besteht.

Ein weiterer Reifegradindikator der Sub-Dimension ist die *digitale Kultur* im Unternehmen. Es ist eine Anpassung der Kultur an die Prozessdigitalisierung anzustreben und vom Management aktiv vorzuleben, die etwa eine konstruktive Fehlerkultur erlaubt, um eine schnellere und agilere Ausführung und Entwicklung zu unterstützen.

EVALUATION

Evaluation des Entwicklungsprozesses

Die Anforderungen an die Entwicklung eines Reifegradmodells nach *Becker et al. 2009a*, welche im Wesentlichen auf den Leitlinien der Design Science Research nach *Hevner et al. 2004* basieren, bilden den konzeptionellen Bezugsrahmen für den ersten Evaluations-schritt. Damit wird das *Vorgehen* der Reifegradmodellentwicklung evaluiert. Diese Anforderungen sind überwiegend dichotom bewertbar:

Bewertung Anforderung 1: Der notwendige *Abgleich mit existierenden Reifegradmodellen* wurde umfassend mit einer systematischen Literaturanalyse durchgeführt.

Bewertung Anforderung 2: Das *iterative Vorgehen* wurde im Rahmen der Modellentwicklung erfüllt, indem ein Top Down-Vorgehen zur Konzeption der Reifegradstufen und der Dimensionen bzw. Sub-Dimensionen angewandt wurde.

Bewertung Anforderung 3: Die *Evaluation* des Modells wird ex post durchgeführt, sodass diese Anforderung ebenfalls als erfüllt zu bewerten ist.

Bewertung Anforderung 4: Die Anforderung des *multimethodischen Vorgehens* bei der Entwicklung von Reifegradmodellen wird durch die unterschiedlichen Methoden bei der systematischen Literaturanalyse, der zusätzlichen exemplarischen Anwendung des Modells zur Evaluation und der Ableitung weiterer Anhaltspunkte zur Weiterentwicklung des Modells erfüllt.

Bewertung Anforderung 5: Die *Problemrelevanz* und damit die Notwendigkeit des Modells wurde umfassend expliziert.

Bewertung Anforderung 6: Das *definierte Problem* wurde mithilfe einer explorativen Literatursuche identifiziert und durch die SLA bestätigt.

Bewertung Anforderung 7: Die *adressatengerechte Bereitstellung des Modells* wurde durch die detaillierte Erläuterung der Reifegradstufen, Dimensionen, Sub-Dimensionen und Reifegradindikatoren erfüllt. Darüber hinaus wurde zur effizienten Anwendung des Modells in der Unternehmenspraxis ein Excel-basiertes Selbstbewertungssystem einschließlich eines adressatengerechten Fragebogens zur Datenerhebung entwickelt.

Bewertung Anforderung 8: Auch die Anforderung der *wissenschaftlichen Dokumentation* über den gesamten Entwicklungsprozess ist erfüllt.

Somit werden sämtliche Anforderungen der Reifegradmodellentwicklung erfüllt, sodass der Entwicklungsprozess als wissenschaftlich fundiert zu bewerten ist.

Evaluation des Entwicklungsergebnisses

Die Ergebnisevaluation fokussiert die Kriterien *Relevanz* des Themas, *Verständlichkeit* des Modells, *Vollständigkeit* der Dimensionen, *Konsistenz* der Ausprägungen pro Dimension und die *Nützlichkeit* des Reifegradmodells. Zur Fundierung der Evaluation wurden drei Akteure aus einem Anwenderunternehmen des Industriesektors mithilfe des Excel-basierten Selbstbewertungssystems befragt, sodass eine erste Evaluation im Feld vorliegt.

Abbildung 3 zeigt einen Auszug aus dem Fragebogen für die Sub-Dimension *Technologie* durch die Bewertung der beiden Reifegradindikatoren *Technologiebasis* und *Prozesstechnologien*. Damit erfolgt die Bewertung der Geschäftsprozesse für die einzelnen Reifegradindikatoren auf den Stufen 1 bis 5. Durch die Aggregation dieser Bewertungen kann der Reifegrad auf Ebene der einzelnen Sub-Dimensionen ermittelt werden, indem die kleinste Stufe der zugehörigen Reifegradindikatoren als Ergebnis gewertet wird. So wird eine pessimistische Bewertung des Reifegrades erzielt, um in der Praxis eine Sicherstellung der Digitalisierung sämtlicher Bereiche anzustreben. Würde hingegen die höchste Stufe der Reifegradindikatoren zur Aggregation verwendet werden, können vereinzelt Digitalisierungslücken im Unternehmen entstehen. Anschließend werden sowohl der Median der beschriebenen drei Sub-Dimensionen zur Bestimmung der Reifegrade der einzelnen Dimensionen als auch der Median dieser Dimensionen zur Ermittlung

des Gesamtreifegrades verwendet. Abbildung 4 verdeutlicht diese Bewertung für den Evaluationsfall. Dabei kann der Reifegrad der Sub-Dimensionen auch einem Soll-Reifegrad gegenübergestellt werden, um bestehende Digitalisierungslücken transparent zu machen.

Die Evaluation durch Befragung der Unternehmensakteure als Anwender des Reifegradmodells liefert konvergierende Ergebnisse bezüglich der Evaluationskriterien:

- **Relevanz des Themas:** hochrelevant
- **Verständlichkeit:** sehr gut
- **Vollständigkeit:** sehr gut
- **Nützlichkeit zur Bestimmung Ist- & Soll-Position:** sehr gut
- **Nützlichkeit des Selbstbewertungssystems:** sehr gut
- **Nützlichkeit für Maßnahmenableitung:** nicht optimal.

		3		Anwärmöglichkeit	
				Trifft nicht zu	
8	1. Technologiebasis				
9	<i>Welchen Digitalisierungsgrad haben die In- und Outputkanäle der Prozesse?</i>				
10	Sämtliche In- und Outputkanäle sind analog bzw. papierbasiert	1	1	○	○
11	Vereinzelt sind die In- und Outputkanäle der Kernprozesse digital und nicht ausschließlich analog	2	2	○	○
12	Die In- und Outputkanäle der Kernprozesse sind innerhalb des Unternehmens auf digitaler Basis	3	3	●	○
13	Sämtliche In- und Outputkanäle aller unternehmensinternen Prozesse sind auf digitaler Basis	4	4	○	○
14	Sämtliche In- und Outputkanäle aller Prozesse auch über Unternehmensgrenzen hinweg sind auf digitaler Basis, sodass der Austausch mit Kunden und Lieferanten digitalisiert stattfinden kann	5	5	○	○
15					
16	2. Prozesstechnologien				
17	<i>In welchem Umfang werden Digitalisierungstechnologien zur Unterstützung der Prozessausführung eingesetzt?</i>				
18	Es werden keinerlei Technologien zur Prozessdigitalisierung eingesetzt	1	6	○	○
19	Es werden einfache Technologien in einzelnen Prozessabschnitten eingesetzt	2	7	○	○
20	Es werden einfache Technologien zur Prozessdigitalisierung in sämtlichen Geschäftsprozessen angewandt	3	8	○	○
21	Es werden effiziente und umfassende Digitalisierungstechnologien für sämtliche Prozesse im Unternehmen eingesetzt, z.B. werden RPA zur Automatisierung der Prozesse und/oder smarte Maschinen und Systeme eingesetzt	4	9	○	○
22	Umfassende Prozesstechnologien werden auch über Unternehmensgrenzen hinweg integriert zur Erreichung eines hohen Digitalisierungs- und Automatisierungsgrades, sodass Prozesse durch die Verknüpfung mit anderen Systemen und Zugriff auf sämtliche digitale Daten autonom ausgeführt werden können	5	10	○	○

Abbildung 3: Auszug aus dem Fragebogen zur Selbstbewertung des Digitalisierungsgrades

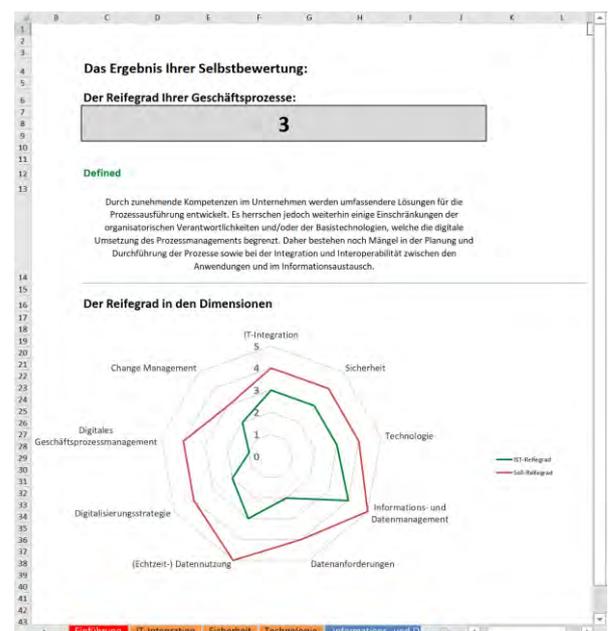


Abbildung 4: Ergebnis der Selbstbewertung im Excel-basierten Selbstbewertungssystem

AUSBLICK

Abschließend ist ein Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf der Thematik zu geben. Dabei stellt zunächst die zu vertiefende Analyse der einzelnen Handlungsfelder der Digitalisierung im erstellten Reifegradmodell einen weiterführenden Forschungsbedarf dar. Aufgrund der angestrebten Offenheit und Flexibilität der explorativen Methodik im Umgang mit dem bislang oberflächlich behandelten Forschungsfeld wurde das entwickelte Modell auf eine qualitative Inhaltsanalyse gestützt. Ein Ansatzpunkt zum Erkenntnisfortschritt bietet eine anschließende qualitative Absicherung, etwa durch Experteninterviews. Ergänzend dazu kann die Anwendung und Evaluation des Modells auf weitere Unternehmen ausgeweitet werden. Mithilfe von Forschungsfallstudien kann potenziell eine weitere Absicherung der Ergebnisse erzielt werden.

Im Rahmen der Evaluation konnte festgestellt werden, dass die einzelnen Elemente des Reifegradmodells nicht für alle Unternehmen von gleichwertiger Bedeutung sind. Die Relevanz einzelner Elemente kann beispielsweise vom Sektor, der Branche oder der Unternehmensgröße abhängig sein, womit ein weiteres Untersuchungsfeld gebildet wird. Außerdem wurde bereits durch die Bewertung der Anwender deutlich, dass weiterführender Gestaltungsbedarf in der detaillierten Definition von einzelnen Digitalisierungszielen für Geschäftsprozesse sowie von Handlungsempfehlungen gesehen wird, welche die Erreichung der nächsthöheren Stufe im Reifegradmodell operationalisieren.

Darüber hinaus ist das konzipierte Modell langfristig um eine ökonomische Bewertung der Geschäftsprozesse zu ergänzen. Infolgedessen sollten Investitionsentscheidungen hinsichtlich der Prozessdigitalisierung situativ mithilfe von quantitativ-monetären Verfahren fundiert werden. Hierzu bieten sich die Nutzung der etablierten Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung an, die um spezifische Methoden des Prozessmanagements zu ergänzen sind, wie z. B. die Prozesssimulation.

Darüber hinaus gibt es auch bezüglich der Methodik weiteren Forschungsbedarf. Zwar existieren bereits Vorgehensmodelle zur Entwicklung von Reifegradmodellen, die auch im Rahmen dieses Beitrags zugrunde gelegt wurden, indes stehen auch weitere Entwicklungsstrategien zur Verfügung (Becker et al. 2009a). Damit stellt sich die Frage, welche Strategien zur Weiterentwicklung von Reifegradmodellen, zum Transfer einzelner Modellinhalte oder zur Kombination verschiedener Modelle einzusetzen sind.

Insgesamt liefert das hier vorgestellte Modell einen methodisch fundierten Bezugsrahmen für die Bewertung der digitalen Reife von Geschäftsprozessen und kann zur Deckung des identifizierten Forschungsbedarfs weiterentwickelt werden.

LITERATUR

Akdil K.Y.; Ustundag A.; Cevikcan E. (2018): Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In: Industry 4.0: Managing the Digital Transformation.

Springer Series in Advanced Manufacturing. Cham. Springer. S. 61-94

Anderl, R., Picard, A., Wang, Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., & Bauer, J. (2015): Leitfaden Industrie 4.0. Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. In VDMA Forum Industrie, Band. 4. Verfügbar unter:

https://www.vdmashop.de/refs/VDMA_Leitfaden_I40_neu.pdf. [Zugriff am 29.06.2019]

Appelfeller, W. u. Feldmann, C. (2018): Die digitale Transformation des Unternehmens. Systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung Berlin, Heidelberg. Springer Verlag

Association for Information Systems (2011): Senior Scholars' Basket of Journals. Verfügbar unter: von <http://aisnet.org/?SeniorScholarBasket> [Zugriff am 21.06.2019]

Basl, J. (2018): Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems. In: Tjoa, A. M.; Raffai, M.; Doucek, P.; Novak, N. M. (2018): Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems. Cham. Springer International Publishing. S. 57-68

Becker, J.; Knackstedt, R.; Pöppelbuß, J. (2009a): Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management. Vorgehensmodell und praktische Anwendung. In: Wirtschaftsinformatik, 51. Jg. (2009), Heft 3. Münster. S. 249 – 260

Becker, J.; Mathas, C.; Winkelmann, A. (2009b): Geschäftsprozessmanagement. Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg

Becker, M. (2012): Hinweise zur Anfertigung eines Literature-Reviews. Verfügbar unter: <http://www.caterdev.de/2012/05/30/hinweise-zur-anfertigung-einesliteratur-reviews/>. [Zugriff am 25.07.2019]

Becker, T. u. Knop, C. (2015): Digitales Neuland. Warum Deutschlands Manager jetzt Revolutionäre werden. Wiesbaden. Springer Gabler Wiesbaden

Bensberg, F.; Auth, G.; Czarnecki, C.; Wörndle, C. (2018): Transforming literature-intensive research processes through text analytics – design, implementation and lessons learned, 5th International Management Information Systems Conference (IMISC), Ankara, Turkey, <https://doi.org/10.6084/m9-figureshare.7582073.v1> [Zugriff am 29.03.2020]

Bitkom e.V. (o.J.): Reifegradmodell Digitale Geschäftsprozesse. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/Themen/Technologien-Software/Digital-Office/Reifegradmodell-Digitale-Geschaeftsprozesse.html> [Zugriff am 03.08.2019]

Botzkowski, T. (2017). Digitale Transformation von Geschäftsmodellen im Mittelstand. Theorie, Empirie und Handlungsempfehlungen. Wiesbaden. Springer Gabler Wiesbaden

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Mittelstand-Digital IKT-Anwendungen in der Wirtschaft. Berlin. Verfügbar unter:

- <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/mittelstand-digital-broschuere.html> [Zugriff am 15.07.2019]
- Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H.; Fornasiero, R. (2017): Collaboration in a Data-Rich World. 18th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2017, Vicenza, Italy, September 18-20, 2017, Proceedings. Springer International Publishing
- Cooper, H.M. (1988): Organizing Knowledge Syntheses: A Taxonomy of Literature Reviews. Knowledge in Society, Carlifonien, Beverly Hills. Sage
- Czarnecki, C; Auth, G.; Bensberg, F. (2019): Die Rolle von Softwarerobotern für die zukünftige Arbeitswelt. In: HMD, Band 56, S. 795-808
- De Bruin, T.; Freeze, R.; Kulkarni, U. u. Rosemann, M. (2005): Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. 16th Australasian Conference on Information Systems. Sydney, 29. November 2005. ACIS 2005 Proceedings, Heft 109. Sydney: ACIS 2005 Proceedings. Verfügbar unter: <https://pdfs.semanticscholar.org/c00f/91faf37a75823a5baca7415a5123ac4010f8.pdf>. [Zugriff am 13.08.2019]
- Dirks, T. (2015): Vortrag. Ehemaliger CEO Telefónica Deutschland. Berlin. SZ-Wirtschaftsgipfel [19.11.2015]
- Drewer, P.; Schmitz, D. (2017): Terminologiemanagement – Grundlagen, Methoden, Werkzeuge. Berlin. Springer Vieweg
- Ensinger, A.; Fischer, P.; Früh, F.; Halstenbach, V.; Hüsing, C. (2016): Digitale Prozesse. Begriffsabgrenzung und thematische Einordnung. Bitkom e.V.. Verfügbar unter: <https://www.bitkom.org/sites/.../160803-Whitepaper-Digitale-Prozesse.pdf> [Zugriff am 21.07.2019]
- Fettke, P. (2006): State-of-the-Art des State-of-the-Art. Eine Untersuchung der Forschungsmethode „Review“ innerhalb der Wirtschaftsinformatik. In: WIRTSCHAFTSINFORMATIK, Heft 48. S. 257–266
- Hain, S. u. Back, A. (2011): Towards a Maturity Model for E-Collaboration - A Design Science Research Approach. 44th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2011). Kauai, HI, 04.01.2011 - 07.01.2011. IEEE
- Hecht, S. (2014): Ein Reifegradmodell für die Bewertung und Verbesserung von Fähigkeiten im ERP-Anwendungsmanagement. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden
- Hess, T.; Matt, C.; Benlian, A.; Wiesböck, F. (2016): Options for Formulating a Digital Transformation Strategy. In: MIS Quarterly Executive, Band 15, Nr. 2. S. 123-139
- Hevner, A. R.; March, S. T.; Park, J.; Ram, S. (2004): Design Science in Information System Research. In: MIS Quarterly Executive, Band 28, Nr. 1. S. 75-101. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/201168946_Design_Science_in_Information_Systems_Research [Zugriff am 15.08.2019]
- Kamprath, N. (2011): Einsatz von Reifegradmodellen im Prozessmanagement. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik. Band 48, Nr. 6. Springer Fachmedien Wiesbaden. S. 99-102
- Kleemann, F.C. u. Glas, A.H (2017): Einkauf 4.0. Digitale Transformation der Beschaffung. Wiesbaden. Springer Gabler Wiesbaden
- Koch, V.; Kluge, S.; Geissbauer, R; Schrauf, S. (2014): Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution. Verfügbar unter: <http://www.strategyand.pwc.com/media/file/Industrie-4-0.pdf> [Zugriff am 16.07.2019]
- Kollmann, T. (2016): Digitaler Wandel - wir können das! So muss Deutschland den digitalen Wandel angehen. In: manager magazin 2016. Verfügbar unter: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/digitalisierung-so-muss-deutschland-den-digitalen-wandel-angehen-a-1074696-3.html> [Zugriff am 28.08.2019]
- Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M.; Millack, A.; Schmitt, K.; Schmitz, E.; Schröter, M. (2015): Industrie 4.0 Readiness. Unter Mitarbeit von Stiftung für den Maschinenbau, den Anlagenbau und die Informationstechnik. Aachen, Köln. In: Impuls, Oktober 2015
- Lödding, H.; Riedel, R.; Thoben, K. D.; von Cieminski, G.; Kiritsis, D. (2017): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. Cham. Springer International Publishing
- March, S. T. u. Smith, G. F. (1995): Design and natural science research on information technology. In: Decision Support System, Heft 1995. S. 251-266
- Margherita, A. u. Petti, C. (2010): ICT-enabled and process-based change: an integrative roadmap. In: Business Process Management Journal, Band 16, Nr. 3. Emerald Group Publishing Limited. S. 473-491
- Mettler, T.; Rohner, P.; Winter, R. (2010): Towards a classification of maturity models in information systems. In: D'Atri, A.; De Marco, M.; Braccini, A.M.; Cabiddu, F. (Hrsg.): Management of the interconnected world – The Italian Association for Information Systems. Heidelberg. Physica. S. 333-340
- Röglinger, M. u. Kamprath, N. (2012): Prozessverbesserung mit Reifegradmodellen – Eine Analyse ökonomischer Zusammenhänge. Diskussionspapier WI-298. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Heft 82, Nr. 5. Verfügbar unter: <https://www.fim-rc.de/Paperbibliothek/Veroeffentlicht/298/wi-298.pdf>. [Zugriff am 11.07.2019]
- Sames; G. u. Dinges; A. (2018): Stand der Digitalisierung von Geschäftsprozessen zu Industrie 4.0 im Mittelstand. Ergebnisse einer Umfrage bei Unternehmen. In: THM-Hochschulschriften, Band 9. Gießen
- Sanchez-Puchol, F. u. Pastor-Collado, J.A. (2017): Focus Area Maturity Models: A Comparative Review. In: Themistocleous, M. und Morabito, V (Hrsg.): Information Systems. EMCIS 2017. Lecture Notes in Business Information Processing, Band

299. Cham. Springer International Publishing. S. 531-544
- Scheer Consulting (2014): Industrie 4.0. Die Innovation liegt in den Prozessen. Vortrag: Process2People Tour 2014. Tübingen. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/736427-Process2people-tour-2014-tuebingen-03-07-2014-industrie-4-0-die-innovation-liegt-in-den-prozessen.html> [Zugriff am 28.08.2019]
- Sondergaard, P. (2011): Vortrag bei der Gartner Symposium/ITxpo im Oktober 2011 des Senior Vice President der Gartner Inc., Orlando, Florida. Verfügbar unter: <https://www.causeweb.org/cause/resources/fun/quotes/Sondergaard-on-Data-Analytics> [Zugriff am 21.07.2019]
- Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S. (2013): Kompetenz- und Reifegradmodelle für das Projektmanagement. Studie des Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
- swisscom (2016): Die digitale Transformation von Geschäftsprozessen. Erfolgsfaktoren und Empfehlungen für die Umsetzung. Verfügbar unter: <documents.swisscom.com/.../transformation-geschaeftsprozesse-de.pdf> [Zugriff am 11.06.2019]
- van der Aalst, W.M.P. (2009): Process-Aware Information Systems: Lessons to Be Learned from Process Mining. In: Jensen, K., van der Aalst, W.M.P. (Hrsg.): Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. Lecture Notes in Computer Science, Band 5460. Berlin, Heidelberg. Springer
- Webster, J. u. Watson, R. (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. MIS Quarterly 02/2002. S. XIII–XXIII
- Wiegand, B. (2018): Der Weg aus der Digitalisierungsfalle. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden
- Wolf, T. u. Strohschen, J.H. (2018): Digitalisierung: Definition und Reife. Quantitative Bewertung der digitalen Reife. In: Informatik Spektrum, Band 41, Nr. 1. S. 56-64
- Zehbold, C. (2018): Product Lifecycle Management (PLM) im Kontext von Industrie 4.0. In: Fend, L.; Hofmann, J. (Hrsg.): Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Wiesbaden. Springer Fachmedien Wiesbaden. S. 69-90

Analyse von Lösungsräumen bei der Ressourcenbelegungsplanung

Frank Herrmann

Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung (IPF)
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH Regensburg)
Galgenbergstraße 32, 93053 Regensburg, Deutschland

Zusammenfassung

Ressourcenbelegungsplanungsprobleme haben fast immer exponentiell wachsende Lösungsräume. Ausnahmen sind einfachste Ressourcenbelegungsplanungsprobleme die sich im wesentlichen durch Sortierverfahren optimal lösen lassen. Dadurch sind Ressourcenbelegungsplanungsprobleme NP-vollständig. Nach der Literatur haben Lösungsräume von einigen NP-vollständigen Optimierungsproblemen günstige Eigenschaften, die Metaheuristiken, wie genetische Algorithmen und lokale Suche, ausnutzen, um in vertretbarer Rechenzeit gute Lösungen zu finden. Zu Ihrer Erkennung gibt es in der Literatur etablierte Analysemöglichkeiten. Sie werden in dieser Arbeit auf die Ressourcenbelegungsplanung übertragen und ihre Wirkung bzw. die auftretenden Schwierigkeiten werden anhand von einfachen Problemen aufgezeigt.

Schlüsselwörter

Ressourcenbelegungsplanungsprobleme, Analyse eines Lösungsraums, Landschaft eines Lösungsraums, Metaheuristiken.

1 Einleitung

Die Ressourcenbelegungsplanung ist Bestandteil von Enterprise Resource Planungssystemen (ERP-System) wie dem SAP System, s. z.B. [22] oder [18]. Sie legt fest, wann welche Aufträge auf welchen Stationen eines Produktionssystems – wie beispielsweise einer Werkstattfertigung aus Bohr-, Fräß- und Schleifstationen – zu bearbeiten sind; s. hierzu beispielsweise [17] und [18].

Durch die Definition von benachbarten Lösungen entsteht ein Lösungsraum. Die in der industriellen Praxis in der Regel auftretenden Lösungsräume sind so groß, dass eine vollständige Enumeration selbst mit den schnellsten heute verfügbaren Computern Jahrzehnte dauern würde, s. z.B. [17] und [18]. Dem wird durch Suchverfahren – in Form

von Metaheuristiken wie eine lokale Suche – begegnet, die wenig erfolgversprechende Teil-Räume von der weiteren Suche ausschließen. Dazu müssen geeignete Eigenschaften eines Lösungsraums bekannt sein. Seitens der Literatur haben sich eine Reihe von Analysen für viele NP-vollständige Probleme bewährt. Sie werden im Folgenden im Detail vorgestellt und anhand von Fallstudien demonstriert.

Diese Publikation ist wie folgt strukturiert. Die Untersuchung wird anhand von Fallstudien zur Ressourcenbelegungsplanung mit der Minimierung der mittlere Verspätung als Zielkriterium erläutert, die zunächst dargestellt werden. Über eine Metrik ergibt sich ein Lösungsraum, dessen mögliche Eigenschaften erläutert werden. Nachdem dies in zwei Abschnitten erläutert wurde, werden in den folgenden drei Abschnitten verschiedene Kennzahlen eingeführt und analysiert. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und weiterführende Arbeiten vorgeschlagen.

2 Fallstudien

Zur Demonstration der Überlegungen wird sich auf eine Permutationslinienfertigung, die für manche Untersuchungen noch weiter reduziert wird, beschränkt. Dadurch sind einige Analysen manuell möglich. Damit eine gewisse Unregelmäßigkeit auftritt, wurden drei Stationen verwendet. Zu jedem Produkt existiert ein Auftrag und es gibt 5 Produkte. Die Bearbeitungszeiten der einzelnen Operationen für die einzelnen Produkte wurden so gewählt, dass eine gewisse Schwankung an den Arbeitstationen einerseits und an der Gesamtbearbeitungszeit der einzelnen Produkte (Summe der Bearbeitungszeiten der einzelnen Operationen) andererseits auftritt. Alle Aufträge haben den gleichen Endtermin.

Im Detail lauten die Daten dieser Permutationsfließfertigung, die im Weiteren als Ausgangsproblem bezeichnet wird, wie folgt. Die Bearbeitungszeiten der 5 Produkte auf den drei Stationen (S1, S2 und S3) betragen:

Station	Produkte				
	A	B	C	D	E
S1	40	90	20	40	40
S2	50	50	50	90	10
S3	50	20	30	40	40

Tabelle 1: Ausgangsproblem: Bearbeitungszeiten in Zeiteinheiten (ZE).

Die Aufträge (hier hat jedes Produkt der Einfachheit halber einen Auftrag) haben einen einheitlichen Freigabetermin von 0 Zeiteinheiten (ZE) und einen einheitlichen Soll-Endtermin von 200 ZE.

Das resultierende Permutationslinienfertigungsproblem wird durch die Permutation (3, 1, 5, 4, 2) optimal gelöst und ihre mittlere Verspätung beträgt 36 ZE (als Zielfunktionswert).

Da der Lösungsraum aus 120 Permutationen für eine vollständige Analyse recht groß ist, wurde ein Auftrag, nämlich Produkt C, entfernt. Die resultierende Permutationsfließfertigung besteht weiterhin aus den drei Stationen (S1, S2 und S3) und die Bearbeitungszeiten der nunmehr 4 Produkte lauten nun:

Station	Produkte			
	A	B	C	D
S1	40	90	40	40
S2	50	50	90	10
S3	50	20	40	40

Tabelle 2: Reduziertes Ausgangsproblem: Bearbeitungszeiten in Zeiteinheiten (ZE).

Auch hier haben die Aufträge (wiederum hat jedes Produkt der Einfachheit halber einen Auftrag) einen einheitlichen Freigabetermin von 0 ZE und einen einheitlichen Soll-Endtermin von 200 ZE. Die Stationen haben eine Verfügbarkeit und zwar S1 von 20 ZE, S2 von 70 ZE sowie S3 von 100 ZE.

Dieses Reduktion vom Ausgangsproblem wird durch die Permutation (1, 4, 3, 2) optimal gelöst und ihre mittlere Verspätung beträgt 45 ZE. Es wird im Folgenden als Beispielproblem bezeichnet und das zuerst genannte Problem als Ausgangsproblem. Bereits das Ausgangsproblem ist insofern einfach, als die NEH-Heuristik, s. z.B. [34], bereits eine optimale Lösung für die mittlere Verspätung berechnet.

Schließlich ist es hilfreich, zum Vergleich ein Problem heranzuziehen, welches durch ein Sortierverfahren, und insbesondere bereits durch die Prio-

ritätsregel „Kürzeste Operationszeit“ – auf Prioritätsregeln wird weiter unten näher eingegangen –, optimal gelöst wird, weswegen es als günstiges Problem bezeichnet wird. Es handelt sich um ein Ein-Stationenproblem, bei dem sämtliche 4 Aufträge verspätet sind. Auch hier haben die Aufträge unterschiedliche Produkte mit den folgenden Bearbeitungszeiten:

Station S	Produkte			
	A	B	C	D
	20	40	10	30

Tabelle 3: Günstiges Problem: Bearbeitungszeiten in Zeiteinheiten (ZE).

Die Freigabe- und Soll-Endtermine aller Aufträge sind 0 ZE.

Zur Lösung wurden einerseits Prioritätsregeln eingesetzt und andererseits wurde eine vollständige Permutation erstellt. Prioritätsregeln arbeiten im Kern wie folgt, im Detail ist ihre Arbeitsweise in [18] und [20] beschrieben: Operationen, die startbereit sind – bei der ersten in einem linearen Arbeitsplan eben ab dem Freigabetermin des dazugehörigen Auftrags und ansonsten, wenn sein Vorgänger im Arbeitsplan beendet worden ist – werden auf die Stationen zugeteilt, auf denen sie bearbeitet werden können. In dem jedem vor einer Station wartenden Auftrag eine Priorität zugewiesen wird, entsteht eine Warteschlange. Kann eine Station belegt werden, so wird die erste Operation seiner Warteschlange zugeteilt. Die im Folgenden verwendeten Prioritätsregeln sind im Detail in [19] und in [37], [36], [18], [33], [9] sowie [12] beschrieben. Wie [1] und [42] zeigen, werden Prioritätsregeln auch in neueren Forschungen verwendet.

Für das Beispielproblem sind die mittleren Verspätungen sämtlicher Lösungen, die in der Tabelle 16 aufgelistet sind, in Abbildung 1 dargestellt. Diese Abbildung 1 enthält auch die Lösungen zu Prioritätsregeln, die beispielsweise in [17], [18] und in [21] erläutert sind. Die im Lösungsraum auftretende mittlere Verspätung überstreckt einen Bereich von 45 ZE bis 107.5 ZE, wobei mehrere mittlere Verspätungen mehrfach auftreten und die mittleren Verspätungen einen Mittelwert von 69.48 ZE und eine Standardabweichung von 15.52 ZE besitzen.

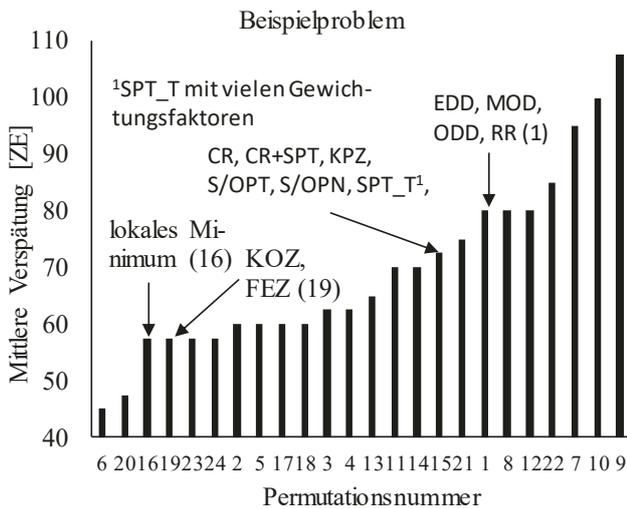


Abbildung 1: Verteilung der mittleren Verspätung beim Beispielproblem; für die Permutationsnummern s. Tabelle 16.

Beim Ausgangsproblem liegt eine ähnliche Situation vor, s. Abbildung 2, welches auch die Lösungen zu Prioritätsregeln enthält: deutlich sind ebenfalls viele Häufungspunkte erkennbar, der Mittelwert von 67.67 ZE ist etwas niedriger, die Standardabweichung von 18.14 ZE ist etwas höher, das Minimum von 36 ZE ist etwas niedriger und das Maximum von 116 ZE ist etwas höher; wegen der hohen Anzahl an Permutationen wurde auf deren Angabe als Säulen wie in Abbildung 1 verzichtet.

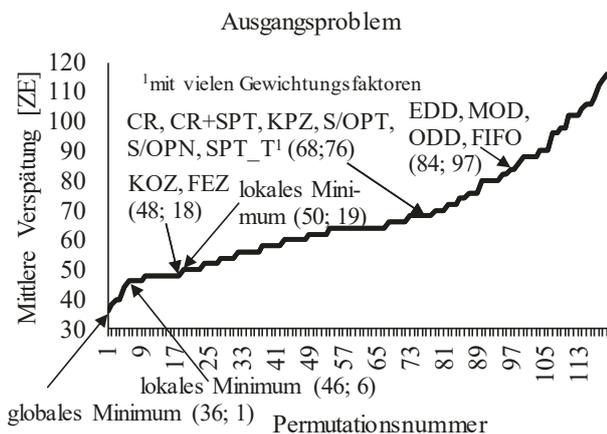


Abbildung 2: Verteilung der mittleren Verspätung beim Ausgangsproblem.

3 Struktur eines Lösungsraums – Metrik, lokale Optima und lokale Suche

Bei den hier betrachteten Permutationsfließfertigungen besteht der Lösungsraum aus allen Permutationen der Aufträge. Über eine Metrik – und all-

gemein über topologische Räume s. z.B. [7] sowie [5] – kann die Ähnlichkeit zwischen Lösungen durch einen Abstand (Distanz) gemessen werden, was zur Bildung von Nachbarschaftsstrukturen führt, s. z.B. [6]. Mehrere Metriken werden in der Literatur verwendet, s. z.B. [43] oder [6]. Besonders in binären Suchräumen der Dimension n wird die Hamming-Metrik verwendet, s. z.B. [43] oder [6], bei der die Anzahl der abweichenden (binären) Positionen gezählt wird. Dieses Vorgehen lässt sich auf zwei Permutationen $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ und $y = \{y_1, \dots, y_n\}$ wie folgt erweitern:

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^n z_i \text{ mit } z_i = \begin{cases} 1 & , \text{ für } x_i \neq y_i \\ 0 & , \text{ für } x_i = y_i \end{cases}$$

ist der Hammingabstand zwischen x und y .

Eine weitere Metrik ist aus der Arbeitsweise der NEH Heuristik, nämlich dem Einfügen eines Auftrags in einer Position in einer Permutation, s. [34], ableitbar.

Ein (direkter) Nachbar zu einer Permutation (im Allgemeinen einer Lösung) x – im Lösungsraum – ist folglich jede andere Permutation – im Lösungsraum –, die den kleinsten möglichen Hamming-Abstand zu x hat. Da die Permutationen die gleiche Länge besitzen, ist 2 der kleinste mögliche Hamming-Abstand zwischen zwei Permutationen. Da alle Permutationen die gleichen Werte enthalten, ergeben sich alle Nachbarn einer (beliebigen) Permutation x durch jede mögliche Vertauschung von zwei Positionen in x . Eine Folge von solchen Vertauschungen w_1, \dots, w_n von einer (beliebigen) Permutation x ($= w_1$) bildet einen Weg von w_1 nach w_n ; dabei geht w_{i+1} , mit $1 \leq i < n$, aus w_i durch eine Vertauschung von zwei Positionen in w_i hervor; w_i und w_{i+1} sind direkte Nachbarn.

Durch einen Abstand zwischen Permutationen können lokale Optima – bezogen auf diesen Anwendungsfall der Ressourcenbelegungsplanung eben lokale Minima – auftreten, wohingegen ein globales Minimum (Optimum) stets vorliegt. Nach der Definition von einem strikten lokalen Minimum in der Analysis, ist ein lokales Minimum (x) umgeben von (echt) größeren Werten und zwar in einer kleinen (ϵ -) Umgebung von x – bei einem Maximum natürlich entsprechend von echt geringeren Werten. Dies bedeutet, dass beim Entlanglaufen auf einer (Ziel-) Funktion von einem lokalen Minimum zu einem lokalen (ggf. globalen) Minimum (mindestens) ein höherer (Ziel-) Funktionswert als der vom lokalen Minimum auftritt. Übertragen auf Permutationen bedeutet dies, dass für jeden Weg w_1, \dots, w_n von einem lokalen Minimum ($x = w_1$) zu einem

lokales Minimum ($x^* = w_n$), ein w_i , mit $1 < i < n$, existiert, dass schlechter als $x = w_1$ ist; i.e. mit schlechterem (Ziel-) Funktionswert. Um ein lokales Minimum nicht zu restriktiv zu definieren, werden Nachbarn mit gleichen (Ziel-) Funktionswerten zugelassen, wodurch ein so genanntes Plateau vorliegt. Dadurch ergibt sich die folgende Definition für ein lokales Optimum x bei Permutationen: Kein (direkter) Nachbar von x darf besser als x sein und für alle Wege w_1, \dots, w_n von $x = w_1$ zu einer besseren Lösung als x , nämlich w_n , ist ein w_i , mit $1 < i < n$, dass schlechter als x ist. Diese Definition entspricht der von Weicker in [49], der ein lokales Optimum für eine etwas allgemeinere Nachbarschaft definiert hat, wobei diese allgemeinere Nachbarschaft durch einen Mutationsoperator bewirkt wird, der im Prinzip eine Lösung (hier eine Permutationen) an einer Stelle ändert.

Bei einem Plateau-Punkt x ist jeder (direkte) Nachbar von x nicht besser als x und es existiert wenigstens ein (direkter) Nachbar mit der gleichen Güte. Am Rand eines Plateaus kann ein benachbarter Punkt (außerhalb des Plateaus) mit einem besseren Zielfunktionswert liegen. Dies wird in der Literatur als Ausgang (des Plateaus) bezeichnet. Ein solcher liegt nicht vor, sofern im Plateau ein lokales Optimum liegt. Ist nicht bekannt, ob ein Plateau einen Ausgang besitzt, so ist das Plateau eventuell vollständig zu durchsuchen, um einen Ausgang zu finden oder eben nicht. Schließlich sind zwei lokale Minima x und y mit dem gleichen (Ziel-) Funktionswert nicht durch ein Plateau verbunden, sofern für alle Wege w_1, \dots, w_n von $x (= w_1)$ nach $y (= w_n)$ gilt: es gibt ein w_i , mit $1 < i < n$, dass schlechter als x ist. Solche lokalen Minima werden als echt unterschiedlich bezeichnet.

Das Ausgangsproblem hat zwei lokale Minima, das eine ist die Permutation (3, 4, 2, 5, 1) mit der mittleren Verspätung von 46 Zeiteinheiten (als Zielfunktionswert) und das andere ist die Permutation (4, 2, 5, 3, 1) mit der mittleren Verspätung von 50 Zeiteinheiten. Seine Reduktion (also das Beispielproblem) hat ein lokales Minimum und zwar die Permutation (3, 2, 4, 1) mit der mittleren Verspätung von 57,5 Zeiteinheiten. Der Hammingabstand zwischen dem globalen Minimum und dem lokalen Minimum beträgt 4. Im Ausgangsproblem beträgt der Hammingabstand zwischen jedem Paar aus globalen und lokalen Minimum 4.

Durch eine Vertauschung von den Inhalten (hier Auftragsnummern) in zwei Positionen i und j , mit $i \neq j$, in einer Permutation P entsteht eine neue

Permutation Q ; im Detail:

ist $P = (n_1, n_2, \dots, n_{i-1}, n_i, n_{i+1}, \dots, n_{j-1}, n_j, n_{j+1}, \dots, n_m)$,

so führt diese Vertauschung von den Inhalten in zwei Positionen i und j , mit $i \neq j$,

zu $Q = (n_1, n_2, \dots, n_{i-1}, n_j, n_{i+1}, \dots, n_{j-1}, n_i, n_{j+1}, \dots, n_m)$.

Bei einem Hammingabstand von $(n + 1)$ zwischen zwei Permutationen P und Q gilt für eine Folge mit der geringsten Anzahl N an Vertauschungen von zwei Positionen, mit denen P in Q überführt wird, dass $N \leq n$ ist. Häufig sind es genau n Vertauschungen, wie z.B. zwischen den Permutationen (1,2,3,4) und (4,1,2,3) mit einem Hammingabstand von 4 die Vertauschungen von (1,2,3,4) zu (4,2,3,1), mit einem Hammingabstand von 3 zu (4,1,2,3), und dann zu (4,1,3,2), mit einem Hammingabstand von 2 zu (4,1,2,3), und schließlich zu (4,1,2,3). Aber, die Permutationen (1,4,3,2) und (4,1,2,3) haben ebenfalls einen Hammingabstand von 4 und werden durch 2 Vertauschungen in einander überführt, nämlich von (1,4,3,2) zu (4,1,3,2), mit einem Hammingabstand von 2 zu (4,1,2,3), und dann zu (4,1,2,3). Damit existieren für jede Permutation P mit einem Hammingabstand von $(n + 1)$ zum globalen Minimum maximal n Vertauschungen, die P in das globale Minimum überführen. Dies motiviert eine Iteration solcher Vertauschungen und ein solches Verfahren wird als eine lokale Suche bezeichnet.

Eine lokale Suche benötigt ein Kriterium, nach dem entschieden wird, ob eine Vertauschung weiterverfolgt werden soll oder nicht. Für die numerische Lösung eines nicht-linearen Optimierungsproblems in der Analysis wird dies in dem allgemeinen Abstiegsverfahren – bzw. dem Gradientenverfahren – dadurch gelöst, indem die Richtung bevorzugt wird, in welcher die (Ziel-) Funktion am stärksten verbessert wird. Daher sollten nur Verbesserungen weiterverfolgt werden. Dabei werden in der Regel n Vertauschungen durchgeführt, wodurch n Lösungen entstehen und basierend auf deren Zielfunktionswerten wird eine, oder sogar mehrere, ausgewählt, mit der (oder denen) die lokale Suche fortgesetzt wird. Über eine Abbruchbedingung terminiert das Verfahren.

4 Mögliche Eigenschaften eines Lösungsraums

Die Untersuchung von Lösungsräumen in der Literatur hat das Ziel, Eigenschaften im Lösungsraum zu erkennen, mit denen einerseits die Güte von

Heuristiken erklärt werden können und mit denen andererseits Heuristiken selbst entwickelt werden können. Statt dem eigentlichen Optimierungskriterium wird vielfach eine Ersatzfunktion verwendet, die in der Literatur als Fitness (-funktion) bezeichnet wird.

In der Literatur werden folgende Eigenschaften bzw. Charakteristika analysiert (und damit definiert) – für eine umfangreiche Behandlung sei auf das Buch von Richter und Engelbrecht in 2014, s. [44], verwiesen:

- Verteilung der Zielfunktionswerte (Mittelwert und Varianz).
- Unebenheit (Rauheit bzw. Zerklüftung) des Lösungsraums, definiert durch die Korrelation zwischen dem Abstand von zwei Lösungen und der Differenz ihrer Zielfunktionswerte.
- Die Zahl der lokalen Optima.
- Die Verteilung der lokalen Optima im gesamten Lösungsraum.
- Die Anzahl der Schritte (hier Vertauschungen) zu einem (globalen) Optimum.
- Struktur und Größe von sogenannten Anziehungsbecken um lokale Optima. Ein Anziehungsbecken ist ein Gebiet um ein lokales Optimum M , bei dem zwischen jedem Punkt P mit Zielfunktionswert $f(P)$ und Abstand $A(P)$ von M eine sehr signifikante (positive) Korrelation zwischen $f(P) - f(M)$ und $A(P)$ vorliegt.
- Größe und Struktur von Plateaus (i.e. Gebiete mit gleichen Zielfunktionswerten).

Es sei betont, dass die Ausprägungen dieser Eigenschaften stark von der Fitness-Funktion abhängt. So diskutiert Weicker in [49] am Beispiel von Bitmustern lokale Optima und stellt generell fest, dass lokale Optima ausschließlich von der gewählten Codierung und dem Mutationsoperator abhängen – beachte, dass, wie oben ausgeführt, Weicker in [49] ein lokales Optimum für eine etwas allgemeinere Nachbarschaft, die durch einen Mutationsoperator erzeugt wird, definiert hat. Aufgrund der obigen Überlegungen ist dies sehr relevant, da je weniger lokale Optima existieren, desto bessere Ergebnisse können durch eine (lokale) Suche erwartet werden.

Bei Optimierungsproblemen mögliche Eigenschaften eines Lösungsraums sind in den Abbildungen 3 bis 10 mit ihren Bezeichnungen und teilweise Hinweisen auf ihre Eignung für ein Suchverfahren angegeben; ein Gradient zeigt nach dem Gradientenverfahren zur Optimierung partiell differenzierbarer

(Ziel-) Funktionen in die Richtung des steilsten Abstiegs. Zur geführten Suche zeigen diese möglichen Eigenschaften bereits die Wirkung von Informationen aus früheren Suchschritten für die Festlegung eines nächsten Suchschrittes.

Exemplarisch werden nun folgende besonders ungünstige Konstellationen analysiert. Liegen keine für eine geführte Suche verwendbaren Informationen vor, beispielsweise dann, wenn durch die zufällige Erzeugung eines Nachfolgers ein Suchraum gebildet wurde (ein Beispiel dazu ist in [43] angegeben), dann hat (im Mittel) jede geführte Suche die gleiche Güte und deswegen hat die zufällige Suche die gleiche Güte. Das gleiche gilt für das Problem der Suche nach einer Nadel im Heuhaufen, s. Abbildung 7. Informationen können derart vorliegen, dass eine geführte Suche zwar in jedem Schritt einen besseren Zielfunktionswert erreicht, aber zugleich der Abstand zum Optimum erhöht wird, wodurch das Optimum nie erreicht wird (eine solche Situation, allerdings noch extremer, ist das in der Abbildung 6 als trügerisch bezeichnete Problem und unter irreführend ist in [43] ein Beispiel angegeben); somit bewegen sich die Lösungen vom Optimum fort und dadurch ist der Abstand zu der optimalen Lösung negativ korreliert mit dem Zielfunktionswertunterschied zwischen einer Lösung und der optimalen Lösung. Jede andere geführte Suche, die Informationen über den Lösungsraum nutzt, findet ebenfalls das Optimum nicht. Effektiver ist dann ein Suchverfahren, das keine Informationen über die Eigenschaften des Suchraums benutzt, sondern zufällig sucht. Dies rechtfertigt die Verwendung einer zufälligen Suche als Benchmark für Heuristiken; beim Scheduling wird häufiger eine geführte Suche von einer zufällig erzeugten Anfangslösung (oder mehrerer) gestartet; als ein Beispiel möge Vallada et al. (in 2008, s. [48]) dienen. Diese möglichen Wirkungen von Informationen aus früheren Suchschritten für die Festlegung eines nächsten Suchschrittes korreliert mit dem „no-free-lunch“ Theorem, s. [51] und [52], nach dem effiziente und effektive Verfahren problemspezifisch sein müssen und insbesondere keine „black-box“ Optimierung möglich ist.

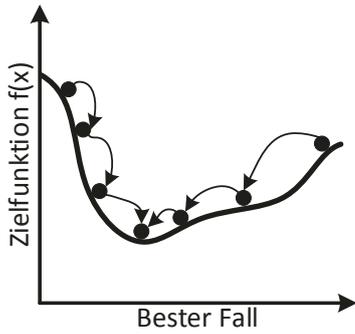


Abbildung 3: Beispielhafter Lösungsraum I.

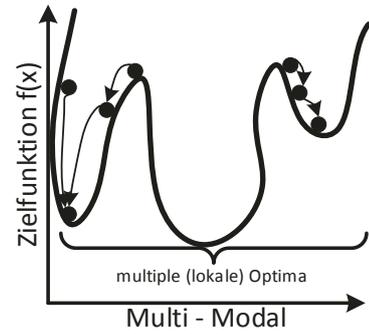


Abbildung 5: Beispielhafter Lösungsraum III.

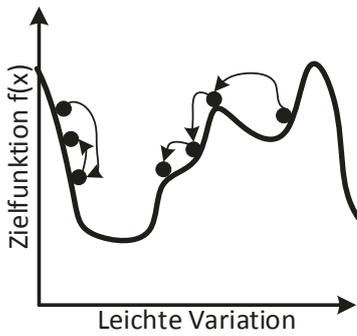


Abbildung 4: Beispielhafter Lösungsraum II.

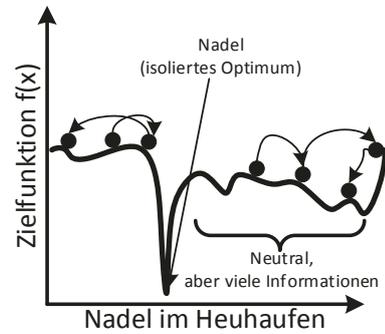


Abbildung 7: Beispielhafter Lösungsraum V.

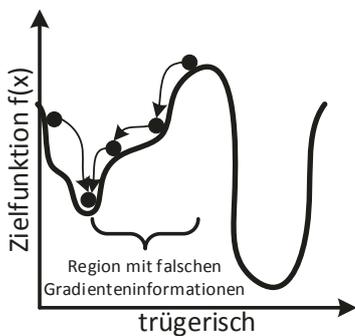


Abbildung 6: Beispielhafter Lösungsraum IV.

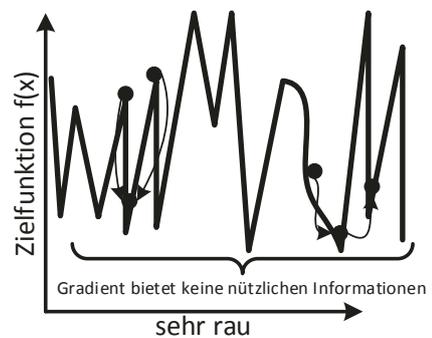


Abbildung 8: Beispielhafter Lösungsraum VI.

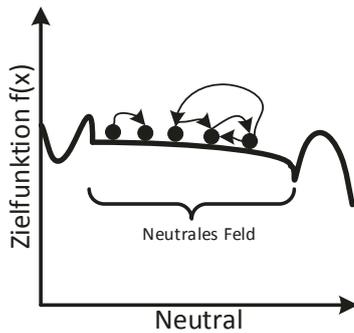


Abbildung 9: Beispielhafter Lösungsraum VII.

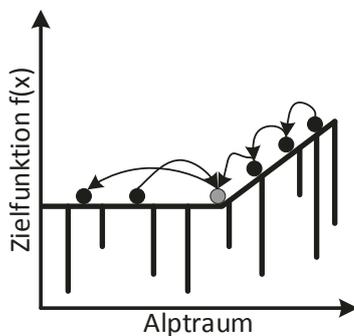


Abbildung 10: Beispielhafter Lösungsraum VIII.

5 Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient

Angenommen, es liege ein idealer Suchraum vor, bei dem jede Vertauschung zu einer Verbesserung führt und ein globales Optimum sogar mit einer minimalen Anzahl an Vertauschungen erreicht wird. Ist zugleich die durch eine Vertauschung jeweils erzielte Verbesserung gleich, so liegt eine maximale Korrelation zwischen dem Hamming-Abstand und dem Zielfunktionswert vor. Ein solcher Suchraum ist im Zusammenhang mit Permutationen nicht möglich. Maximal möglich sind Permutationen wie die folgenden im Fall von dreistelligen Permutationen. Wie im Folgenden noch dargestellt werden wird, liefern bei dreistelligen Permutationen die folgenden Zielfunktionswerte die besten Kennzahlen, weswegen dieses Beispiel als „ideale Permutationen“ bezeichnet wird.

1	2	3	ZFW [ZE]	HGM	RN
1	2	3	2	0	1
2	1	3	6	2	2
1	3	2	6	2	3
3	2	1	6	2	4
2	3	1	8	3	5
3	1	2	8	3	6

Tabelle 4: Ideale Permutationen: Alle Permutationen (Spalte i für die i-te Stelle in der Permutation) mit mittleren Verspätungen in Zeiteinheiten (ZE) (Spalte ZFW), Hammingabstand zum globalen Minimum (Spalte HGM) sowie Referenznummer (Spalte RN).

Eine eigene Analyse ergab, dass sich eine solche Permutationslinienfertigung mit der Verspätung als Zielkriterium nicht erreichen lässt. Es treten Permutationen mit zu geringen Verspätungen auf. Dies lässt sich durch reihenfolgeabhängige Rüstkosten korrigieren.

Damit dürfte der – zu Beginn dieses Abschnitts – genannte Suchraum, der ideal ist, nicht oder nur marginal häufig existieren. Bei der Ressourcenbelegungsplanung wird die Problemklasse mit dem im Mittel geringsten Rechenzeitbedarf durch ein Sortierverfahren gelöst, s. dazu [17]; ein Beispiel dafür ist das günstige Problem, s. Tabelle 3. Trotzdem begründet dieser ideale Suchraum die Verwendung von der (ebendort) genannten Korrelation als ein Maß für die Güte einer (lokaler) Suchmethode zur Lösung eines Optimierungsproblems. Als Präzisierung schlugen Jones und Forrest (1995) (s. [24]) einen so genannten Fitness-Abstandskorrelationskoeffizienten vor, dessen folgende Definition sich an Rothlauf [43] orientiert; für Berechnungen zu einem solchen Koeffizienten sei auf [8] verwiesen. Mit einer optimalen Lösung x_{opt} , dem Abstand $d_{i,opt}$ einer Permutation i zur optimalen Lösung (x_{opt}), dem Zielfunktionswert f_i , die Mittelwerte von allen Zielfunktionswerten $E(f)$, die Mittelwerte von allen Hammingabständen jeweils zur optimalen Lösung (x_{opt}) $E(d_{opt})$, die Standardabweichungen von allen Zielfunktionswerten $\sigma(f)$ und die Standardabweichungen von allen Hammingabständen jeweils zur optimalen Lösung (x_{opt}) $\sigma(d_{opt})$ ist

$$\rho_{FDC} = \frac{c_{f,d}}{\sigma(f)\sigma(d_{opt})}$$

der Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient mit der

Kovarianz

$$c_{f,d} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (f_i - E(f)) \cdot (d_{i,opt} - E(d_{opt})).$$

Damit misst der Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient $\rho_{FDC} \in [-1, 1]$ die lineare Korrelation zwischen den Zielfunktionswerten von allen Lösungen (Permutationen) und ihren Hammingabständen zum globalen Minimum (x_{opt}).

Nach Jones und Forrest (in 1995, s. [24]) korrelieren bei $\rho_{FDC} \geq 0.15$ Zielfunktionswerte und ihre Hammingabstände (zum Optimum) gut. Dadurch nehmen bei einem zunehmend geringeren Hammingabstand zum Optimum die Abstände der Zielfunktionswerte zum optimalen Zielfunktionswert ab. Deswegen ist der Suchraum günstig für Suchverfahren. Nach Jones und Forrest (s. [24]) bedeutet ein ρ_{FDC} zwischen -0.15 und 0.15 , dass die Zielfunktionswerte der Nachbarschaftslösungen unkorreliert sind und der Suchraum keine Informationen darüber enthält, welcher Nachbar durch ein Suchverfahren weiter verfolgt werden sollte. Die Informationen im Suchraum dürften nach Jones und Forrest (s. [24]) im Fall von $\rho_{FDC} \leq -0.15$ für ein Suchverfahren sogar irreführend sein.

Wegen der maximalen Korrelation bei dem (zu Beginn dieses Abschnitts genannten) idealen Suchraum hat ρ_{FDC} den optimalen Wert von 1. Dieser liegt auch bei der idealen Permutation, s. Tabelle 4, vor. Allerdings bewirkt folgende kleine Änderungen der Zielfunktionswerte, bei der der Zielfunktionswert von 6 Zeiteinheiten (ZE) durch 4 ZE ersetzt wird – i.e. bei jedem der drei Vorkommen – und der andere Zielfunktionswert von 8 ZE auf 9 ZE erhöht wird – ebenfalls bei jedem der beiden Vorkommen – bereits eine Reduktion von ρ_{FDC} auf den Wert 0.87. Verantwortlich für diese substantielle Reduktion (von ρ_{FDC}) ist die Abweichung von der maximalen Korrelation zwischen dem Hamming-Abstand und dem Zielfunktionswert. Da die auftretenden Hamming-Abstände 0, 2 und 3 sind, liegt eine ideale Situation vor, wenn die Zielfunktionswerte zu den einzelnen Hamming-Abständen gleich sind und, dann, derjenige zum Hamming-Abstand von 3 um 50% höher ist, als der zum Hamming-Abstand von 2. Durch andere Abweichungen von diesem Zusammenhang werden noch kleinere Werte für ρ_{FDC} bewirkt. Ein beliebig kleiner Werte für ρ_{FDC} konnte nicht erzielt werden. Der kleinste gefundene Werte für ρ_{FDC} von 0.45 bewirkt die Erhöhung von einem der beiden Vorkommen von dem Zielfunktionswert von 8 um eine sehr große Zahl, z.B. auf 1000.

Marginal kann der Wert noch verringert werden, in dem der Zielfunktionswert von 6 maximal verringert wird, nämlich auf 3, und der Zielfunktionswert von 8 ebenfalls maximal verringert wird, nämlich auf 4 – das zweite Vorkommen von dem Zielfunktionswert von 8 im Ausgangsproblem wird auf 1000 gesetzt –; dies bewirkt $\rho_{FDC} = 0.448558732$, gegenüber $\rho_{FDC} = 0.451525763$.

Die optimale Lösbarkeit durch die Prioritätsregel KOZ beim günstigen Problem, und damit durch ein Sortierverfahren, bewirkt einen Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient von $\rho_{FDC} = 0.577$. Verantwortlich für eine solche substantielle Abweichung vom idealen Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient von 1 (bei dem die maximale Korrelation vorliegt,) sind für den allgemeinen Fall mehrere Effekte. Drei besonders relevante werden im Folgenden vorgestellt und anhand des Beispielproblems bzw. des günstigen Problems demonstriert.

Zum einen können auch hohe Zielfunktionswerte einen geringen (minimalen) Hamming-Abstand zum globalen Minimum haben. Zwar haben im Beispielproblem die beiden Permutationen mit den beiden höchsten Zielfunktionswerten von 107.5 Zeiteinheiten (ZE) und 100 ZE jeweils den maximal möglichen Hamming-Abstand von 4 zum globalen Minimum. Aber bereits die nächst höheren Zielfunktionswerte von 95 ZE, 85 ZE und 80 ZE haben, in dieser Reihenfolge, die Hamming-Abstände von 3, 3, und sogar 2, also den kleinsten möglichen; es sei angemerkt, dass drei Permutationen einen Zielfunktionswert von 80 ZE haben und zwei von diesen haben den Hamming-Abstand von 2 und einer hat den Hamming-Abstand von 4. Ein solcher Effekt liegt auch beim günstigen Problem vor. So haben von drei Permutationen mit dem zweithöchsten Zielfunktionswert von 72.5 ZE – 75 ZE ist der höchste Zielfunktionswert – zwei einen Hamming-Abstand von 4 und einer hat den Hamming-Abstand von 2 zum globalen Minimum.

Zum anderen kann ein Plateau einen geringen Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient bewirken. Das Beispielproblem hat in der Permutation (4,3,2,1) ein Plateau, da die beiden Permutationen (4,1,2,3) und (4,3,1,2) (direkte) Nachbarn (von ihm) mit dem gleichen Zielfunktionswert von 57.5 Zeiteinheiten sind, und alle anderen (direkten) Nachbarn von ihnen einen höheren Zielfunktionswert haben. Von der Permutation (4,3,1,2) führt eine Vertauschung (von Positionen) zu (4,1,3,2) und danach eine weitere zu (1,4,3,2), dem globalen Mi-

nimum. Im Fall der Permutation (4,3,2,1) ist mindestens eine zusätzlich Vertauschung erforderlich – z.B. eben zu (4,3,1,2). Folglich liegt keine Korrelation zwischen dem Hamming-Abstand und dem Zielfunktionswert vor. Es sei angemerkt, dass beim günstigsten Problem kein Plateau vorliegt.

Schließlich dürfte ein lokales Minimum einen noch gravierenderen Einfluss auf den Fitness-Abstandskorrelationskoeffizienten haben. Da nach der Definition von einem lokalen Minimum (LM) ein globales Minimum (GM) ausschließlich durch eine Folge von Vertauschungen mit einer Verschlechterung erreicht werden kann, ist die Korrelation zwischen dem Hamming-Abstand und den Zielfunktionswerten zwischen LM und GM kleiner als die maximal mögliche. Im Gegensatz zum günstigsten Problem hat das Beispielproblem ein lokales Minimum – das Ausgangsproblem hat zwei lokale Minima.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist der Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient beim Beispielproblem nur noch 0.396. Dass das Ausgangsproblem ein lokales Minimum mehr hat und insgesamt aufwendiger zu lösen ist, bewertet dieser Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient mit einer Reduktion um 13.64% – auf 0.342.

Die vorgestellten Überlegungen stellen bereits Ansatzpunkte für Schwächen eines Fitness-Abstandskorrelationskoeffizienten dar. Daher ist es nach der Literatur wirkungsvoller, alle Lösungen in einem kartesischen Koordinatensystem aus den Zielfunktionswerten und den Hammingabständen zum Optimum einzutragen. Konkretisierungen finden sich bei Kauffman und Weinberger (1989, s. [27]), Boesse (1995 für das Traveling Salesman Problem, s. [3]), Reeves (1999 für die Ressourcenbelegungsplanung von Fließfertigungen, s. [39] und Mendes et al. (2002 für die Ressourcenbelegungsplanung von Einzelstationen, s. [31]). Danach treten noch stärker als beim Beispielproblem (und auch beim günstigen Problem) bei realen Problemen Lösungen mit hohen Hammingabständen zum Optimum und sehr geringen Abständen zum optimalen Zielfunktionswert auf.

6 Glätte bzw. Unebenheit eines (Teil-) Lösungsraums

Haben benachbarte Lösungen – i.e. hier Permutationen – sehr unterschiedliche Lösungen, so liegen keine nützlichen Informationen für das Finden eines Minimums – auch nicht für ein lokales Mini-

mum, vor; ein Beispiel ist der Lösungsraum VI in Abbildung 8. In diesem Sinne liegt ein zerklüfteter Suchraum vor. Das Gegenteil ist eine hohe Korrelation benachbarter Lösungen. In der Literatur wird ein Vorgehen vorgeschlagen, bei dem im Idealfall – i.e. wenn der Suchraum vollständig betrachtet wird – die Mittelwerte der Abstände zwischen dem Optimum und seinen Nachbarn mit einem festen Hammingabstand einschließlich der dabei auftretenden Standardabweichungen ermittelt werden. Für das Beispielproblem als auch für das günstige Problem sind die entsprechenden Werte in Tabelle 5, für das Beispielproblem, und in Tabelle 6, für das günstige Problem, angegeben. Um die Veränderung der Mittelwerte bei der Veränderung des Hammingabstands vergleichen zu können, wurden die einzelnen Mittelwerte mit dem dazugehörigen Hammingabstand gewichtet (Division durch den Hammingabstand) und dadurch normiert. Wegen der Abnahme dieses normierten Mittelwerts ist die Zunahme des (tatsächlichen) Mittelwerts nur moderat. Sie wird verursacht durch eine bereits sehr hohe Abdeckung aller Zielfunktionswerte mit einem minimalen Hammingabstand (von 2) – es kommt beim günstigen Problem der Zielfunktionswert von 72.5 Zeiteinheiten (ZE) vor und der höchste (einmal) auftretende ist 75 ZE. Beim Beispielproblem haben das lokale Minimum und einige Permutationen einen relativ günstigen Zielfunktionswert mit einem hohen Hammingabstand zum globalen Minimum. Dies bewirkt die Zunahme der Standardabweichung mit zunehmenden Hammingabstand und eine generell höhere Standardabweichung als beim günstigen Problem.

Hammingabstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	65	32,5	9.43
3	70	23.33	12.56
4	75.72	18.68	17.42

Tabelle 5: Beispielproblem: Abstand zwischen Zielfunktionswert und globales Minimum für Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand vom globalen Minimum; Kennzahlen z.T. in Zeiteinheiten (ZE).

Hamming-abstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	58.33	29.16	7.81
3	62.5	20.83	5
4	66.67	16.67	6.01

Tabelle 6: Günstiges Problem: Abstand zwischen Zielfunktionswert und globales Minimum für Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand vom globalen Minimum; Kennzahlen z.T. in Zeiteinheiten (ZE).

Zur Orientierung sind in der folgenden Tabelle 7 diese Kennzahlen für ideale Permutationen (aus dem Abschnitt 5 über den Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient) angegeben. Gleiche Zielfunktionswerte beim gleichen Hammingabstand zum (globalen) Minimum führt zu einer Standardabweichung von 0 Zeiteinheiten (ZE). Wegen der Abnahme des normierten Mittelwerts ist die Zunahme nicht proportional zum Hammingabstand; dies wäre der Fall, wenn der Zielfunktionswert von 8 ZE durch 9 ZE ersetzt werden würde – dann wäre 9 ZE der Mittelwert zum Hammingabstand 3 und der gleichmäßige Anstieg von Mittelwert zum Hammingabstand zeigt sich im einheitlichen Quotienten aus Mittelwert und Hammingabstand.

Hamming-abstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	6	3	0
3	8	2.67	0

Tabelle 7: Ideale Permutationen: Abstand zwischen Zielfunktionswert und globales Minimum für Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand vom globalen Minimum; Kennzahlen z.T. in Zeiteinheiten (ZE).

Eine solche Zerklüftung liegt nicht nur im Hinblick auf den Bezug zum Optimum vor, sondern gerade bezogen auf alle Nachbarn mit einem festen Hammingabstand. Deswegen wurden diese Kennzahlen auch für alle Paare von Permutationen mit einem bestimmten Hammingabstand erhoben und sind in der Tabelle 8 für das Beispielproblem und in Tabelle 9 für das günstige Problem angegeben. Sie sind strukturell ähnlich zu denjenigen bei einem

festen Hammingabstand zum globalen Minimum in Tabelle 5, für das Beispielproblem, und in Tabelle 6, für das günstige Problem. Einziger struktureller Unterschied ist die Standardabweichung beim Beispielproblem, die nun abnimmt. Verantwortlich hierfür sind starke Schwankungen in den Zielfunktionswerten benachbarter Permutationen (mit einem Hammingabstand von 2). Ferner wird die oben angesprochene Vermutung über den Einfluss des lokalen Minimums (und anderer Permutationen) auf die Zunahme der Standardabweichung bestätigt. Die um den Hammingabstand normierten Mittelwerte nehmen deutlich mit zunehmenden Hammingabstand ab. Relativ gesehen ist diese Abnahme beim günstigen Problem ausgeprägter, auch im Vergleich zur vorhergehenden Analyse. Aufgrund solcher Implikationen wird mit diesen Analysen die Unebenheit bzw. Glätte der Lösungsraums, gerade in der Umgebung eines (lokalen) Minimums, aufgezeigt – und erfolgt in der Literatur unter einer dieser beiden Bezeichnungen.

Hamming-abstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	13.37	6.68	12.97
3	16.09	5.36	11.04
4	16.39	4.09	7.46

Tabelle 8: Beispielproblem: Kennzahlen ggf. in Zeiteinheiten (ZE) zu Paaren von Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand.

Hamming-abstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	6.74	3.37	3.86
3	6.87	2.29	4.96
4	7.22	1.81	3.99

Tabelle 9: Günstiges Problem: Kennzahlen ggf. in Zeiteinheiten (ZE) zu Paaren von Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand.

Zur Orientierung sind in der folgenden Tabelle 10 diese Kennzahlen für ideale Permutationen (aus dem Abschnitt 5 über den Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient) angegeben. Da nun nicht mehr ausschließlich die Differenzen von 8 Zeiteinheiten (ZE) und 2 ZE sowie von 6 ZE und 2 ZE auftreten, sondern zusätzlich von 8 ZE und 6

ZE, sind die Mittelwerte kleiner (bei beiden Hammingabständen von 2 und 3). Beim Hammingabstand von drei treten noch Differenzen von 0 ZE (zwischen 6 ZE bzw. 8 ZE und 6 ZE bzw. 8 ZE) auf. Dies erklärt die Abnahme des Mittelwerts, auch des normierten und die (deutliche) Zunahme der Standardabweichung. Im Fall der vielen Differenzen von 0 ZE, und zwar 4-mal von 6 ZE, enthält der Gradient keine nützlichen Informationen für das Finden eines Minimums. In diesem Sinne liegt bei einem Hammingabstand von 3 bei idealen Permutationen eine Zerklüftung vor.

Hammingabstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	2.67	1.33	0.94
3	2	0.67	2.83

Tabelle 10: Ideale Permutationen: Kennzahlen ggf. in Zeiteinheiten (ZE) zu Paaren von Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand.

Ein Suchraum ohne Zerklüftung wird erreicht, in dem ein Teil der Permutationen gelöscht werden. Die resultierende Permutationen wird im Folgenden als „sehr einfache Permutationen“ bezeichnet und ist in Tabelle 11 angegeben.

1	2	3	ZFW [ZE]	HGM	RN
1	2	3	2	0	1
1	3	2	6	2	2
2	3	1	8	3	3

Tabelle 11: Sehr einfache Permutationen: Alle Permutationen (Spalte i für die i-te Stelle in der Permutation) mit mittleren Verspätungen in Zeiteinheiten (ZE) (Spalte ZFW), Hammingabstand zum globalen Minimum (Spalte HGM) sowie Referenznummer (Spalte RN).

Die Kennzahlen für den Abstand zwischen Zielfunktionswert und globalem Minimum für Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand vom globalen Minimum ändern sich nicht; s. Tabellen 7 und 12.

Der gewünschte Effekt zeigt sich bei den Kennzahlen zu Paaren von Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand. Der Mittelwert und der um den Hammingabstand gewichtete Mittelwert steigen an.

Verantwortlich für die geringe Standardabweichung ist die sehr kleine Anzahl an Permutationen.

Hammingabstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	6	3	0
3	8	2.67	0

Tabelle 12: Sehr einfache Permutationen: Abstand zwischen Zielfunktionswert und globales Minimum für Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand vom globalen Minimum; Kennzahlen z.T. in Zeiteinheiten (ZE).

Hammingabstand	Mittelwert [ZE]	Mittelwert/Hammingabstand [ZE]	Standardabweichung [ZE]
2	3	1.5	1
3	6	2	0

Tabelle 13: Sehr einfache Permutationen: Kennzahlen ggf. in Zeiteinheiten (ZE) zu Paaren von Permutationen mit dem gleichen Hammingabstand.

Problematisch bei diesem Vorgehen ist, dass ein Lösungsraum im Allgemeinen nicht vollständig erzeugt werden kann. Seitens der Literatur erwies sich die Betrachtung von Zufallsbewegungen sehr häufig als wirkungsvoll; Zufallsbewegungen werden weiter unten erläutert. Damit wird ein (Gesamt-) Lösungsraum durch solche Zufallsbewegungen ersetzt. Dazu werden Zielfunktionswerte als Zufallsvariablen aufgefasst und können dann stochastisch untersucht werden. Dieses Vorgehen wird zunächst für alle Permutationen erläutert und verifiziert.

Wie die obigen Betrachtungen belegen, bedeutet eine hohe Glätte eine hohe Korrelation benachbarter Lösungen, wodurch kein zerklüfteter Suchraum vorliegt. Deswegen wurde in der Literatur eine Korrelationsfunktion als Maß für die Zerklüftung eines Suchraums vorgeschlagen (s. [26], [25] und [50]). Als Beispiel diene die Autokorrelationsfunktion eines Suchraums mit einem bestimmten Hammingabstand (d) als Sprungweite ($\rho(d)$), deren Definition

$$\rho(d) = \frac{E(f(x)f(y))_{d(x,y)=d} - E(f)^2}{E(f^2) - E(f)^2}$$

sich an die in citeMerz.2004 orientiert; ohne Normalisierungsfaktor, $Var(f)$ ($= E(f^2) - E(f)^2$), liegt die Autokovarianzfunktion vor.

Für einen festen Hammingabstand d ist $\rho(d)$ die Korrelation zwischen den Zielfunktionswerten zu allen Lösungen, die einen Hammingabstand von d aufweisen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt die Autokorrelationsfunktion im Intervall $[-1, 1]$; $\rho(d) = 1$ bedeutet perfekt korreliert (positiv) – so dass Zielfunktionswerte (i.e. $f(x)$ und $f(y)$) ähnlicher Höhe vorliegen –, $\rho(d) = -1$ bedeutet perfekt anti-korreliert (negativ) – so dass die Zielfunktionswerte sich stark unterscheiden (i.e. $f(x)$ ist hoch und $f(y)$ ist niedrig – oder umgekehrt) – und bei $\rho(d) = 0$ lässt sich kein Zusammenhang erkennen. Damit liegt bei $(\rho(d) \approx 1)$ eine sehr hohe Lokalität vor. Der Grad der Zerklüftung des Suchraums steigt mit der Abnahme von $\rho(d)$. Die Werte zu dem Beispielproblem und zum günstigen Problem befinden sich in Tabelle 14; es sei angemerkt, dass, wie bereits angesprochen wurde, negative Werte möglich sind. Zur Orientierung sind diese Kennzahlen in der Tabelle 15 für ideale Permutationen (aus dem Abschnitt 5 über den Fitness-Abstandskorrelationskoeffizient) und für sehr einfache Permutationen angegeben. Für ihre Analyse ist zu beachten, dass nur wenige Werte vorliegen. So weisen die Kennzahlen in Tabelle 15 lediglich in die richtige Richtung.

Hammingabstand	Beispielproblem	Günstiges Problem
2	-2.72 (-900.25)	-1.33 (-83.15)
3	-0.65 (-205.89)	2.5 (156.25)
4	0.18 (42.19)	0 (0)

Tabelle 14: Autokorrelationsfunktion (Autokovarianzfunktion) eines Suchraums mit einem bestimmten Hammingabstand als Sprungweite für das Beispielproblem und das günstige Problem – bei Berücksichtigung des kompletten Suchraums.

Hammingabstand	Ideale Permutationen	Sehr einfache Permutationen
2	1.21 (7.56)	0.25 (1.56)
3	0.89 (5.55)	- (12)

Tabelle 15: Autokorrelationsfunktion (Autokovarianzfunktion) eines Suchraums mit einem bestimmten Hammingabstand als Sprungweite für die idealen Permutationen und für die sehr einfachen Permutationen – bei Berücksichtigung des kompletten Suchraums.

Die aus diesen Werten zu vermutende hohe Zerklüftung trifft aufgrund der bisherigen Analyse zu. Sie zeigt sich auch in einer entsprechenden Analyse aller Permutationen zum Beispielproblem, die in Tabelle 16 mit Hammingabständen zum globalen und lokalen Minimum angegeben sind, sowie zum günstigen Problem, die in Tabelle 17 mit Hammingabständen zum globalen Minimum angegeben sind. Nach Weinberger in [50] sind Suchräume mit einer exponentiell abnehmenden Autokovarianzfunktion günstig für heuristische Suchmethoden.

1	2	3	4	ZFW [ZE]	HGM	HLM	RN
1	2	3	4	80	2	3	1
1	2	4	3	60	3	2	2
1	3	2	4	62.5	3	4	3
1	3	4	2	62.5	2	3	4
1	4	2	3	60	2	4	5
1	4	3	2	45	0	4	6
2	1	3	4	95	3	4	7
2	1	4	3	80	4	3	8
2	3	1	4	107.5	4	4	9
2	3	4	1	100	4	2	10
2	4	1	3	70	3	4	11
2	4	3	1	80	2	3	12
3	1	2	4	65	4	3	13
3	1	4	2	70	3	2	14
3	2	1	4	72,5	4	2	15
3	2	4	1	57,5	4	0	16
3	4	1	2	60	2	3	17
3	4	2	1	60	3	2	18
4	1	2	3	57,5	4	4	19
4	1	3	2	47,5	2	4	20
4	2	1	3	75	4	3	21
4	2	3	1	85	3	2	22
4	3	1	2	57,5	3	4	23
4	3	2	1	57,5	4	3	24

Tabelle 16: Beispielproblem: Alle Permutationen (Spalte i für die i -te Stelle in der Permutation) mit mittleren Verspätungen in Zeiteinheiten (Spalte ZFW), Hammingabstand zum globalen Minimum (Spalte HGM), Hammingabstand zum lokalen Minimum (Spalte HLM) sowie Referenznummer (Spalte RN).

1	2	3	4	ZFW	HGM	RN
1	2	3	4	62,5	4	1
1	2	4	3	67,5	3	2
1	3	2	4	55	4	3
1	3	4	2	52,5	2	4
1	4	2	3	57,5	3	5
1	4	3	2	65	4	6
2	1	3	4	67,5	3	7
2	1	4	3	72,5	2	8
2	3	1	4	65	4	9
2	3	4	1	67,5	3	10
2	4	1	3	72,5	4	11
2	4	3	1	75	4	12
3	1	2	4	57,5	3	13
3	1	4	2	60	2	14
3	2	1	4	52,5	2	15
3	2	4	1	50	0	16
3	4	1	2	52,5	2	17
3	4	2	1	57,5	3	18
4	1	2	3	70	4	19
4	1	3	2	72,5	4	20
4	2	1	3	62,5	4	21
4	2	3	1	57,5	3	22
4	3	1	2	60	2	23
4	3	2	1	67,5	3	24

Tabelle 17: Günstiges Problem: Alle Permutationen (Spalte i für i-te Stelle in Permutation) mit Zielfunktionswert (Spalte ZFW), Hammingabstand zum globalen Minimum (Spalte HGM) sowie Referenznummer (Spalte RN).

Eine Zufallsbewegung, auch als Irrfahrt oder als Random Walk bezeichnet, ist ein stochastischer Prozess in diskreter Zeit mit unabhängigen und identisch verteilten Zuwächsen; sie geht auf Pearson (s. [35] in 1905) zurück. Formal, s. z.B. [14] oder [28], handelt es sich bei einer d dimensionalen Zufallsbewegung ($d \in \mathbb{N}$) um den stochastischen Prozess $(X_n)_{n \in \mathbb{N}_0}$ mit $X_n = X_0 + \sum_{j=1}^n Z_j$ ($n \in \mathbb{N}_0$), wobei $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Werten in \mathbb{R}^d ist, die alle die gleiche Verteilung besitzen. Eine Zufallsbewegung ist also ein diskreter Prozess mit unabhängigen und stationären Zuwächsen. Mit ihrer Hilfe können auch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Messwerten physikalischer Größen verstanden werden.

Für die Ressourcenbelegungsplanung bietet sich als Zufallsbewegung eine Folge von Vertauschungen an, wodurch eine Folge von Permutationen $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ entsteht. Da nach n Vertauschungen ein Hammingab-

stand von n entstehen kann (und häufig auch wird), wird aus einer durch eine Zufallsbewegung erzeugten Folge von Permutationen jede n -te Permutation betrachtet, um die Autokorrelationsfunktion eines Suchraums mit dem Hammingabstand von n als Sprungweite zu schätzen. Zu einer solchen Zufallsbewegung der Länge T und der Sprungweite n sei f_t der Zielfunktionswert des besuchten Punktes zur Zeit t und \bar{f} sei deren Mittelwert. Dann wird die Autokorrelationsfunktion des Suchraums mit Verzögerung n (da es sich um eine empirische Autokorrelation handelt) durch die Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzung (s. [50], [46], [47] und [38])

$$r(n) = \frac{\sum_{t=1}^{T-n} (f_t - \bar{f})(f_{t+n} - \bar{f})}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{f})^2}.$$

geschätzt.

Liegt eine Regelmäßigkeit in dem Suchraum so vor, dass alle Elemente des Suchraums durch eine Zufallsbewegung mit gleicher Wahrscheinlichkeit erreicht werden, dann ist $r(n)$ für eine Zufallsbewegung mit einer großen Anzahl an Schritten eine gute Schätzung für $\rho(n)$; s. [50] und [39].

Diese Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzung erlaubt folgende Aussage. Bei einem glatten Lösungsraum sind (wegen der dadurch vorliegenden Korrelationen) die Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzungen für kleine Verzögerungen ungefähr 1. Da bei zerklüfteten Suchräumen unmittelbar benachbarte Punkte völlig unabhängig voneinander sind, dürfte für alle Verzögerungen (insbesondere kleine) die Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzung nahe Null sein. Suchräume, bei denen die Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzungen hohe negative Werte haben, sind prinzipiell möglich, aber ziemlich selten (trotz der Werte in Tabelle 14). (Wegen der geringen Anzahl an Permutationen erfolgt keine Angabe der Zufallsbewegung-Autokorrelation-Schätzung für das Beispielproblem und zum günstigen Problem.)

Damit dürften bei einem glatten Lösungsraum bei einer langen bzw. längeren Folge von Vertauschungen diese eine hohe Korrelation aufweisen. Bei einem zerklüfteten Suchraum demgegenüber nicht. Dieser Unterschied wird durch die Korrelationslänge (l^*) gemessen. Sie ist definiert durch das größte l^* , bei dem im Intervall $[1, l^*]$ (von Verzögerungen) noch eine Korrelation auftritt. Zur Berechnung wird zunächst $r(n)$ für ein Intervall

$1 \leq n \leq l$ berechnet.

Der Standardfehler der Schätzung von $r(n)$ ist nach der klassischen Zeitreihenanalyse (z.B. nach Box und Jenkins (s. [4])) in etwa $\frac{1}{\sqrt{T}}$. Daher ist nur mit circa 5 % Wahrscheinlichkeit $|r(n)|$ größer als $\frac{2}{\sqrt{T}}$. Deswegen schlägt Reeves in [41] vor, Werte von $r(n)$, die kleiner (als $\frac{2}{\sqrt{T}}$) sind, durch Null zu ersetzen. Damit setzt er dann die Korrelationslänge l^* auf das letzte n , für das $r(n)$ nicht Null ist; also formal $l^* = \max_{n \geq 0} \left\{ |r(n+1)| < \frac{2}{\sqrt{T}} \wedge \left\{ |r(k)| > \frac{2}{\sqrt{T}} \forall k \leq n \right\} \right\}$.

Als weitere Berechnung der Korrelationslänge (l^*) schlägt Stadler in [47] und [45]

$$l^* = -\frac{1}{\ln(|r(1)|)} = -\frac{1}{\ln(|\rho(1)|)}$$

vor.

Bei der hier untersuchten Anwendung ist der kleinste mögliche Hammingabstand 2, so dass $r(2)$ tatsächlich $r(1)$ ist bzw. $\rho(2)$ ist $\rho(1)$. Für das Beispielproblem ergibt sich bei einer Länge der Zufallsbewegung von 24 (eben der Betrachtung aller möglichen Permutationen) eine Korrelationslänge nach Reeves von 0 – da die Grenze nur leicht verletzt wird, eher 1 – und eine nach Stadler von 1 sowie für das günstige Problem eine Korrelationslänge nach Reeves von 1 – nach der obigen Argumentation etwas über 1 – und eine nach Stadler von 1.57; bei beiden Problemen gibt es drei verschiedene Hammingabstände, nämlich 2, 3 und 4. Dieses Ergebnis bestätigt die bisherigen Überlegungen, nach der die Glätte beim günstigen Problem höher als beim Beispielproblem ist, aber, nach diesen Kennzahlen, ist der Unterschied (wohl) nicht zu ausgeprägt. Bei der idealen Permutation wie auch bei der sehr einfachen Permutation ist 2 die Korrelationslänge nach Reeves und da nur die Hammingabstände von 2 und 3 möglich sind, ist diese Korrelationslänge maximal – die Länge der Zufallsbewegung ist wieder 24, bei 6 wäre die Kennzahl (in beiden Fällen) nur 1. Die Korrelationslänge nach Stadler beträgt bei der idealen Permutation 1.47 und bei der sehr einfachen Permutation 1.63. Wird bei der idealen Permutation der Zielfunktionswert von 2 Zeiteinheiten (ZE) durch 5 ZE und der Zielfunktionswert von 8 ZE durch 7 ZE ersetzt, so ist die Glätte noch ausgeprägter und beide Berechnungen ermitteln eine Korrelationslänge von 2.

7 Maße für lokale Optima

Eine hohe Anzahl an lokalen Optima dürfte das Finden eines globalen Optimums erschweren. Dieses Kriterium wird in der Literatur als noch relevanter als die Korrelationsmaße angesehen. Für die Schätzung der Anzahl an lokalen Optima $N(o)$ mit stochastischen Methoden machten Reeves und Eremeev (in 2004, s. [40]) und Eremeev und Reeves (in 2003, s. [13]) einige erfolgversprechende Vorschläge. Einen Einblick mögen folgende beide Überlegungen geben. Eine geführte Suche wird n mal mit jeweils verschiedenen Anfangslösungen durchgeführt, die dann m lokale Optima erkennt. Die zeitliche Reihenfolge des Findens von lokalen Optima bildet ein Wartezeitmodell. Übertrifft n m deutlich, so lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass alle lokalen Optima gefunden wurden abschätzen. Sind n und m ungefähr gleich hoch, so dürften noch viele unerkannte Optima existieren. Für die Abschätzung von $N(o)$ könnten Methoden aus der Biologie zum Abschätzen der Anzahl von Tieren einer Gattung in der freien Wildbahn eingesetzt werden.

Empirische Untersuchungen lieferten Erkenntnisse, die sinnvoll als Charakteristika von Lösungsräumen interpretiert werden können. Zum einen wurde immer wieder festgestellt, dass lokale Optima sehr viel näher als zufällige Lösungen an einem globalen Optimum liegen und dass sie einen geringeren Abstand untereinander haben als zufällige Punkte. Das heißt, dass die Verteilung der lokalen Optima nicht isotrop (also nach allen Richtungen hin gleiche Eigenschaften aufweisend) ist, sondern die lokalen Optima dazu neigen, sich zu gruppieren. Zum anderen korreliert die Größe eines Anziehungsbeckens um ein lokales Optimum recht hoch mit der Güte dieses lokalen Optimums. Diese Eigenschaften liegen nicht bei jedem Problem vor, begründet aber den Erfolg von Perturbationsmethoden, s. z.B. [23] für das Travelling Salesman Problem. Diese Eigenschaften werden bei Suchmethoden wie dem simulated annealing oder dem tabu search unterstellt. Diese Verfahren verlören einen großen Teil ihres Potentials, wenn lokale Optima isotrop verteilt wären.

Wenige Arbeiten zur Analyse von Lösungs- bzw. Suchräumen für Ressourcenbelegungsplanungsprobleme wurden publiziert. Meines Wissens nach enthält die Arbeit von Mattfeld et al. (in 1999, s. [30]) die detaillierteste sowie umfangreichste Analyse. Untersucht wurden 10 Instanzen von Ressourcenbelegungsplanungsproblemen zur Werkstattfertigung mit der Minimierung des maximalen Fertigstellungstermins als Zielkriterium: 5 Instanzen sind

sehr schwer und 5 relativ einfach zu lösen. Das Testbett besteht aus zwei Pools von Lösungen. In einem befinden sich zufällig erzeugte Lösungen und im anderen befinden sich die lokalen Optima. Statistische Untersuchungen mit den folgenden Ergebnissen wurden durchgeführt. Die lokalen Optima sind gleichmäßig über den Lösungsraum verteilt. Daher sind diese im Allgemeinen nicht sehr ähnlich. Die Nachbarschaft im Lösungsraum weisen für beide Typen von Probleminstanzen ähnliche Unebenheiten auf. Deswegen lässt sich aus der Unebenheit eines Lösungsraums alleine nicht erklären, worin die Schwierigkeit bei den schwer zu lösenden Ressourcenbelegungsplanungsproblemen liegt. Mattfeld et al. (s. [30]) beobachteten eine große Korrelationslänge im Lösungsraum bei schweren Problemen, was auf eine plane Landschaft (Lösungsraum) hinweist. Demgegenüber weisen einfache Probleme eine höhere Spanne von Höhen in der Landschaft (Lösungsraum) auf. Diese Ergebnisse erklären die bei den Beispielen in dieser Publikation bereits beobachteten Schwierigkeiten bei der kennzahlenbasierten Analyse nach der Literatur.

8 Zusammenfassung

Durch die Definition von benachbarten Lösungen haben zwei benachbarte Lösungen Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Folgen von benachbarten Lösungen bilden einen Weg von einer Lösung zu einer anderen. Entlang dieses Weges von einer schlechten Lösung (p) zu einer guten Lösung (q) können die Zielfunktionswerte immer besser werden, also perfekt korreliert mit der Verringerung des Abstands zu q, oder nicht, bis hin zu perfekt nicht korreliert. Da in der Regel solche Lösungsräume viel zu groß sind, um diese konkret angeben zu können, wurden zur Analyse Kennzahlen vorgeschlagen. In einer umfangreichen Literaturrecherche wurden nach meiner Einschätzung nahezu alle Publikationen zur Analyse von Suchräumen identifiziert. Alle in diesen Arbeiten verwendeten Kennzahlen wurden in diese Publikation aufgenommen. Im weiteren Sinne handelt es sich um Korrelationskennzahlen. Diese Kennzahlen wurde auf mehrere einfache Beispiele zur Ressourcenbelegungsplanung angewandt, deren komplette Lösungsräume angegeben worden sind. Dadurch wird die Wirkung und zugleich die strukturelle Schwäche dieser Kennzahlen aufgezeigt. Dennoch belegt die Anwendung dieser Kennzahlen, dass mit ihnen die Lösungsräume von Ressourcenbelegungsplanungsproblemen analysiert werden können. Allerdings gibt es nach der

Literatur Problemklassen, bei denen diese Analysen deutlich bessere Ergebnisse liefern. Deswegen – und auch durch Analysen in der Literatur – haben viele Ressourcenbelegungsplanungsprobleme Lösungsräume, bei denen häufig aus Unterschieden zwischen Zielfunktionswerten kein Verfahren abgeleitet werden kann, mit dem in der Regel bzw. wenigstens häufig eine optimale oder wenigstens sehr gute Lösung gefunden wird.

Dies dürfte die Erfolgsaussichten von Metaheuristiken (deutlich) reduzieren. Die Relevanz dieser Vermutung zu analysieren, ist zukünftigen Untersuchungen vorbehalten.

9 Literatur

- [1] Surjit Angra, Chanda Arindam, and V. Chawla. 2018. *Comparison and evaluation of job selection dispatching rules for integrated scheduling of multi-load automatic guided vehicles serving in variable sized flexible manufacturing system layouts: A simulation study*. In: Management Science Letters, 8, 2018, S. 187-200.
- [2] Kenneth Dean Boese. 1995. *Cost versus distance in the traveling salesman problem*. UCLA Computer Science Department, 1995.
- [3] Kenneth Dean Boese. 1995. *Cost versus distance in the traveling salesman problem*. UCLA Computer Science Department, 1995.
- [4] G.E.P Box und G. M. Jenkins. 1970. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day, San Francisco, CA, USA.
- [5] G. Bredon. 1993. *Topological and geometry: Graduate Texts in Mathematics*. Vol 139. New York, USA: Springer.
- [6] Edmund K. Burke and Graham Kendall, Editors. 2014. *Search Methodologies: Introductory tutorials in optimization and decision support techniques*. Boston, MA, USA: Springer US.
- [7] Gerard Buskes and Arnoud Rooij van. 1997. *Topological Spaces: From Distance to Neighborhood*. Undergraduate Texts in Mathematics. New York: Springer-Verlag.
- [8] F. Chicano und E. Alba. 2012. *Exact computation of the fitness-distance correlation for pseudo-boolean functions with one global optimum*. In: J.-K. Hao und M. Middendorf (Eds.) EvoCOP 2012. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 7245 (2012), 111-123.

- [9] Tsung-Che Chiang and Li-Chen Fu. 2009. *Using a family of critical ratio-based approaches to minimize the number of tardy jobs in the job shop with sequence dependent setup times*. In: European Journal of Operational Research, 196 (1), 2009, S. 78-92.
- [10] Thorsten Claus, Michael Manitz und Frank Herrmann. 2015. *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise [Operative Planning in IT-Systems for Production Planning and Control: Effects, Selection and Adjustment Notes]*. Springer, Wiesbaden.
- [11] Andreas Drexl, Bernhard Fleischmann, Hans-Otto Günther, Hartmut Stadtler, und Horst Tempelmeier. 1994. *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung, 46, S. 1022–1045.
- [12] Ahmed El-Bouri. 2012. *A cooperative dispatching approach for minimizing mean tardiness in a dynamic flowshop*. In: Computers and Operations Research, 39(7), 2012, S. 1305-1314.
- [13] Anton V. Eremeev und Colin R. Reeves. 2003. *On Confidence Intervals for the Number of Local Optima*. In: Stefano Cagnoni, Colin G. Johnson, Juan J. Romero Cardalda, Elena Marchiori, David W. Corne, Jean-Arcady Meyer, Jens Gottlieb, Martin Middendorf, Agnès Guillot, Günther R. Raidl, Emma Hart (Herausgeber). *Applications of Evolutionary Computing*. Proceedings of EvoWorkshops 2003: EvoBIO, EvoCOP, EvoIASP, EvoMUSART, EvoROB, and EvoSTIM Essex, UK, April 14–16, 2003. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), volume 2611. S. 224-235.
- [14] Bert Fristedt und Lawrence Gray. 1997. *A modern approach to probability theory*. Birkhäuser, Boston/Basel/Berlin.
- [15] Hans-Otto Günther und Horst Tempelmeier. 2014. *Produktion und Logistik*. 11th ed. Nordstedt: Books on Demand.
- [16] Arnaldo C. Hax and Harlan C. Meal. 1975. *Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling*. In Logistics, Vol. 1 of Studies in Management Sciences edited by Murray A. Geisler. Amsterdam: North Holland.
- [17] Frank Herrmann. 2009. *Logik der Produktionslogistik*. München: Oldenbourg.
- [18] Frank Herrmann. 2011. *Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- [19] Frank Herrmann. 2013. *Simulation based priority rules for scheduling of a flow shop with simultaneously loaded stations*. In: Proceedings of the 27th EUROPEAN Conference on Modeling and Simulation, May 27th – 30th, 2013, Ålesund, Norway.
- [20] Frank Herrmann und Michael Manitz. 2017. *Materialbedarfsplanung und Ressourcenbelegungsplanung*. Wiesbaden: Springer.
- [21] Frank Herrmann. 2018. *Übungsbuch Losbildung und Fertigungssteuerung*. Wiesbaden: Springer.
- [22] F. Robert Jacobs, William Berry, D. Clay Whybark and Thomas Vollmann. 2010. *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management*. 6th ed., New York: McGraw-Hill/Irwin.
- [23] D. S. Johnson. 1990. *Local optimization and the traveling salesman problem*. In: Mike Paterson (Ed.). Proceedings of the 17th International Colloquium on Automata, Languages and Programming. Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 443, 446-461.
- [24] Terry Jones und Stephanie Forrest. 1995. *Fitness Distance Correlation as a Measure of Problem Difficulty for Genetic Algorithms*. In Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms, 1995, 184-192.
- [25] Stuart Kauffman, Simon Levin. 1987. *Towards a general theory of adaptive walks on rugged landscapes*. In: Journal of theoretical Biology 128, 1 (1987), 11-45.
- [26] Stuart A. Kauffman. 1989. *Principles of adaptation in complex systems*. In: Lectures in the Sciences of Complexity. Editor D. Stein. The Santa Fe Institute Series. New York: Addison Wesley, 1989, 527-618.
- [27] Stuart A. Kauffman, Edward D. Weinberger. 1989. *The NK model of ruggedness landscapes and its application to maturation of the immune response*. In: Journal of theoretical Biology 141, 2, 1989, 211-245.
- [28] Achim Klenke. 2013. *Wahrscheinlichkeitstheorie*. 3. Auflage, Berlin, Deutschland: Springer-Verlag.

- [29] Karl Kurbel. 2013. *Enterprise resource planning and supply chain management: Functions, business processes and software for manufacturing companies*. Heidelberg, Deutschland: Springer-Verlag.
- [30] D. C. Mattfeld, C. Bierwirth und H. Kopfer. 1999. *A search space analysis of the Job Shop Scheduling Problem*. In: Annals of Operations Research 86 (1999), 441-453.
- [31] Alexandre S. Mendes, Paulo M. Franca and Pablo Moscato. 2002. *Fitness landscapes for the total tardiness single machine scheduling problem*. In: Neural Network World: An International Journal on Neural and Mass-Parallel Computing and Information Systems 2 (2002), 165-180.
- [32] Peter Merz. 2004. *Advanced fitness landscape analysis and the performance of memetic algorithms*. In: Evolutionary Computation 12 (2004), 3,303-325.
- [33] Wiem Mouelhi-Chibani and Henry Pierreval. 2010. *Training a neural network to select dispatching rules in real time*. In: Computers and Industrial Engineering, 58 (2), 2010, 249-256.
- [34] M. Nawaz, E.E. Ensore Jr., I. Ham. 1983. *A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem*. Omega, 11 (1983), 91-95.
- [35] Karl Pearson. 2007. *The Problem of the Random Walk*. In: Nature, 72 (1865), 1905, 294.
- [36] C. Rajendran und K. Aliche. 2007. *Dispatching in flowshops with bottleneck machines*. In: Computers and Industrial Engineering, 52 (1), 2007, 89-106.
- [37] C. Rajendran und O. Holthaus. 1999. *A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and job shops*. In: European Journal of Operational Research, 116 (1), 156-170.
- [38] Christian M. Reidys and Peter F. Stadler. 2002. *Combinatorial Landscapes*. In: Society for Industrial and Applied Mathematics Vol (SIAM) Review, 44 (1), 3-54.
- [39] Colin R. Reeves. 1999 *Landscapes, operators and heuristic search*. In: Annals of Operations Research, 86, 1999, 473-490.
- [40] Colin R. Reeves. 2004 *Statistical analysis of local search landscapes*. In: Journal of the Operational Research Society, 55 (7), 2004, 687-693.
- [41] Colin R. Reeves. 2014 *Fitness Landscapes*. In: Edmund K. Burke and Graham Kendall (Herausgeber). *Search Methodologies: Introductory tutorials in optimization and decision support techniques*. 2014, 681-705.
- [42] Paulina Rewers, Justyna Trojanowska, Jacek Diakun, Álvaro Rocha, and Luís Reis. 2018 *A Study of Priority Rules for a Levelled Production Plan*. In: Adam Hamrol, Olaf Ciszak, Stanislaw Legutko, and Mieczyslaw Jurczyk (Herausgeber). *Advances in Manufacturing*. 2018. 111-120.
- [43] Franz Rothlauf. 2011. *Design of Modern Heuristics: Principles and Application*. München, Deutschland: Springer-Verlag.
- [44] Hendrik Richter, Andries Engelbrecht. 2014. *Recent Advances in the Theory and Application of Fitness Landscapes*. Heidelberg, Deutschland: Springer-Verlag.
- [45] Peter F. Stadler. 1992. *Correlation in landscapes of combinatorial optimization problems*. In: EPL (Europhysics Letters), 1992, 479.
- [46] Peter F. Stadler. 1995. *Towards a theory of landscapes*. In: R. Lopez-Pena, R. Capovilla, R. Garcia-Pelayo, H. Waelbroeck, F. Zertuche (Eds.). *Complex systems and binary networks*. Guanajuato Lectures, Lecture Notes in Physics, Held at Guanajuato, México, 16 – 22 January 1995, Springer-Verlag, 78-163.
- [47] Peter F. Stadler. 1996. *Landscapes and their correlation functions*. In: Journal of Mathematical chemistry 20.1 (1996), 1-45.
- [48] Eva Vallada, Rubén Ruiz, and Gerardo Minella. 2008. *Minimising total tardiness in the m-machine flowshop problem: A review and evaluation of heuristics and metaheuristics*. In: Computers & Operations Research 35.4 (2008), 1350-1373.
- [49] Karsten Weicker. 2007. *Evolutionäre Algorithmen*. Wiesbaden: Teubner.
- [50] E. Weinberger. 1990. *Correlated and uncorrelated fitness landscapes and how to tell the difference*. In: Biological Cybernetics 63.5 (1990), 325 - 336.
- [51] Xinjie Yu and Mitsuo Gen. 2010. *Introduction to Evolutionary Algorithms*. Springer-Verlag London.
- [52] Raymond Chiong (Editor). 2009. *Nature-*

Inspired Algorithms for Optimisation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

OPTIMAL SCHEDULING OF TWO-STAGE REENTRANT HYBRID FLOW SHOP FOR HEAT TREATMENT PROCESS

Noppachai Chalardkid
Tuanjai Somboonwiwat
Chareonchai Khompatraporn
Department of Production Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangkok 10140 Thailand
E-mail: tuanjai.som@kmutt.ac.th, charoenchai.kho@kmutt.ac.th

KEYWORDS

Optimal Scheduling, Reentrant Hybrid Flow Shop, Heat Treatment Process.

ABSTRACT

The reentrant hybrid flow shop for a heat treatment process is considered in this study. We consider job scheduling in a reentrant hybrid flow shop problem that consists of two stages in series. The first stage is washing, followed by heat treating in the second stage. Each job passes through the first and second stages, respectively, and then re-enters the first stage one more time. Since the first stage must process the jobs twice (with different processing times depending upon the type of the jobs), it becomes the bottleneck in this flow shop problem. To resolve this problem, the jobs needed to be better sequenced to balance the load among the first and the second stages. The objective is to minimize makespan of a set of jobs and increase the utilization of the both stages. This problem was formulated as a mixed integer program (MIP). The results from the data set show that the utilization of the second stage (heat treating) increased from 79.5% to their full capacity at 100%, exceeding the target set by the company at 95%.

INTRODUCTION

Heat treatment is a technique to enhance the properties of materials to a desired level. The heat treatment process is widely used with automotive parts to increase their strength. The process consists of a heating and cooling cycle. In practice, the parts are heated in heat furnaces and cooled by passing through washing machines. However, prior to the heating parts need to be washed to clean the parts. This production process is equivalent to a two-stage flow shop, whereas the first stage is washing, then heating, and re-washing (reentrance). Each stage may consist of several machines working in parallel. This problem is called a reentrant hybrid flow shop scheduling (RHFSS) (Choi et al. 2009).

The RHFSS problem was studied by Watanakich 2001. He studied a scheduling problem for a two-stage hybrid

flow shop with machine setup time, and solved the problem using a heuristic. The heuristic is composed of two phases. The first phase constructs a schedule and the second phase assigns jobs with setup time consideration according to the constructed schedule. Vignier et al. 1996 applied a branch and bound based algorithm to schedule jobs in multi-stages flow shop to minimize the makespan. Pan and Chen 2005 formulated a multi-stage reentrant hybrid flow shop as a mixed integer program (MIP). Their study also aims to minimize the makespan of a set of jobs. Choi et al. 2008 studied a mixed binary integer program of two-stage reentrant hybrid flow shop in which a due-date constraint was added to prevent tardiness. Their application was a coating process in automotive manufacturing that jobs were first coated in the paint shop, passed through an oven, and then coated the second time in the paint shop. Yalaoui et al. 2009 proposed several algorithms to solve a scheduling problem of a re-entrant production line. Their objective was to minimize the total tardiness. The performance of their heuristic was better than those of the EDD algorithm.

This paper presents a two-stage reentrant hybrid flow shop problem with due date constraints. In this flow shop all new jobs pass through the first and second stages. Then jobs reenter the first stage again. After the reentrance, jobs exit the flow shop. There are several identical machines (and furnaces) working in parallel at these stages. Jobs require different heat treatment times, but the time needed to wash them are the same. This problem is formulated as a mathematical program, and solved by LINGO commercial software.

The organization of this paper is as the following. The next section describes the two-stage re-entrant hybrid flow shop of the heat treatment process. Then the problem is formulated as a mixed integer program. A numerical example is presented to illustrate an application of the formulation. Finally, the paper is concluded.

PROBLEM DESCRIPTION

The heat treatment process is composed of three sequential processes. The first process is washing. Then the parts are heat treated, and passed through the second washing. The washing machines and heat treating furnaces were arranged as a two-stage hybrid flow shop. The flow of the jobs starts from entering through one of the washing machines (working in parallel) to clean the parts. Then each of the jobs will pass through one of the heat treating furnaces. Then each of the jobs re-enters any of the washing machines one more time, as shown in Figure 1.

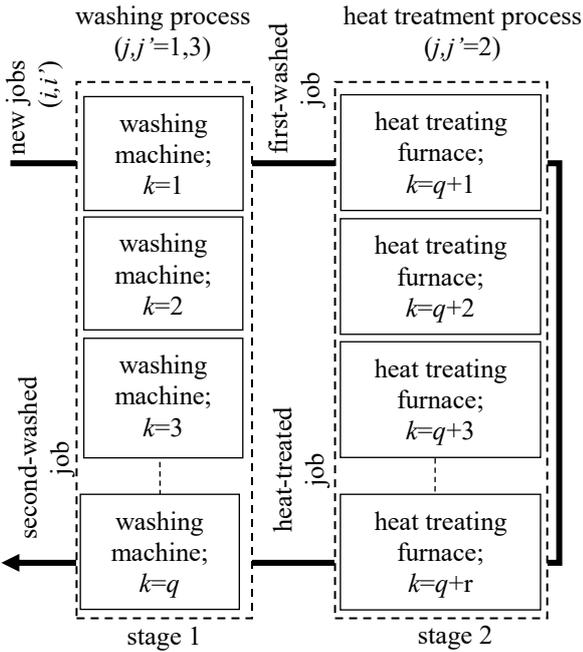


Figure 1: Two-stage Reentrant Hybrid Heat Treatment Flow Shop

The objective is to schedule jobs to these sets of the washing machines and the heat treatment furnaces so that the total makespan of all the jobs is minimized. This implies that the jobs must be sequenced to balance the utilization among these machines. To sequence the jobs, the starting times of each job to the washing machines and the furnaces, and their order must be determined. Since the jobs reenter the washing machines, each job needs two enter times to the washing machines. One for the first pass and the other for the second pass.

The next section describes this two-stage reentrant hybrid flow shop with various constraints as a mathematical program.

MATHEMATICAL FORMULATION

The mathematical model is a system of equations established to solve the problem of optimal scheduling of two-stage reentrant hybrid flow shop for heat treatment process. As earlier mentioned, the objective is to minimize the makespan.

Let X_{ijk} be the assignment of job i to machine (or furnace) k for processing operation j , and S_{ij} be the starting time of job i for processing operation j . The due date of job i is denoted by D_i . The followings are a complete list of all notations.

Indices

- i, i' jobs : $i, i' = 1, 2, 3, \dots, n$
- j, j' operations : $j, j' = 1$: first washing
 $j, j' = 2$: heat treatment
 $j, j' = 3$: second washing
- k machines at stage 1 : $k = 1, 2, 3, \dots, q$
furnaces at stage 2 : $k = q + 1, q + 2, q + 3, \dots, q + r$

Parameters

- D_i due-date of jobs i
- M very large positive number
- n number of jobs
- P_{ij} processing time of job i processed at operation j
- q number of machines at stage 1
- r number of furnaces at stage 2

Decision Variables

- S_{ij} starting time of job i processed at operation j
- $X_{ijk} = 1$ if job i processed at operation j on machine or furnace k , and 0 otherwise
- $Y_{ijj'} = 1$ if job i processed at operation j precedes job i' that processed at operation j' , and 0 otherwise

Objective Function

The objective function is to minimize the makespan. The equation is :

$$\text{Minimize } C_{max} \quad (1)$$

where C_{max} is described by Equations (10) and (11)

Constraints

1. For each job, the starting time of the next operation j' must follow the finish time of the current operation j :

$$\sum_{k=1}^q X_{ijk} (S_{ij} + P_{ij}) \leq \sum_{k=q}^{q+r} X_{ij'k} S_{ij'}, \quad \forall i, j = 1 \quad \text{and } j' = 2 \quad (2)$$

$$\sum_{k=q}^{q+r} X_{ijk} (S_{ij} + P_{ij}) \leq \sum_{k=1}^q X_{ij'k} S_{ij'}, \quad \forall i, j = 2 \quad \text{and } j' = 3 \quad (3)$$

2. Each job must be processed at operation j by only one machine (or furnace):

$$\sum_{k=1}^q X_{ijk} = 1, \forall i \text{ and } j = 1,3 \quad (4)$$

$$\sum_{k=q}^{q+r} X_{ijk} = 1, \forall i \text{ and } j = 2 \quad (5)$$

3. For the first stage, a job can be processed only on a machine at any time.

$$(2 - X_{ijk} - X_{i',j,k})M + (1 - Y_{ij',j'})M + S_{i',j'} - S_{ij} \leq P_{ij}, \text{ where} \\ 1 \leq i < i' \leq n, j, j' = 1,3 \text{ and } k = 1,2,3,\dots,q \quad (6)$$

$$(2 - X_{ijk} - X_{i',j,k})M + Y_{ij',j'}M + S_{ij} - S_{i',j'} \leq P_{i',j'}, \text{ where} \\ 1 \leq i < i' \leq n, j, j' = 1,3 \text{ and } k = 1,2,3,\dots,q \quad (7)$$

4. For the second stage, a job can be processed only on a machine at any time.

$$(2 - X_{ijk} - X_{i',j,k})M + (1 - Y_{ij',j'})M + S_{i',j} - S_{ij} \leq P_{ij}, \text{ where} \\ 1 \leq i < i' \leq n, j = 2 \text{ and } k = q+1, q+2, q+3,\dots, q+r \quad (8)$$

$$(2 - X_{ijk} - X_{i',j,k})M + Y_{ij',j'}M + S_{ij} - S_{i',j} \leq P_{i',j}, \text{ where} \\ 1 \leq i < i' \leq n, j = 2 \text{ and } k = q+1, q+2, q+3,\dots, q+r \quad (9)$$

5. For each job, the completion time must be less than the makespan.

$$\sum_{k=1}^q X_{ijk} (S_{ij} + P_{ij}) \leq C_{max}, \forall i \text{ and } j = 3 \quad (10)$$

$$C_{max} \geq 0 \quad (11)$$

6. For each job, the completion time must not exceed the due date.

$$\sum_{k=1}^q X_{ijk} (S_{ij} + P_{ij}) \leq D_i, \quad \forall i \text{ and } j = 3 \quad (12)$$

7. Constraints describing the decision variables.

$$S_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad (13)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j = 1,3 \text{ and } k = 1,2,3,\dots,q \quad (14)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j = 2 \text{ and } k = q+1, q+2, q+3,\dots, q+r \quad (15)$$

$$Y_{ij',j'} \in \{0,1\}, 1 \leq i < i' \leq n \text{ and } j, j' = 1,3 \quad (16)$$

$$Y_{ij',j} \in \{0,1\}, 1 \leq i < i' \leq n \text{ and } j = 2 \quad (17)$$

NUMERICAL EXAMPLE

In this example, 15 jobs were processed on two washing machines and two heat treating furnaces. We denote $k = 1$ and 2 to represent the two washing machines, and $k = 3$ and 4 to represent the two heat treating furnaces. There are four different types of jobs depend on the heat treatment time; 180, 300, 420 and 600 minutes. Each job was washed for 45 minutes during the first washing and then another 45 minutes for the second washing. All jobs must be completed in four days (or 5,760 minutes)

as shown in the Table 1. We assume that the first job starts at time zero.

Table 1: Job Processing Times and Due Dates

Job (i)	Processing time (P _{ij}), min.			Due date (D _i), min.
	First washing j=1	Heat treatment j=2	Second washing j=3	
1	45	180	45	5,760
2	45	300	45	5,760
3	45	300	45	5,760
4	45	420	45	5,760
5	45	600	45	5,760
6	45	180	45	5,760
7	45	300	45	5,760
8	45	300	45	5,760
9	45	420	45	5,760
10	45	600	45	5,760
11	45	180	45	5,760
12	45	300	45	5,760
13	45	300	45	5,760
14	45	420	45	5,760
15	45	600	45	5,760

Results

LINGO software is used to solved this problem. The results are shown in Table 2. The table shows the starting time and completion time of the jobs, or their schedule. The makespan is then calculated by taking the difference of the starting time of the first job that enters the flow shop and the completion time of the last job that leaves the flow shop.

The results show the optimal schedule of the jobs in this two-stage reentrant hybrid flow shop by minimizing the makespan under a specific due date. Each job is assigned to a specific machine and a furnace every time it passes through these stages, and only allowed to access the machine or the furnace at a specific starting time. For example Job 1 enters the washing machine No.2 ($k=2$) for 45 minutes, starting at the time 1,500 minute, then passes through the heat treating furnace No.2 ($k=4$) for 180 minutes immediately after leaving the washing machine. The job leaves the furnace at time 1,725 minute. Then the job waits to reenter the washing process through the first washing machine ($k=1$) at time 2,700 minute. The job is completed at time 2,745 minute. Other jobs can be described similarly.

From the table, the first jobs that enter the flow shop are Jobs 10 and 12, and the last jobs that leave are Jobs 2 and 4. The makespan of all the jobs is 2,790 minutes. With the job schedule details in Table 2, the utilization of heat treating furnaces is at 100% and all the jobs are completed prior to the due date. Details of the schedule of all the jobs by washing machines and heat treating furnaces can be found in Figure 2.

Table 2: Job Schedule

Job (i)	Process (j)	Processing time (P_{ij}), min.	Job assignment, X_{ijk}				Starting time (S_{ij}), min	Completion time, min
			Washing machine		Heat treating furnace			
			k=1	k=2	k=3	k=4		
1	1	45	0	1	0	0	1,500	1,545
	2	180	0	0	0	1	1,545	1,725
	3	45	1	0	0	0	2,700	2,745
2	1	45	0	1	0	0	2,325	2,370
	2	300	0	0	1	0	2,445	2,745
	3	45	1	0	0	0	2,745	2,790
3	1	45	1	0	0	0	2,100	2,145
	2	300	0	0	1	0	2,145	2,445
	3	45	0	1	0	0	2,445	2,490
4	1	45	0	1	0	0	2,280	2,325
	2	420	0	0	0	1	2,325	2,745
	3	45	0	1	0	0	2,745	2,790
5	1	45	1	0	0	0	480	525
	2	600	0	0	1	0	525	1,125
	3	45	0	1	0	0	2,370	2,415
6	1	45	0	1	0	0	300	345
	2	180	0	0	1	0	345	525
	3	45	0	1	0	0	2,235	2,280
7	1	45	1	0	0	0	1,170	1,215
	2	300	0	0	1	0	1,845	2,145
	3	45	0	1	0	0	2,145	2,190
8	1	45	0	1	0	0	1,080	1,125
	2	300	0	0	1	0	1,125	1,425
	3	45	0	1	0	0	1,425	1,470
9	1	45	0	1	0	0	90	135
	2	420	0	0	1	0	1,425	1,845
	3	45	1	0	0	0	1,845	1,890
10	1	45	1	0	0	0	0	45
	2	600	0	0	0	1	45	645
	3	45	0	1	0	0	645	690
11	1	45	1	0	0	0	90	135
	2	180	0	0	0	1	645	825
	3	45	1	0	0	0	2,655	2,700
12	1	45	0	1	0	0	0	45
	2	300	0	0	1	0	45	345
	3	45	1	0	0	0	2,610	2,655
13	1	45	1	0	0	0	135	180
	2	300	0	0	0	1	825	1,125
	3	45	1	0	0	0	1,125	1,170
14	1	45	1	0	0	0	45	90
	2	420	0	0	0	1	1,125	1,545
	3	45	1	0	0	0	1,545	1,590
15	1	45	0	1	0	0	45	90
	2	600	0	0	0	1	1,725	2,325
	3	45	1	0	0	0	2,325	2,370

Although there are merely 15 jobs in this example, the problem requires approximately two and a half hours to obtain the final optimal solution by LINGO. First, the software found an upper bound of the optimal solution, then this bound was entered to the software to find the final solution. This shows that scheduling jobs in this type of flow shop is not an easy task.

CONCLUSION

A two-stage reentrant hybrid flow shop with washing and heat treatment processes as the two stages is addressed in this paper. The reentrance occurs only at the first stage, after the jobs leave the second stage. The problem is formulated as a mixed integer program. A numerical example is used to illustrate the application of the formulation, and solved by a commercial software, LINGO. In the example, 15 jobs are scheduled to minimize the makespan under a specific due date. It was found that the schedule of the jobs to the first washing affects the utilization of the heat treating furnaces, whereas the schedule of the second washing is critical to the final makespan. The schedule obtained balances the workload among the machines and furnaces. As a consequence, the utilization of the furnaces increased from 79.5% to 100% (theoretically), exceeding the 95% target set by the company. This model can also be extended to a flow shop with more than two stages, and the jobs may reenter to any of the stages. For large-scale problems, a heuristic may be developed to quickly solve the problem because a multi-stage reentrant hybrid flow shop scheduling is considered as a hard problem.

REFERENCES

- Choi, H.S., Kim, H.W., Lee, D.H., Yoon, J., Yun, C.Y. and K.B. Chae. 2008. "Scheduling algorithms for two-stage reentrant hybrid flow shops: minimizing makespan under the maximum allowable due dates," *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.42, 963–973.
- Pan, J.C. and J. Chen. 2005. "Mixed binary integer programming formulations for the reentrant job shop scheduling problem," *Computers & Operations Research*, Vol.32, 1197–1212.
- Vignier, A., Dardilhac, D., Dezalay, D. and C. Proust. 1996. "A branch and bound approach to minimize the total completion time in a k-stage hybrid flowshop," *Proceedings of 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Vol.1, pp. 215-220.
- Watanakich, P., 2001, Scheduling for a Two-Stage Hybrid Flow Shop With Machine Setup Time, Master of Engineering Thesis, Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, pp. 1-55.
- Yalaoui, N., Camara, M., Amodeo, L., Yalaoui, F. and H. Mahdi. 2009, "New heuristic for scheduling re-entrant production lines," *Proceedings of the International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE 2009)*, pp.199-204.

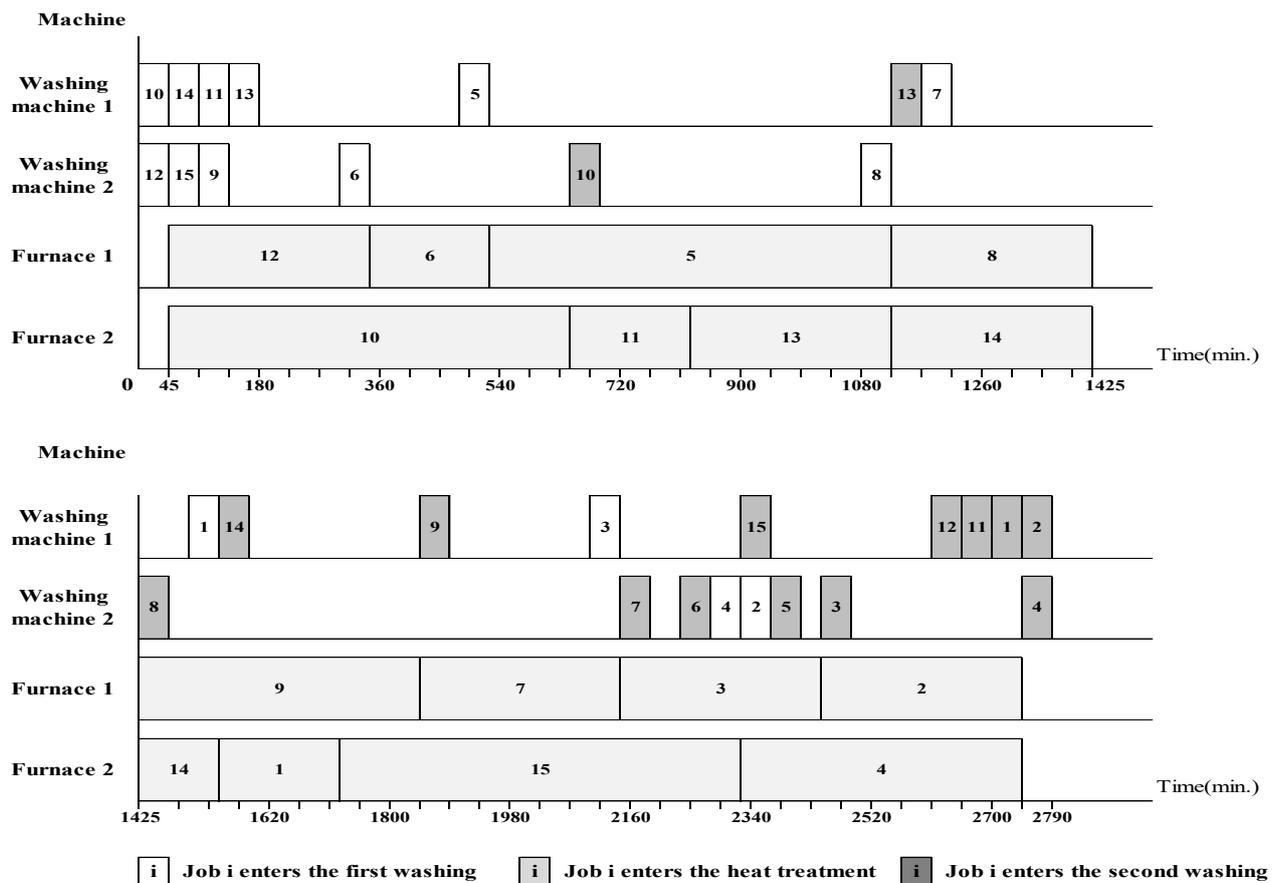


Figure 2: Job Schedule by Machines and Furnaces

AUTHOR BIOGRAPHIES



NOPPACHAI CHALADKID was a graduate student in Industrial and Manufacturing Systems Engineering program at the Department of Production Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. He received his bachelor's degree in Electronics and Telecommunication Engineering from the same university. His research interests are in supply chain management and applied statistics. His e-mail address is: ene46221226@yahoo.com.



TUANJAI SOMBOONWIWAT is an Associate Professor in the Industrial Management section, Department of Production Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. She received her M.Eng. in Industrial Engineering from Chulalongkhorn University, Thailand and Ph.D. in Industrial Engineering from Corvallis, Oregon State University, USA. Her research interests include green supply chain and logistics, business process and

applications of operations research. Her e-mail address is: tuanjai.som@kmutt.ac.th.



CHAROENCHAI KHOMPATRAPORN holds a Ph.D. from University of Washington, USA. His research interests include supply chain and logistics management, applied operations research, optimization algorithms, and industrial sustainable operations management. He has been working closely with both public and private sectors such as the hard disk drive industry, the automotive industry, and Thai Red Cross. His e-mail address is: charoENCHAI.kho@kmutt.ac.th

Optimization of Work-Center Cycle Time Target Setting in a Semiconductor Wafer Fab

Hermann Gold and Hannah Dusch

Infineon Technologies AG, Wernerwerkstrasse 2, 93049 Regensburg

Abstract—In this paper the problem of assigning target cycle times at operation level in a semiconductor wafer fab, where target end-to-end-delays are given, is considered. In the original position allowed waiting times are assigned at processing stations proportional to the square root of processing times. We apply the fairness principle which claims that waiting times should be proportional to processing times at so-called machine resource pools. To match overall cycle time targets the normalization constants are adjusted using LP and QP methods.

Index Terms—Queuing Networks, Optimization

I. PROBLEM DESCRIPTION

We consider a semiconductor manufacturing facility, called FAB, which resembles a traditional job shop with recirculation and in which single servers are replaced by complex work centers. There is a variety of products (with a corresponding index set $g \in G$, g mnemonic for good) which are produced in wafer lots, each lot being released into FAB with an associated process flow, or recipe, that consists of a prescribed ordered set of operations.

FAB is part of a complex supply chain (SC). At the interface between SC and FAB managers negotiate a loading for FAB for a certain time period, typically week, thus defining the number of wafer starts per week ($wspw$) and per product. With the acceptance of the loading, which may be only part of what SC managers would demand, the manager of FAB promises to deliver the loaded wafer lots (or jobs) with a pre-specified due-date lead time derived from fab cycle time. Let the sum of all processing times for product g arising in FAB be $b_g^{(tot)}$ (total processing time for product g). Herein processing times are considered to be fixed at their expected values under an optimal routing scheme. Assume that there is a number of exogenous priority corridors with index set P , each external demand being assigned to a particular priority corridor according to negotiation. Then the following should hold.

R1: The fab cycle time $S_{p,g}^{tot}$, defined by the total time spent in Fab by a wafer lot, for some product g released in a given priority corridor p , is proportional to its respective total processing time $b_g^{(tot)}$, with a proportionality factor c_p dependent on priority corridor p , but independent of product

index g , hence $S_{p,g}^{(tot)} = c_p \cdot b_g^{(tot)}$.

Typically, there are few priority corridors, around 3 to 6, e. g. rocket lots, hot lots, normal lots, and as many as a few hundred products, in the different priority corridors. Different quantities of the same product can be assigned to different priority corridors in a given time period. In this research we consider the problem of breaking these fab cycle time targets down to cycle time targets for the individual operations of each combination of product and priority corridor. Normalized cycle time and waiting times at operations step level are mathematically denoted FF_l and $FF_l^{(W)}$, respectively, $l \in L_g$ the set of operation steps of product g . Hereby, as usual in semiconductor manufacturing, FF stands for flow factor.

II. ORIGINAL TARGET SETTING AND FAIRNESS

The original position from where we started our work on cycle time and flow factor target setting was established by purely inductive reasoning. Its essence is that normalized waiting time FF_W at a given process step should be inverse proportional to the processing time of the step. Mathematically, this original position is formulated as follows:

$$\text{OP:} \quad FF_W \sim \frac{1}{\sqrt{b}} \Rightarrow \text{waiting time } w \sim \sqrt{b} \quad (1)$$

Relation (1) is extended by an offset, which is not considered important for this report. However, it is important to note that further linear scaling of the set $\{FF_{pgl}^{(W)}, p \in P, g \in G, l \in L_g\}$ for each product with a distinctive overall target X-Factor is required, since (1) is oblivious of the effect of folding the series of individual step cycle times resulting from individual step flow factors for each such product and for the different priority corridors.

There are numerous arguments to defy the original position, all brilliantly speculative, but one - this is a truth: The relaxation time as a measure for the speed of approach to the stationary situation for a stable queueing system is proportional to the service time divided by $(1 - \sqrt{\rho})^2$, ρ being the utilization level in a single server approximation of the work center serving the process step under consideration. In attempt to smoothen material flow in FAB, (1) was originally designed to give higher priority weight to longer jobs as it would occur in a time-dependent priority system according to [6]. However, in

the meantime it became clear, that prioritization of long jobs can significantly increase variance and decrease efficiency in terms of average waiting times with a negative impact on on-time-delivery by FAB, when service times are highly variant (see [1]). This is an argument against **OP**.

We conclude that the principle (1) is a robust guideline for cycle time target setting from managers' viewpoint, but it should be compromised for the counterargument given above and for the sake of reduction of complexity. In this work we follow a rigorous approach given in the following.

R2: For some fixed pair of customer priority corridor p and work center r we require that in any operation step of corridor- p -customers visiting work center r the expected waiting time is proportional to the expected service time with a common proportionality factor $c_{p,r}$, which is denoted as (target) flow factor for priority class p at work center r , $FF_{p,r}$ being the associated variable. That is to say, at the work center level we deploy the same proportionality principle as at the fab level (see **R1** of Section 1).

The rigor of our approach becomes obvious under the categorization of the regimes presented with respect to fairness. To the authors' best knowledge there are three fairness measures which can be considered the best investigated ones: i) variance of stationary waiting times, minimum variance is best. ii) waiting time proportional to service time and iii) quality of load sharing (see [1]). Obviously, the fairness measure invoked by ii) is underlying requirements **R1** and **R2**. A closer look reveals that the original position **OP** has its closest acquaintance with fairness measure i) since smaller target flow factors for processes with larger processing times tend to flatten out the differences in absolute target waiting times, though not rigorously. Requirement **R2** is achieved in expectation in symmetric queues and it is this property which the load sharing concept deployed in FAB aims at (see [4]).

III. FF TARGETS OPTIMIZATION

A. Pooling of Resources

We are now going to construct a Kelly type network of FAB. Central to this construction is a load sharing algorithm which is designed in the following way. To begin with, we build sets of communicating servers, which we call closed machine sets (CMS). A closed machine set is a minimal set of machines from which load neither can be shifted from its inside to its outside nor in the reverse direction. To formalize this, we consider aggregations of jobs, called job classes, characterized as follows. Two jobs belong to the same job class if and only if they have all parameters relevant for the determination of machine utilization levels in common. We call these parameters first-order parameters in accordance with stochastic processing network modelling practice. First-order parameters do not allow to capture the effects of statistical variability. In a semiconductor manufacturing network they

include: 1) the subset of machines on which a given job class can be processed. This is referred to as dedication by practitioners. 2) the machine-dependent processing times of a job class. 3) the maximum sizes of batches of wafer lots that can be served during one service period in case of batch service, typically occurring at furnace operation steps, which can also be machine-dependent. 4) machine internal process flow alternatives, described by Boolean expressions. Machines featuring this possibility are called cluster tools. Job classes are associated with an index set $j \in J$. For easier notation we make job class indices unique over all CMS in the sequel. Hence with each $l \in L_g$, for some $g \in G$ a unique job class j is associated.

Now, two machines x and y are in the same closed machines set if and only if there is a chain of job classes z_1, \dots, z_n and a set of machines m_1, \dots, m_{n-1} such that z_1 can be processed on x and m_1 , z_i can be processed on m_{i-1} and m_i , for $i = 2, \dots, n-1$, and z_n can be processed on m_{n-1} and y . Within each CMS we build disjoint subsets of resources, called resource pools, inside each of which load can be distributed in a way such that all its servers are homogeneously loaded. The load levels are determined according to the well-known lexical difference principle defined by J. Rawls, where in our setting the gain for which machines compete is idling. This is favourable for waiting time reduction in queueing systems. The corresponding algorithm is described in [4] and references therein. Henceforth resource pools are associated with an index set $r \in R$. According to fairness measure iii) the resource pool concept provides a guideline to achieve efficiency in terms of average waiting times since "it tends not to allow any server [of a given resource pool] to be idle while there are jobs awaiting processing in front of it". Pooling of resources along these lines gives rise to approximate FAB by a Kelly type network. Resource pools generally coincide with work centers.

B. Work Conservation Laws

Let us recall, that in the original position the flow factors for the different operation steps, products and priority classes are considered to be completely static over all time, independent of product mix and volume release and the consequent machine utilization levels.

Implicitly, by observing FAB dynamically in time, these static numbers result in a target profile of unfinished work, since each lot of the work in progress (WIP) is tagged with a specific waiting time allowance. To improve target setting this profile should not be taken as a surprise, instead we need to acknowledge the amount of unfinished work as an important characteristic in the planning phases. A natural choice for the aggregation of unfinished work is the set of resource pools. Considering the system in the original position as a time-dependent priority system we apply the $M/G/1$ -conservation law (see [5]), hereby approximating resource pools as one-server systems.

Some of the conditions which are prerequisite for the validity of M/G/1 and GI/G/1 conservation laws are crucial in semiconductor manufacturing. Firstly, a (resource pool) server must always be busy if there are jobs queueing in front of it. The optimal nominal plan is considered to provide a guideline for putting this fairly good into scheduling practice. Secondly, we need to be careful about the condition of arrivals to be Poisson. From measurement and statistical analysis we know that this condition is sufficiently fulfilled for large resource pools, e.g. like photolithography. For small resource pools with just one or two machines, arrival processes are typically more generally distributed, but from conservation law extensions as reported in [2] it is known that the law still holds in that case when service times for all classes are equal. If this is not the case the conservation law is an approximation. The condition that work can neither be generated nor destroyed is somewhat crucial when significant job-class dependent and sequencing dependent setups are required, i.e. at implantation work centers of FAB.

In the application we differentiate the conservation law with respect to exogenous priority corridors. Let P_g be the set of priority corridors having product g as a member. For some pair (p, r) , $p \in P$, $r \in R$, let $T(p, r) = \{(g, j)/p \in P_g \wedge g \text{ visits } r \text{ as job class } j\}$. Relating to the original position **OP** (indicated in the upper index of the flow factor, namely $\text{FF}^{(W, OP)}$), we get

$$C_{p,r} = \sum_{T(p,r)} \rho_{gj} * \text{FF}_{pgjr}^{(W, OP)} * b_{gj} \quad (2)$$

With fairness principle ii) applied within priority corridors $\text{FF}_{p,g,j,r}^{(W)}$ depends only on p and r , yielding $\text{FF}_{p,r}^{(W)}$ according to the requirement **R1** of Section II.

$$\begin{aligned} C_{p,r} &= \text{FF}_{p,r}^{(W)} * \sum_{T(p,r)} \rho_{gj} * b_{gj} \\ \text{FF}_{p,r}^{(W)} &= \frac{C_{p,r}}{\sum_{T(p,r)} \rho_{gj} * b_{gj}} \end{aligned} \quad (3)$$

C. LP and QP Programs for Flow Factor Target Setting

With the flow factor unifications on the basis of the conservation law for a given exogenous priority corridor the sum of the cycle times of a given route is no longer perfectly adapted to its overall target cycle time, in general. Target flow factors will be recaptured by optimization via LP and QP. Using an LP formulation target cycle times per priority group can be fulfilled only with early delivery for some products. The advantage of LP solutions is that the burden of changes in target flow factors is put fairly on all shoulders. The basic LP program for some $p \in P$ is the following:

Minimize $-\delta$

subject to

$$B \cdot (FF + \Delta) \leq S, \quad S = c_p(B \cdot \mathbf{1}) \quad (4)$$

$$-\Delta \leq -\delta \mathbf{1} \quad (5)$$

$$FF + \Delta \geq \mathbf{1} \quad (6)$$

Hereby B is a $|G| \times |R|$ -dimensional matrix, with $b_{g,r}$ being the service time requirement of product g at resource pool r , FF is the vector of unified resource pool target flow factors, Δ is the vector of changes in flow factors and $\mathbf{1}$ is an $|R|$ -dimensional vector of ones. The optimization goal is to minimize the maximum change (5) while avoiding any lateness (4). Constraint (6) guarantees that waiting times are greater or equal 0. The final solution will be found by a cascade of such LPs leading to a set of δ 's values each of which is assigned to a set of resource pools. The algorithm is applied with exogenous priorities only (LPPRIO1) or with exogenous and endogenous priorities (LPPRIO2). Minimizing the sum of squared deviations from unified flow factors and replacing the \leq -sign in constraint (4) by an equality sign leads to a QP optimization problem (omitting (5)).

The results for a typical instance of FAB with just one priority corridor are summarized in Table 1. It contains statistics both on the resulting vector Δ and on the relative deviation D between sojourn time S' which is achieved in the final solution according to LHS-values of (4) and target sojourn time S , given by $(S - S')/S$ for each $g \in G$. As can be seen in column Max regarding D , the match of S' with S is within 7.2% when algorithm LPPRIO1 is applied. Usually a deviation of more than 5% for any $g \in G$ would not be tolerable. Using LPPRIO1 this tolerance is slightly violated, but the main reason for LPPRIO1 to be disqualified for practical use are the huge enlargements for flow factors for some resource pools which are proposed through it, as can be seen in the results regarding Δ . The reason is that with no further endogenous priorities for some given exogenous priority p too many resource pools are imposed with a relatively high negative δ . Relieving this by using LPPRIO2 the target match between S' and S is easily achieved at the cost of some increase in complexity (number of endogenous priorities en), but complexity, abbreviated with CO in Table 1, is still only 10.4% of the complexity associated with the original position. Finally, using QP the minimum value of Δ of -1.47 is extremely unfair and therefore the QP solution is of no practical use. More details on algorithms and results presented in this section are reported in [3].

		LPPRIO1	LPPRIO2	QP
Δ	Mean	0.882	$7.06 \cdot 10^{-4}$	0.349
	Median	0.125	0	0.295
	Max	48.2	0.0379	0.802
	Min	-0.0673	0	-1.47
D	Mean	2.91	0.985	0
	Median	1.7	0.809	0
	Max	7.22	3.68	0
Prios	<i>en</i>	1	58	1
CO over OP		0.004	0.104	0.004

Table 1. Summary of results for LP and QP optimization

IV. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this paper we considered the problem of cycle time target setting in a semiconductor fab. This kind of target setting is a device to cope with the stochasticity of the related queueing network so as to achieve due date delivery. The aim was to reduce the complexity of this system with its over 50000 subtargets for a wafer fab in order to provide easier guidance and managability of the system.

The analysis of the system at the start of this work revealed that a main lever towards this aim would be to derive work load estimates at the level of resource pools which are easier to control and evaluate than the numerous individual subtargets. Though it was yet possible to aggregate flow factors for individual lot arrival streams via averaging them within pre-defined categories in multiple dimensions in the initial position, tagging them with their individual load contribution factors has made them amenable to the application of Kleinrock's work conservation law for queueing systems. Thus, given that individual subtargets were achievable, we could provide correct resource pool work load estimators. In cases where they were not, we could at least improve those estimators significantly.

Our main idea realized in this work was to homogenize global and local cycle time targets by applying the same fairness principle locally and globally, which is formalized mathematically in a corresponding optimization scheme. By use of a cascaded Linear Programming approach we provided a new target setting system which has huge advantages over the old one. First, it reduces the complexity in terms of the number of subtargets to only 10% in comparison to the old system and thus features higher transparency from the very beginning. Second, since the system is designed around resource pools, it lends itself to easier, computationally efficient, queueing network analysis.

In future work the work load formula used in Section III-B and the optimization scheme will be refined, in that characteristics from resource pool operating curves are incorporated in the related procedures. The main challenge here is to adapt the analysis of multi-server-multiple-queue systems for use in multi-server systems with dedicated and discretionary traffic streams. Given this, we will focus on cycle time distributions

analysis. In particular we need to provide the 95%-Percentiles of product cycle times which are very important in practical use.

V. ADDITIONAL INFORMATION

The work presented here has been done while the co-author was employed at Infineon Technologies AG. Her contribution to this paper is part of her master thesis done at OTH Regensburg and Infineon Technologies AG. She is now working with Osram Opto Semiconductors GmbH, Leibnizstrasse 4, 93055 Regensburg.

E-Mail:

Hannah.Dusch@osram-os.com

Hermann.Gold@infineon.com

REFERENCES

- [1] Avi-Itzhak B., Levy H.: On Measuring Fairness in Queues. *Adv. Appl. Prob.*, Vol. 36, 919-936 (2004).
- [2] Bolch, G., Greiner, S., de Meer, H., Trivedi, K.S.: *Queueing networks and Markov chains*, John Wiley & Sons (1998).
- [3] Dusch, H.: *Komplexitätsreduktion und Optimierung der Durchlaufzeitziele in einer Halbleiterfabrik* [Master Thesis], Regensburg: Technische Hochschule, 2017.
- [4] Gold, H.: Why our company uses programming languages for mathematical modeling and optimization, In: Kallrath J., *Algebraic modeling systems*, 161-169, Springer, 2012.
- [5] Kleinrock, L.: A Conservation Law for a Wide Class of Queueing Disciplines, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 12, 181-192 (1965).
- [6] Kleinrock L., Finkelstein R.P.: Time Dependent Priority Queues, *Operations Research*, Vol. 15, 104-116 (1976).

Benchmark für ein personalisiertes Empfehlungssystem mit zeitlicher Segmentierung basierend auf Assoziationsregeln

Johanna Buchert
Kompetenzzentrum
für Informationstechnologie
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen
johanna.buchert@web.de

Michael Guckert
Kompetenzzentrum
für Informationstechnologie
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen
michael.guckert@mnd.thm.de

Christian Schulze
Kompetenzzentrum
für Informationstechnologie
Technische Hochschule Mittelhessen
Wiesenstr. 14, 35390 Gießen
christian.schulze@mnd.thm.de

Zusammenfassung—In der heutigen Zeit ist es üblich geworden, im Online-Marketing Empfehlungssysteme einzusetzen. Im Folgenden wird ein Empfehlungsalgorithmus vorgestellt, der auf Basis von Kaufinformationen mit Hilfe von Assoziationsregeln und unter Berücksichtigung des Zeitpunkts des Kaufs personalisierte Produktempfehlungen generiert. Des Weiteren wird ein Benchmark mit dem vorgestellten, einem auf Assoziationsregeln basierenden und einem ItemKNN-Algorithmus unter Verwendung realer Kaufdaten erstellt. Die beiden zuletzt genannten Algorithmen wurden der Open-Source-Bibliothek LibRec entnommen.

SCHLÜSSELWÖRTER

Empfehlungssysteme, Assoziationsanalyse, Benchmark, LibRec

I. EINLEITUNG

Um den Kunden personalisierte Werbung anzeigen zu können, verwenden Betreiber von Online-Shops verschiedenste Empfehlungsalgorithmen. Diese können in die Kategorien Content Based-, Collaborative- (CF) und Hybrid Filtering unterteilt werden. Während Content Based Filtering ausschließlich die Kauf-/Ratinghistorie eines einzelnen Kunden für seine Kaufprognosen berücksichtigt, werden beim CF verschiedene Kunden und Produkte zur Erstellung von Kauf-/Ratingprognosen mit einbezogen. Als Hybrid Filtering wird eine Mischung der beiden zuvor genannten Varianten bezeichnet (vgl. [Kla09]).

Der im Folgenden als PAROT-Algorithmus bezeichnete Algorithmus basiert auf Assoziationsregeln, die den Kaufzeitpunkt des Produkts berücksichtigen. Somit handelt es sich um Hybrid Filtering. Um zu verifizieren, wie gut der PAROT-Algorithmus im Vergleich zu anderen Algorithmen abschneidet, werden zwei Open-Source-Algorithmen der LibRecBibliothek (www.librec.net) verwendet. Der erstellte Benchmark basiert auf Kaufdaten, welche binären Ratings entsprechen.

II. EMPFEHLUNGSSYSTEME IN DER PRAXIS

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Empfehlungssystemen, die in der Praxis eingesetzt oder zur wissenschaftlichen Forschung verwendet werden. Sie basieren u.a. auf den oben

genannten Ansätzen, die jedoch auf sehr vielfältige Weise umgesetzt werden. Empfehlungssysteme lassen sich bezüglich ihres Vorkommens in der Praxis grob in vier Gruppen einteilen:

- Empfehlungssysteme, die von Großkonzernen (z.B. Amazon und Netflix) selbst entwickelt und nur dort eingesetzt werden.
- Empfehlungssysteme, die als Software as a Service (SaaS) von IT-Unternehmen bereitgestellt und bei verschiedenen Unternehmen eingesetzt werden, die unter anderem aus Kosten- oder Wissensgründen keine eigenen Systeme entwickeln.
- Empfehlungssysteme, die von kleinen und mittelständischen Unternehmen selbst entwickelt und ausschließlich unternehmensintern eingesetzt werden.
- Empfehlungssysteme, die als Open-Source-Lösungen frei verfügbar sind, jedoch von den Unternehmen, die sie nutzen wollen, selbst in ihre IT-Systeme eingebunden werden müssen. Einige in der Forschung verwendete Empfehlungsalgorithmen fallen in diesen Bereich.

Zu Empfehlungssystemen aus der dritten Kategorie lassen sich im Allgemeinen keine Hinweise auf die verwendeten Algorithmen finden, da diese Empfehlungssysteme ausschließlich unternehmensintern verwendet werden.

Zwar lassen sich sehr viele Empfehlungssysteme aus den ersten beiden Kategorien finden, jedoch sind über sie nur eher oberflächliche Informationen dokumentiert. Großkonzerne und IT-Unternehmen, die Empfehlungssysteme kostenpflichtig entwickeln und anbieten, investieren oftmals viel Human- und Finanzkapital in ihre Systeme, damit ihre Empfehlungen treffsicherer sind als die ihre Konkurrenten. Wären zu viele Details über sie bekannt, könnten die Algorithmen nachgeahmt werden, was die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen und den Umsatz schmälern würde. Exemplarisch sind hier die Empfehlungssysteme von *Amazon*, *Netflix* sowie *Zalando* und als SaaS-Algorithmen *Episerver Personalization* (vgl. [EPI20] www.episerver.com) sowie *epoq internet services GmbH* (vgl.

[EPOa] www.epog.de) zu nennen.

- Amazon startete mit einem auf Item Based Collaborative Filtering basierenden Empfehlungssystem bereits 1998. Bis heute wurde dieser Ansatz beibehalten. Letztlich geht es darum, für Kunden individuell anhand ihrer Kauf- und Klickhistorie und ihrem aktuellen Verhalten auf der Homepage von Amazon ähnliche Produkte herauszusuchen. Dabei werden Produkte, die der Kunde bereits betrachtet oder gekauft hat, herausgefiltert und von den übrig gebliebenen die ausgespielt, für die sich der Kunde am wahrscheinlichsten interessieren wird (vgl. [SL17]).
- Das von Zalando verwendete personalisierte Empfehlungssystem basiert auf Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN). Dazu werden für jeden Kunden seine Kauf-, Klick- und sonstigen Verhaltensdaten als Zeitreihe gespeichert. Trainiert wird dieses KNN ausschließlich mittels Kaufdaten, Ratingdaten werden nicht hinzugezogen. Die Kombination, welcher Kunde welches Produkt gekauft hat, wird in einer spärlich befüllten Kunden-Produkt-Matrix erfasst. Das KNN wird so trainiert, dass der durchschnittliche Cross-Entropie-Verlust für jeden Artikel über die Kunden minimiert wird. Mit einer logistischen Regression kann für jedes Feld der Kunden-Produkt-Matrix ein Wert geschätzt werden, der angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Kunde ein bestimmtes Produkt kaufen wird (vgl. [HBV17]).
Um die zeitliche Abfolge mit einzubeziehen, wird im nächsten Schritt ein zweites KNN mit einem LSTM-Layer (Long short-term memory) hinzugefügt, in das die Ergebnisse des ersten Netzes und die Kaufhistorie des Kunden als Input einfließen. Als Resultat prognostiziert dieses Netz, welchen Kleidungsstil der Kunde bevorzugt und wie dieser sich mit der Zeit verändern wird (z.B. saisonale Unterschiede) (vgl. [HBV17]).
- Netflix verwendet eine Kombination aus verschiedenen Empfehlungsalgorithmen. Zu diesen zählen u.a. der Personalized Video Ranker, der Top-N Video Ranker und die Video-Video Similarity. Mithilfe dieser Algorithmen entstehen für einen typischen Nutzer von Netflix ca. 1.000 verschiedene Reihen mit verschiedenen Schwerpunkten. Abschließend wird ein weiterer Algorithmus verwendet, um zu selektieren, welche dieser Reihen letztendlich für den Kunden auf der personalisierten Homepage angezeigt werden. Insgesamt basieren die von Netflix verwendeten Empfehlungsalgorithmen sowohl auf Ansätzen des überwachten Lernens wie Klassifikationen und Regressionen als auch auf Ansätzen des unüberwachten Lernens wie Dimensionsreduktion (z.B. Matrixfaktorisierung) (vgl. [GH15]).
- Der von Episerver verwendete Empfehlungsalgorithmus basiert nicht auf Regeln, sondern auf dem Verhaltensmuster von Besuchern und Besuchergruppen bzgl. ihrer Customer Journey. Für die Prognosen werden insbesondere die zu einem Nutzer ähnlichen Kunden berücksichtigt. Als Ziel generiert das Empfehlungssystem personalisierte

Rankings von Produkten auf Basis von ähnlichen Kunden und inhaltsbasierten Empfehlungen (vgl. [EPI]).

Diese Informationen über den Episerver-Empfehlungsalgorithmus lassen die Schlussfolgerung zu, dass es sich um einen hybriden Ansatz handelt, der nachbarschaftsbasiertes Collaborative Filtering mit einem Content Based Filtering Ansatz kombiniert.

- Das epoq-Empfehlungssystem analysiert das Kauf- und Klickverhalten der Nutzer. Mithilfe eines wissensbasierten Ansatzes werden damit personalisierte Empfehlungen ermittelt und ausgespielt. Falls über einen Nutzer noch keine Informationen bekannt sind, wird ihm keine personalisierte Empfehlung, sondern eine Bestsellerliste angezeigt. Die Empfehlungen basieren auf den Informationen, was andere Kunden gekauft haben (Kundenähnlichkeit) und inhaltlich passenden Produkten (vgl. [EPOb]).
Es handelt sich beim epoq-Empfehlungsalgorithmus vermutlich um eine User Based Collaborative Filtering Variante, die mit einem Content Based Filtering kombiniert wird.

Viele in der Forschung verwendete Empfehlungssysteme fallen in den Bereich der Open-Source-Lösungen (vierte Kategorie). Einige dieser Algorithmen wurden sogar explizit von akademischen Einrichtungen entworfen, was dazu führt, dass sie entweder bereits gut dokumentiert sind oder aufgrund des frei verfügbaren Quellcodes bis ins kleinste Detail analysiert werden können. Zu diesen Empfehlungssystemen zählen unter anderem die LibRec-Bibliothek und MyMediaLite.

- LibRec ist eine Java-Bibliothek für Empfehlungssysteme. Sie enthält eine Auswahl an verschiedenen Empfehlungsansätzen, die sowohl für das Erstellen von Rating- als auch Produktprognosen verwendet werden können. Darüber hinaus bietet sie vorimplementiert verschiedene Ähnlichkeitsmaße an, die in den Algorithmen zum Einsatz kommen können und Methoden zur Datenaufbereitung und Berechnung von Metriken wie Precision und RMSE. Die Empfehlungsalgorithmen von LibRec können vielfältig eingesetzt werden, da sie je nach Ausrichtung Beziehungen zwischen Produkten, Kunden, Produkten und Kunden aber auch Beziehungen innerhalb von sozialen Informationen analysieren und darauf aufbauend Empfehlungen erstellen können (vgl. [Guo+15], [LIB17] www.librec.net).
- Die MyMediaLite Recommender System Library wurde von einem Team der Universität Hildesheim erstellt. Sie enthält sowohl Algorithmen, die Ratings prognostizieren, als auch welche, die Rankings erstellen. Neben Basisalgorithmen wie dem Most Popular Recommender sind klassische Empfehlungsansätze wie ItemKNN und UserKNN implementiert. Zusätzlich sind Algorithmen, die eine Matrixfaktorisierung enthalten, wie z.B. BPRMF (Bayesian Personalized Ranking Matrix Factorization) und WRMF (Weighted Regularized Matrix Factorization), in der Bibliothek vorhanden. Die Algorithmen können un-

ter anderem durch verschiedene Parametereinstellungen und Ähnlichkeitsmaße modifiziert werden. MyMediaLite stellt dazu Klassen zur Berechnung der Ähnlichkeit (z.B. Jaccard Koeffizient, Pearsonscher Korrelationskoeffizient, Kosinusähnlichkeit) und Metriken zur Bewertung der Algorithmen wie den MAE, RMSE und prec@N bereit (vgl. [Gan+] und [Gan+15]).

III. DER PAROT-ALGORITHMUS

A. Datenaufbereitung

Für den PAROT-Algorithmus werden Datensätze benötigt, die eine eindeutige Kundennummer (Menge aller Kundennummern: ID), eine Produktnummer (Menge aller Produktnummern: Item) und den Kaufzeitpunkt (Menge aller Kauftage: Date) auf Tagesbasis enthalten. Zunächst müssen die Daten so aufbereitet werden, dass jede Transaktion, bestehend aus einer ID, Item und Date, nach ihren Kaufdaten einem der vier Zeiträume *Input*, *Target*, *Apply* und *Validate* zugeordnet werden kann (siehe Abb. 1). Die Zeiträume *Input* und *Apply* sowie *Target* und *Validate* sind jeweils gleich lang.

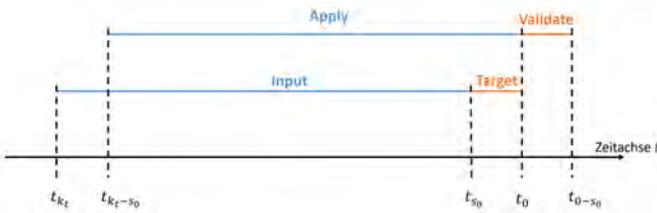


Abbildung 1: Einteilung in Zeiträume

Auf Basis der Daten in *Input* und *Target* wird ein Prognosemodell entwickelt. Dieses wird im nächsten Schritt auf den Zeitraum *Apply* angewandt. Mithilfe der Daten des *Validate*-Zeitraums kann anschließend verifiziert werden, wie zutreffend die erstellten Prognosen waren. Zusätzlich zur Einteilung in die vier Zeiträume werden die zu *Input* und *Apply* gehörenden Daten in Segmente unterteilt (Menge aller Segmente: Segment). Die Segmente sind von ihrer Länge her so zu wählen, dass sie länger werden, je weiter die Daten in der Vergangenheit liegen. Die Anzahl an Tagen in den einzelnen Segmenten ist für *Input* und *Apply* gleich.

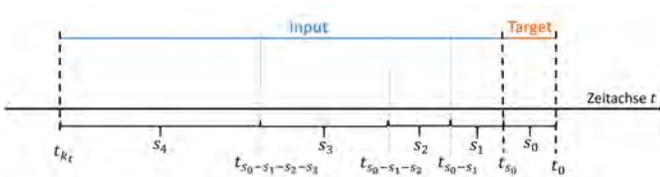


Abbildung 2: Einteilung in Segmente

Da im weiteren Verlauf lediglich die Segmentzuweisung bzw. die Einteilung in *Target* und *Validate* von Bedeutung ist, muss das genaue Kaufdatum nicht weiter berücksichtigt

werden. Transaktionen, die in den Zeiträumen *Input* und *Apply* liegen können eindeutig mit

$$T_i := (ID_j, It_I, Seg_l) \in I, \text{ mit} \\ ID_j \in ID, It_I \in Item, Seg_l \in Segment$$

beschrieben werden. Die Menge aller Transaktionen im *Input*-Zeitraum ist $I := \{T_1, \dots, T_n\}$. Die Beschreibung der Transaktionen in *Apply* erfolgt analog. Da für die Zeiträume *Target* und *Validate* keine Segmenteinteilung erfolgt, können die Transaktionen dort folgendermaßen definiert werden:

$$T_i := (ID_j, It_T) \in T, \text{ mit} \\ ID_j \in ID, It_T \in Item.$$

Die Menge aller Transaktionen im *Target*-Zeitraum ist $T := \{T_{n+1}, \dots, T_m\}$.

B. Modellbildung

Nach der Datenaufbereitung erfolgt die Modellentwicklung: Zunächst wird überprüft, ob jedes der Produkte $It_I \in T_i \in I$ (*Input*-Zeitraum) und $It_T \in T_i \in T$ (*Target*-Zeitraum) häufig genug vorkommt, um als signifikant betrachtet zu werden. Dies entspricht dem Ermitteln des Item-Supports. Mithilfe der als signifikant eingestuft Transaktionen des *Input*- und *Target* Zeitraums werden Assoziationsregeln der Form

$$(It_I \rightarrow It_T) \text{ in Zeitraum } Seg_l$$

erstellt, was bedeutet: „Kunden, die Produkt It_I in Zeitraum Seg_l gekauft haben, kauften im *Target*-Zeitraum Produkt It_T “. Auf diese Weise werden herkömmliche Assoziationsregeln um die Information des Kaufsegments ergänzt. Im Gegensatz zu dem in [ES00] beschriebenen A priori-Algorithmus, der mengenorientiert häufig vorkommende Produktkombinationen in Warenkörben bestimmt, werden hier nur Paare von Produkten betrachtet, deren Item-Support im *Input*- bzw. *Target*-Zeitraum ausreichend hoch ist. Für jede der gefundenen Assoziationsregeln wird anschließend ein Score-Wert ermittelt. Dies erfolgt über die Berechnung des Added-Value:

$$Score_{It_I It_T Seg_l} := P(It_T | It_I) - P(It_T).$$

Damit kann für jeden Kunden für jede seiner Produktkombinationen der zugehörige Score-Wert angegeben werden. Da das Ziel des Algorithmus ist, zu prognostizieren, welches Produkt ein Kunde auf Basis seiner vorherigen Käufe kaufen wird, werden die einzelnen Score-Werte pro Kunde

und $It_I \in T_i \in I$ aufsummiert. Daraus ergibt sich für jeden Kunden und die Produkte $It_T \in T_i \in T$ des Target-Zeitraums eine zugehörige Score-Summe $Sum_{It_T ID_i Seg_i}$ (vereinfachte Schreibweise im Folgenden als Sum_i). Für jeden Kunden sind die Produkte $It_T \in T_i \in T$ mit den höchsten Score-Summen die Produkte, die er am wahrscheinlichsten als nächstes kaufen wird. Die Kombination aus Kundennummer, Produkt im Target-Zeitraum und Score-Summe kann bereits als Grundmodell zur Produktprognose verwendet werden. Aufbauend auf das Grundmodell können Kaufwahrscheinlichkeiten von Kunden für Produkte im Target-Zeitraum berechnet werden. Für die verschiedenen Produkte $It_T \in T_i \in T$ wird die Häufigkeit (qty) der verschiedenen zugehörigen Score-Summen ($It_T qty_{Sum_i}$) bestimmt, was der Anzahl potenzieller Käufer entspricht. Außerdem wird gezählt, wie viele der Kunden, denen ein bestimmtes Produkt It_T mit einer Score-Summe Sum_i zugewiesen wurde, dieses tatsächlich im Target-Zeitraum gekauft haben. Dies entspricht der Kaufhäufigkeit $It_T bought_{Sum_i}$.

Danach werden pro $It_T \in T_i \in T$ Gruppennummern startend bei 1 absteigend nach den Score-Summen Sum_i vergeben. Anschließend werden die Gruppen pro Produkt It_T so zusammengefasst, dass sie eine signifikante Aussagekraft haben. Dazu wird zunächst überprüft, ob in einer Gruppe die Anzahl potenzieller Käufer ($It_T qty_{Sum_i}$) eine zuvor festgelegten Mindestanzahl überschreitet. Ist dies nicht der Fall, wird diese Gruppe mit der vorherigen vereinigt und die kleinere der beiden Score-Summe verwendet. Die Kaufquoten und die Häufigkeit der Score-Summen der beiden Gruppen werden jeweils addiert. Die Gruppen werden so lange auf diese Weise aggregiert, bis alle Gruppen die Mindestanzahl überschreiten bzw. nur noch eine Gruppe übrig ist. Anschließend wird die Kaufquote pro Produkt It_T und Gruppe berechnet:

$$Quote := \frac{It_T bought_{Sum_i}}{It_T qty_{Sum_i}}$$

Die nun übrigen Gruppen werden auf Basis der Kaufquote so zusammengelegt, dass die Kaufquote für jedes Produkt It_T monoton fallend für die Gruppen sind. Damit ist die Modellbildung abgeschlossen und kann im nächsten Schritt auf die neuen Daten des Apply-Zeitraums angewendet werden.

C. Anwendung auf neue Daten

Um personalisierte Empfehlungen zu erhalten, wird für jeden Kunden des Apply-Zeitraums zunächst überprüft, welche bei der Modellbildung erstellten Assoziationsregeln auf ihn zutreffen und mit welchem Score-Wert und welcher Kaufquote diese versehen sind. Mithilfe der Score-Werte kann erneut für jeden Kunden, jedes Produkt It_T pro Segment Seg_i die Score-Summe berechnet werden. Anschließend werden pro Kunde die Produkte It_T nach ihrer Kaufquote absteigend sortiert. Pro

Kunde werden die $n \in \mathbb{N}$ Produkte mit der höchsten Kaufquote als Produktempfehlung verwendet.

IV. VERGLEICHSALGORITHMEN

Es gibt zwar einige Benchmarks, die Kennzahlen für Empfehlungsalgorithmen liefern, jedoch sind sie alle nicht für den PAROT-Algorithmus geeignet. Meist sind die Benchmarks nicht präzise genug dokumentiert (fehlende Angaben über verwendete Datensätze, Parameterwahl etc.) oder verwenden Datensätze, die nicht frei verfügbar bzw. auf den PAROT-Algorithmus aufgrund seiner zeitlichen Komponente (Kunden müssen mit bestimmtem Zeitabstand mindestens zwei Käufe getätigt / Wertungen abgegeben haben) nicht anwendbar sind (vgl. [Sar+02], [SB14]). Deshalb wird im Folgenden ein Benchmark mit zugehörigen Parametern für den PAROT-Algorithmus vorgestellt. Zur Erstellung des Benchmarks wurden zwei Open-Source-Algorithmen der LibRec-Bibliothek als Vergleichsempfehlungssysteme implementiert: der ItemKNN-Algorithmus, da dies eine Standardherangehensweise bei Empfehlungssystemen ist und der AssociationRule-Recommender, da er, ebenso wie der PAROT-Algorithmus, auf Assoziationsregeln basiert.

V. UMSETZUNG DES VERGLEICHS

A. Verwendeter Datensatz

Für den Benchmark wurde ein realer Kaufdatensatz eines Online-Versandhandels betrachtet:

Bezeichnung	Wert
Betrachtungszeitraum	1 Jahr
Anzahl Kunden	300.885
Anzahl Produkte	8.904
Anzahl Transaktionen	1.850.735

Tabelle I: Verwendeter Datensatz

B. Parameterwahl

Bei allen drei betrachteten Algorithmen sollen jeweils 10 Produkte pro Kunde prognostiziert werden. Für den ItemKNN-Algorithmus müssen zusätzlich lediglich die Parameter Nachbarschaftsgröße und das Ähnlichkeitsmaß vorab festgelegt werden. Als Optimierungsgröße wurde die F1-Metrik betrachtet. Nachdem die für Kaufdaten (binäre Daten) verwendbaren Ähnlichkeitsmaße mit verschiedenen Nachbarschaftsgrößen getestet wurden, stellte sich heraus, dass grundsätzlich beim hier verwendeten Datensatz das Jaccard-Maß höhere Werte für die F1-Metrik liefert. Nach einer Grid-Search wurde 25 als optimaler Wert für die Nachbarschaftsgröße gewählt. Der AssociationRule-Recommender bezieht weder den Support,

noch die Konfidenz oder sonstige Gütekriterien für Assoziationsregeln mit ein. Deshalb müssen für diesen Algorithmus keine Parameterwerte festgelegt werden. Beim PAROT-Algorithmus gibt es einige vorab zu wählende Parameter:

Parameter	Wert
Anzahl Segmente	5
Segmentlängen	7, 14, 28, 56, 365
Mindestsupport c_0	5
Mindest qty q_{min}	40

Tabelle II: Parameterwahl für PAROT

C. Datensplit

Um eine Vergleichbarkeit der Algorithmen zu gewährleisten, wurde der Datensatz mittels eines chronologischen Splits geteilt. 95% der Daten stellen den Trainingsdatensatz dar, die übrigen 5% den Testdatensatz, was dem *Validate*-Zeitraum entspricht (siehe Abb. 3). Der Testdatensatz ist so klein gewählt, da Kaufprognosen erstellt werden, die für Online-Targeting genutzt werden sollen. Es ist deshalb sinnvoll, maximal das Kaufverhalten der Kunden in den nächsten zwei Wochen zu prognostizieren, was 5% des Datensatzes entspricht.

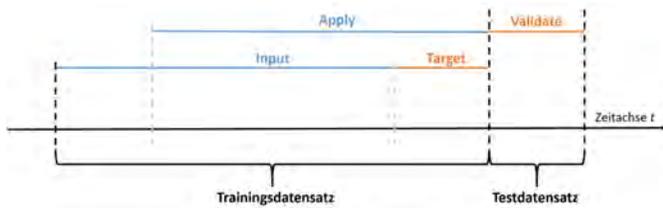


Abbildung 3: Datensplit

Ein Random-Split ist ungeeignet, da für den PAROT-Algorithmus die Daten nach Kundenzugehörigkeit aufgeteilt werden müssen (Kunden kommen entweder ausschließlich im Test- oder im Trainingsdatensatz vor). Für den ItemKNN- und AssociationRule-Rec recommender hingegen mussten die Kunden jeweils sowohl im Trainings- als auch im Testdatensatz vorhanden sein. Somit können für die drei Algorithmen nicht die gleichen Trainings- und Testdatensätze verwendet werden, womit die Ergebnisse nur eingeschränkt vergleichbar wären.

D. Vergleichsmetriken

Da es sich um Produktprognosen handelt, werden als Metriken zum Vergleich zwischen den verschiedenen Algorithmen die Precision, der Recall und die $F1$ -Metrik berechnet. Als Vergleich mit den prognostizierten Produkten werden die von den Kunden tatsächlich im Testdatensatz gekauften Produkte verwendet. Außerdem werden sowohl Item- als auch User-Coverage berechnet, um eine Aussage über die Reichweite der Kaufempfehlungen treffen zu können. Abschließend

wird mit dem Exakten Fisher Test überprüft, ob die Hypothese der stochastischen Unabhängigkeit von Empfehlungen und tatsächlichen Käufen abgelehnt werden kann. Der Chi-Quadrat-Test ist für diese Verifikation nicht anwendbar, da das Auftreten der Beobachtungen für ein Element der Kontingenztafel (insbesondere die Anzahl der Produkte, die prognostiziert und gekauft wurden) im Allgemeinen beim betrachteten Datensatz zu klein ist (weniger als fünf Beobachtungen).

E. Theoretischer Vergleich

Betrachtet man die verschiedenen Algorithmen zunächst nur unter Berücksichtigung ihrer Herangehensweise, fällt auf, dass für den ItemKNN-Algorithmus eine Berechnung der Produktähnlichkeiten erforderlich ist. Die Güte der generierten Empfehlungen beim ItemKNN-Algorithmus hängt in hohem Maße von der verwendeten Ähnlichkeitsberechnung ab. Aufgrund der großen Anzahl an Ähnlichkeitsmaßen kann es vorkommen, dass das am besten geeignete schlichtweg nicht betrachtet wird. Dies ist ein Nachteil gegenüber dem AR- bzw. PAROT-Algorithmus, da diese Algorithmen keine Produktähnlichkeiten verwenden. Da beim AR-Algorithmus von LibRec keine Gütekriterien wie Support oder Konfidenz bestimmt werden, werden alle im Betrachtungszeitraum vorhandenen Produkte für das Bilden der Assoziationsregeln verwendet. Im PAROT-Algorithmus hingegen wird zunächst für jedes Produkt überprüft, ob die Häufigkeit des Produkts den vorgegebenen Mindestsupport übertrifft. Das Zählen der Häufigkeiten der Produkte lässt sich im Programm effizient umsetzen. Dem Apriori-Algorithmus folgend, werden ausschließlich Assoziationsregeln aus Produkten gebildet, deren Auftreten als häufig genug eingestuft wurde. Somit ist die Anzahl der im PAROT-Algorithmus gebildeten Assoziationsregeln deutlich geringer als im AR-Algorithmus, wodurch der PAROT-Algorithmus schneller Produktempfehlungen generieren kann und somit zeiteffizienter ist.

F. Vergleich anhand realer Kaufdaten

	Prec@10	Rec@10	F1	Item-Coverage	User-Coverage	exakter Fisher Test
ItemKNN	0,1176	0,4018	0,1820	93,56%	100,00%	99,97%
AR	0,1175	0,3665	0,1779	57,29%	100,00%	99,97%
PAROT	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%

Abbildung 4: Benchmark

Wie sich Abb. 4 entnehmen lässt, liegt die Stärke des ItemKNN- und des AR-Algorithmus in ihrer Reichweite. Der ItemKNN-Algorithmus weist eine Item-Coverage mit über 90% auf, also einen deutlich höheren Wert, als die anderen beiden Algorithmen. Somit decken die Empfehlungen bei diesem Algorithmus nahezu die gesamte Produktpalette ab. Daraus folgt, dass der ItemKNN-Algorithmus in der Lage ist, auch ungewöhnliche und selten gekaufte Produkte zu empfehlen. Eine hohe Item-Coverage kann zwar für einen guten Algorithmus sprechen, beim betrachteten Datensatz handelt es sich jedoch um die Kaufdaten eines Online-Versandhandels,

dessen Produktpalette überwiegend aus Saisonartikeln wie Schuhen und Kleidung besteht. Infolgedessen ist eine Item-Coverage von 90% sogar eher nachteilig, da dies bedeutet, dass einigen Kunden nicht zur Saison passende Produkte empfohlen werden, die für den Kunden daher nicht interessant und ggf. momentan auch nicht verfügbar sind (z.B. die Empfehlung von Winterstiefeln zum Sommerbeginn). Eine Item-Coverage von 60% oder weniger ist beim betrachteten Datensatz aus diesem Grund besser. Der ItemKNN- und AR-Algorithmus schneiden dafür vergleichsweise schlecht bezüglich ihrer Vorhersagegenauigkeit ab - insbesondere in puncto Prec@10-Metrik und damit in der F1-Metrik. Der PAROT-Algorithmus zeigt hingegen gerade hinsichtlich der Präzision der Empfehlungen seine Stärke, was zu höheren F1- Werten führt. Mit dem Exakten Fisher Test wird überprüft, ob die Vermutung, dass die erstellten Kaufprognosen und die tatsächlichen Käufe stochastisch unabhängig voneinander sind, verworfen werden kann. Der Hypothesentest wird dazu für jeden Kunden einzeln durchgeführt. Der Prozentwert in Abbildung 4 gibt an, wie groß der Anteil der Kunden, bei denen die Vermutung der Unabhängigkeit bei einer Wahl von $\alpha = 5\%$ abgelehnt wurde, an allen Kunden des Testzeitraums ist. Da dieser Wert bei allen betrachteten Algorithmen nahezu 100% ist, kann angenommen werden, dass die von den Algorithmen generierten Kaufprognosen signifikant sind. Ob der PAROT- oder der AR- bzw. ItemKNN-Algorithmus besser für einen Shop geeignet ist, lässt sich aufgrund der entgegengesetzten Stärken und Schwächen nicht beurteilen und hängt letztlich von der Zielsetzung des Shops ab. Da ItemKNN- und AR-Algorithmus die gleichen Stärken und Schwächen haben, können sie, im Gegensatz zum PAROT-Algorithmus, exakter miteinander verglichen werden: Es wirkt so, als ob der ItemKNN- den AR-Algorithmus schlägt, da alle Werte der verwendeten Vergleichsmetriken beim ItemKNN-Algorithmus besser sind. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die sehr hohe Item-Coverage bei diesem Datensatz gegen den ItemKNN-Algorithmus spricht (Begründung siehe oben). Deshalb ist eine klare Aussage, welcher der beiden Algorithmen tatsächlich geeigneter ist, nicht möglich.

G. Weitere Analyse des PAROT-Algorithmus

Obwohl der PAROT-Algorithmus auf Assoziationsregeln basiert und diese im Grunde lediglich weiter verarbeitet, schneidet er bezüglich der F1-Metrik deutlich besser und bei Betrachtung der User- und Item-Coverage schlechter ab, als der AR-Algorithmus. Welche Unterschiede zwischen den beiden Algorithmen dazu führen, dass ihre Stärken und Schwächen genau entgegengesetzt sind, wird in diesem Abschnitt ermittelt. Die Abweichungen zwischen dem PAROT- und dem AR-Algorithmus sind folgende:

- Nach dem Bilden und Bewerten der Assoziationsregeln werden diese beim PAROT-Algorithmus, zu Gruppen zusammengefasst. Auf Basis der Kaufquote für die Gruppen

lässt sich für einen Kunden eine Kaufwahrscheinlichkeit für ein Produkt ermitteln.

- Beim AR-Algorithmus wird der gesamte Betrachtungszeitraum als ein einziger Warenkorb pro Kunde betrachtet. Die Assoziationsregeln werden jeweils mittels zweier Produkte aus einem gemeinsamen Warenkorb gebildet. Im Gegensatz dazu fließt beim PAROT-Algorithmus eine zeitliche Komponente mit ein: Der Betrachtungszeitraum wird in die beiden Zeitabschnitte *Input* und *Target* aufgeteilt und die Regeln so gebildet, dass jeweils ein Produkt des *Inputs* auf ein Produkt des *Targets* verweist.
- Neben der Aufteilung in *Input* und *Target* berücksichtigt der PAROT-Algorithmus einen weiteren zeitlichen Aspekt: Durch die Einteilung des *Inputs* in Segmente und dem späteren segmentierten Assoziationsregelbildern soll erfasst werden, ob Produkte in regelmäßigen Abständen zueinander gekauft werden.
- Ein weiterer Unterschied ist die Verwendung einer support-ähnliche Größe im PAROT-Algorithmus: Tritt eine erstellte Regel zu selten auf, wird sie als nicht signifikant eingestuft und nicht zum Generieren der Empfehlungen verwendet.

Wird der PAROT-Algorithmus dahingehend angepasst, dass jeweils eins der zuvor genannten Merkmale abgeändert wird (Betrachtung verschiedener Werte für den Mindestsupport, keine Aufteilung des Datensatzes in Segmente etc.), lassen sich folgende Ergebnisse feststellen:

	Prec@10	Rec@10	F1	Item-Coverage	User-Coverage	exakter Fisher Test	
ItemKNN	0,1176	0,4018	0,1820	93,56%	100,00%	99,97%	
AR	0,1175	0,3665	0,1779	57,29%	100,00%	99,97%	
ursprünglicher PAROT	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%	
PAROT	c_o = 1	0,1162	0,4773	0,1869	46,98%	4,71%	100,00%
	c_o = 2	0,1456	0,4505	0,2201	24,22%	4,45%	100,00%
	c_o = 3	0,1709	0,4164	0,2423	10,96%	4,09%	100,00%
	c_o = 5	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%
	c_o = 7	0,2342	0,3475	0,2798	1,90%	2,93%	100,00%
	c_o = 10	0,3162	0,3313	0,3236	1,10%	2,40%	100,00%
	c_o = 13	0,3848	0,3231	0,3513	0,68%	2,08%	100,00%
	c_o = 15	0,4129	0,3181	0,3593	0,57%	1,95%	100,00%
	c_o = 17	0,4092	0,3106	0,3532	0,46%	1,72%	100,00%
	c_o = 20	0,4255	0,3032	0,3541	0,38%	1,48%	100,00%
	c_o = 23	0,4652	0,3024	0,3665	0,32%	1,39%	100,00%
c_o = 25	0,4668	0,3059	0,3696	0,29%	1,25%	100,00%	

Abbildung 5: Mindestsupport

	Prec@10	Rec@10	F1	Item-Coverage	User-Coverage	exakter Fisher Test	
ItemKNN	0,1176	0,4018	0,1820	93,56%	100,00%	99,97%	
AR	0,1175	0,3665	0,1779	57,29%	100,00%	99,97%	
ursprünglicher PAROT	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%	
PAROT	c_o = 1	0,1067	0,5197	0,1771	10,32%	4,70%	100,00%
	c_o = 3	0,1411	0,4983	0,2199	12,79%	4,48%	100,00%
	c_o = 5	0,1957	0,4797	0,2780	5,00%	4,07%	100,00%
	c_o = 10	0,3427	0,4527	0,3900	1,70%	3,24%	100,00%
	c_o = 15	0,3925	0,3594	0,3752	0,79%	2,59%	100,00%
	c_o = 20	0,4384	0,3431	0,3849	0,57%	2,21%	100,00%

Abbildung 6: ohne Segmente

Aus der Analyse des PAROT-Algorithmus lässt sich schließen, dass der Grouping-Abschnitt (siehe Abb. 7) des Programms keine nennenswerte Veränderung der Vergleichsmetriken verursacht. Er ist lediglich zur Ermittlung von Kaufwahrscheinlichkeiten sinnvoll. Eine Einteilung in Segmente (siehe Abb. 6) (zumindest bei dem hier verwendeten Datensatz) verschlechtert die Ergebnisse tendenziell. Außerdem haben sowohl die Einteilung in *Input* und *Target* (siehe Abb. 8) als auch

	Prec@10	Rec@10	F1	Item-Coverage	User-Coverage	exakter Fisher Test
ItemKNN	0,1176	0,4018	0,1820	93,56%	100,00%	99,97%
AR	0,1175	0,3665	0,1779	57,29%	100,00%	99,97%
ursprünglicher PAROT	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%
c_o = 1	0,1153	0,4702	0,1852	46,45%	4,71%	99,96%
c_o = 2	0,1440	0,4421	0,2173	20,64%	4,45%	100,00%
c_o = 3	0,1690	0,4090	0,2392	9,39%	4,09%	100,00%
c_o = 5	0,2094	0,3793	0,2698	3,63%	3,47%	100,00%
c_o = 7	0,2228	0,3419	0,2698	1,88%	2,97%	100,00%
c_o = 10	0,2939	0,3263	0,3092	1,08%	2,48%	100,00%
c_o = 13	0,3630	0,3181	0,3390	0,67%	2,12%	100,00%
c_o = 15	0,3892	0,3116	0,3461	0,57%	2,01%	100,00%
c_o = 17	0,3841	0,3031	0,3388	0,46%	1,81%	100,00%
c_o = 20	0,4068	0,2978	0,3439	0,38%	1,62%	100,00%
c_o = 23	0,4503	0,2964	0,3575	0,32%	1,53%	100,00%
c_o = 25	0,4528	0,2984	0,3597	0,29%	1,43%	100,00%

Abbildung 7: ohne Gruppierung

	Prec@10	Rec@10	F1	Item-Coverage	User-Coverage	exakter Fisher Test
ItemKNN	0,1176	0,4018	0,1820	93,56%	100,00%	99,97%
AR	0,1175	0,3665	0,1779	57,29%	100,00%	99,97%
ursprünglicher PAROT	0,2143	0,3821	0,2746	3,74%	3,46%	100,00%
c_o = 1	0,1153	0,4702	0,1852	46,45%	4,71%	99,96%
c_o = 5	0,2094	0,3793	0,2698	3,63%	3,47%	100,00%
PAROT ohne Grouping	0,2939	0,3263	0,3092	1,08%	2,48%	100,00%
c_o = 10	0,3892	0,3116	0,3461	0,57%	2,01%	100,00%
c_o = 15	0,3841	0,3031	0,3388	0,46%	1,81%	100,00%
c_o = 20	0,4068	0,2978	0,3439	0,38%	1,62%	100,00%
c_o = 1	0,1232	0,6106	0,2050	97,25%	97,41%	100,00%
PAROT ohne Input und Target	0,1241	0,6096	0,2062	77,79%	97,41%	99,98%
c_o = 5	0,1259	0,6101	0,2087	71,12%	97,41%	99,98%
c_o = 10	0,1286	0,6096	0,2124	67,20%	97,41%	99,98%
c_o = 15	0,1321	0,6103	0,2172	63,38%	97,41%	100,00%
c_o = 20						

Abbildung 8: ohne Input & Target

die Verwendung einer Mindesthäufigkeit (siehe Abb. 5) einen großen Einfluss auf die Vergleichsmetriken: Die Einteilung des Betrachtungszeitraums in *Input* und *Target* sorgt zwar für eine Verbesserung der *F1*-Metrik, dies geschieht jedoch zulasten der Item- und User-Coverage. Ähnlich verhält es sich mit den Auswirkungen des Mindestsupports. Bei steigenden Werten für den Mindestsupport nimmt die Item- und User-Coverage drastisch ab, dafür verbessert sich die *F1*-Metrik deutlich. Insbesondere diese beiden zuletzt genannten Besonderheiten des PAROT-Algorithmus sorgen für die unterschiedlichen Stärken und Schwächen des PAROT- und AR-Algorithmus.

VI. FAZIT

Da kein in der Literatur verfügbarer Benchmark für eine Beurteilung des PAROT-Algorithmus geeignet ist, wurde ein eigener Benchmark erstellt. Dazu wurde der PAROT-Algorithmus mit den Open-Source-Algorithmen ItemKNN und AssociationRule-Rec recommender (abgekürzt mit Folgenden als AR) der LibRec-Bibliothek sowohl theoretisch als auch mittels realer Kaufdaten verglichen. Der ItemKNN-Algorithmus ist ein klassisches Item Based Collaborative Filtering, das zum Memory-based Collaborative Filtering gezählt wird. Der AR-Algorithmus kann als Model-based Collaborative Filtering kategorisiert werden, während der PAROT-Algorithmus ein hybrider Ansatz ist, der in diesem Fall aus einer Assoziationsanalyse mit zeitlicher Komponente und einem Clusterverfahren besteht. Als Vergleichsmetriken wurden die Precision Prec@10, der Recall Rec@10, die *F1*-Metrik, der MRR, die User Coverage, die Item Coverage und der Exakte Fisher Test betrachtet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Stärke des

PAROT-Algorithmus seine gute Vorhersagegenauigkeit ist, was insbesondere für die hohen Werte der *F1*-Metrik gilt. Als seine Schwäche ließ sich seine mangelnde Reichweite, was sich in sehr niedrigen Werten der User- und Item-Coverage widerspiegelt, identifizieren. Die Vergleichsergebnisse des ItemKNN und AR-Algorithmus sind genau gegensätzlich: Die Schwäche dieser beiden Algorithmen ist ihre niedrige Vorhersagegenauigkeit, ihre Stärke die große Reichweite. Ein Vergleich von ItemKNN- und AR-Algorithmus zeigte zudem, dass sich keine Aussage drüber treffen lässt, welcher der beiden Algorithmen zu favorisieren ist.

Um zu analysieren, warum der PAROT- den AR-Algorithmus bezüglich der *F1*-Metrik deutlich übertrifft und hinsichtlich der Item- und User-Coverage massiv unterliegt, obwohl beide Algorithmen auf Assoziationsregeln basieren, wurde zunächst ermittelt, in welchen Aspekten sich die beiden Algorithmen unterscheiden: Im Gegensatz zum AR-Algorithmus erfolgt im PAROT-Algorithmus nach dem Bilden der Assoziationsregeln eine Gruppierung. Außerdem beinhaltet der PAROT-Algorithmus zwei zeitliche Komponenten: Zum einen wird der Betrachtungszeitraum in die beiden Zeiträume *Input* und *Target* unterteilt, zum anderen wird der *Input*-Zeitraum in Segmente gegliedert. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Algorithmen ist die Verwendung der Mindesthäufigkeit (eine support ähnliche Größe) im PAROT-Algorithmus. Jeder dieser vier die Unterschiede ausmachenden Bestandteile wurde einzeln betrachtet und jeweils aus dem PAROT-Algorithmus entfernt, um zu überprüfen, welchen Einfluss er auf die verwendeten Vergleichsmetriken hat.

Als maßgebliche Einflussfaktoren auf die gegensätzlichen Stärken und Schwächen des PAROT- und AR-Algorithmus sind die Einteilung des Betrachtungszeitraums in *Input* und *Target* sowie die Verwendung einer Mindesthäufigkeit auszumachen: Die Einteilung in *Input* und *Target* verringert zwar die Reichweite der Empfehlungen, was die User- und Item-Coverage widerspiegeln, jedoch ist nur auf Basis dieser Einteilung eine Verbesserung der *F1*-Metrik bei steigender Mindesthäufigkeit möglich.

VII. AUSBLICK

Aufbauend auf die hier gewonnenen Erkenntnisse konnte überprüft werden, wie sich das Ergänzen der Produktprognosen des PAROT-Algorithmus mit den Empfehlungen eines Short-Term-Score, der das aktuelle Klickverhalten der Kunden analysiert, auf die verwendeten Vergleichsmetriken auswirkt. Die Vermutung dabei ist, dass sich zumindest die Werte der User-Coverage erhöhen werden. Beim PAROT-Algorithmus wird die User-Coverage dadurch beeinträchtigt, dass nur Kunden betrachtet werden, die sowohl im *Input*- als auch im *Target*-Zeitraum Kaufe tätigten. Durch das Betrachten der momentan aktiven Kunden beim Short-Term-Score ist für diese Kunden ihre aktuelle Kaufhistorie bekannt, was eine Vorhersage für sie ermöglicht.

Außerdem sollten neben dem hier verwendeten Datensatz weitere Datensätze mit anderen Strukturen betrachtet werden, die beispielsweise aus ausschließlich nichtsaisonalen Produkten oder nur aus saisonalen Produkten bestehen. So ließe sich ermitteln, ob die zuvor beschriebenen Auswirkungen der vier Unterschiede zwischen AR- und PAROT-Algorithmus als allgemeingültig betrachtet werden können.

Zusätzlich wären weitere Vergleiche mit anderen Algorithmen interessant, die unter anderem zeitliche Komponenten oder eine Matrixfaktorisierung enthalten. Damit konnte verifiziert werden, ob es andere Algorithmen gibt, deren Vorhersagegenauigkeit ebenfalls so gut ist oder ob dies ein Alleinstellungsmerkmal des PAROT-Algorithmus ist. Des Weiteren wäre ein Vergleich mit Künstlichen Neuronalen Netzen möglich. Diese werden, wie in Abschnitt II angedeutet, bereits in der Praxis verwendet, wurden jedoch in der Forschung bisher im Rahmen von Empfehlungsalgorithmen kaum betrachtet und sind derzeit in den gängigen Open-Source-Bibliotheken für Empfehlungsalgorithmen nicht vorhanden.

Abschließend lässt sich sagen, dass der PAROT-Algorithmus im Vergleich zu anderen Algorithmen durch seine präzisen Produktprognosen hervorsteicht, was jedoch die Reichweite verringert. Wurde der PAROT-Algorithmus mit einem Short-Term-Algorithmus kombiniert, ließe sich dieser Nachteil womöglich beheben, was in weiteren Arbeiten untersucht werden konnte.

LITERATUR

- [EPI] GmbH EPISERVER. *Episerver by the numbers*. URL: <https://www.episerver.com/company/>.
- [EPI20] GmbH EPISERVER. *Bereitstellung eines kanalübergreifenden, personalisierten Einkaufserlebnisses*. 14.02.2020. URL: <https://www.episerver.de/produkte/plattform/episerver-personalization/>.
- [EPOa] GmbH EPOQ. *Softwareentwicklung mit Empathie, Sorgfalt, Freundschaft und Herzblut*. URL: <https://www.epoq.de/company/>.
- [EPOb] GmbH EPOQ. *Was ist eine Recommendation Engine*. URL: <https://www.epoq.de/produkte/recommendation-engine/>.
- [ES00] Martin Ester und Jörg Sander. *Knowledge Discovery in Databases - Techniken und Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. ISBN: 978-3-540-67328-6. DOI: 10.1007/978-3-642-58331-5.
- [Gan+] Zeno Gantner u. a. *Recommender System Library*. URL: <http://www.mymedialite.net/>.
- [Gan+15] Zeno Gantner u. a. *Class List*. 31.12.2015. URL: <http://mymedialite.net/documentation/doxygen/annotated.html>.
- [GH15] Carlos Alberto Gomez-Urbe und Neil Hunt. "The Netflix Recommender System: Algorithms, Business Value, and Innovation". In: *ACM Trans. Management Inf. Syst.* 6 (2015), 13:1–13:19.
- [Guo+15] Guibing Guo u. a. "LibRec: A Java Library for Recommender Systems". In: *UMAP Workshops*. 2015.
- [HBV17] Sebastian Heinz, Christian Bracher und Roland Vollgraf. *An LSTM-Based Dynamic Customer Model for Fashion Recommendation*. 2017. URL: <http://arxiv.org/pdf/1708.07347v1>.
- [Kla09] André Klahold. *Empfehlungssysteme: Recommender Systems - Grundlagen, Konzepte und Lösungen*. 1. Aufl. IT-Management und -Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009. ISBN: 9783834805683. DOI: 10.1007/978-3-8348-9558-5.
- [LIB17] LIBREC. *A Simple Tutorial on the LibRec - Overview*. 13.05.2017. URL: <https://www.librec.net/example.html>.
- [Sar+02] Badrul M Sarwar u. a. "Recommender systems for large-scale e-commerce: Scalable neighborhood formation using clustering". In: *Proceedings of the fifth international conference on computer and information technology*. Bd. 1. 2002, S. 291–324.
- [SB14] Alan Said und Alejandro Bellogin. "Comparative recommender system evaluation: benchmarking recommendation frameworks". In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Recommender systems*. 2014, S. 129–136.
- [SL17] Brent Smith und Greg Linden. "Two decades of recommender systems at amazon.com". In: *Ieee internet computing* 21.3 (2017), S. 12–18.

ANALYSE UND KONZEPTIONIERUNG EINES VERTEILTEN SYSTEMS ZUR KOMMUNIKATION VON BETRIEBSDATEN UND STATISTIKEN IN INTRALOGISTIKANLAGEN

Thomas Zimmermann B.Sc. und Professor Dr. Frank Herrmann

Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (OTH Regensburg)
Prüfeninger Str. 58, 93049 Regensburg, Germany

SCHLÜSSELWÖRTER

Intralogistik, Betriebsdaten, Zeitreihen, verteilte Systeme, Modellierung, Anforderungsanalyse

ABSTRACT

Im vorliegenden Artikel werden Vorarbeiten zur Entwicklung eines Betriebsdatenverwaltungssystems für Intralogistikanlagen des Herstellers TGW Software Services beschrieben. Das beschriebene Vorgehen umfasst dabei im Wesentlichen vier Schritte.

Zunächst wird der aktuelle Stand in der Software des betrachteten Unternehmens hinsichtlich des Sammelns, Speicherns und Auswertens von Betriebsdaten analysiert.

Daran schließt sich eine Anforderungsanalyse für die Betriebsdatenverwaltung an. Zusammen mit den betroffenen Entwicklungsleitern werden die grundlegenden Ziele und Grenzen der zu entwickelnden Betriebsdatenverwaltung definiert. Es werden Quellen von Anforderungen für die Komponente gesammelt und alle funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen anhand dieser Quellen erarbeitet.

Basierend darauf wird ein erstes Modell erstellt, das die Entitäten, Beziehungen und Abläufe, die sich aus den ermittelten funktionalen Anforderungen ergeben, in konsolidierter Form zusammenfasst. Dieses wird zusammen mit einigen Überlegungen, die zu diesem Modell geführt haben, beschrieben.

Zuletzt werden dann verschiedene mögliche Konzepte zum grundlegenden technischen Aufbau einer Implementierung der Betriebsdatenverwaltung diskutiert, um schließlich anhand der definierten Qualitätsziele eine Empfehlung für einen Konzeptvorschlag abzugeben.

EINFÜHRUNG

Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma TGW Software Services (kurz TSS) erstellt, die zur TGW Logistics Group (kurz TGW) gehört.

Der Fokus der TSS liegt unter anderem auf dem Einsatz und der Weiterentwicklung der modularen, standardisierten

Softwareplattform *iWACS*[®] (kurz für *integrated Warehouse Administration and Control System*), die alle für eine moderne Intralogistikanlage benötigten Softwarefunktionalitäten bietet. *iWACS*[®] besteht aus mehreren Modulen, die unterschiedliche Aufgaben abdecken und für jedes Intralogistikprojekt nach Bedarf kombiniert werden. Alle Module sind nach dem Client-Server-Prinzip aufgebaut, wobei der Server üblicherweise im Hintergrund auf eine relationale Datenbank zugreift, in der er alle für den Betrieb notwendigen Daten ablegt.

Im Kontext von TGW-Intrallogistikprojekten werden einige typische Begriffe verwendet, die hier kurz vorgestellt werden.

Der Begriff *Anlage* bezeichnet im Folgenden immer ein vollständiges Intralogistiksystem, das sich an einem bestimmten Standort befindet. Synonym wird – aus Sicht der TGW als Realisierer von Intralogistikanlagen – teilweise auch der Begriff *Projekt* verwendet.

Eine *TE* (kurz für *Transporteinheit*) ist ein Hilfsmittel, mit dem Ware in einer Anlage bewegt wird. Typische TEs sind Paletten, Behälter oder Kartons. Eine TE ist immer mit einer eindeutigen Nummer (meist in Form eines Barcodes) versehen.

Ein *Arbeitsplatz* ist ein Ort innerhalb einer Logistikanlage, an dem TEs durch Menschen bearbeitet werden. An einem Arbeitsplatz können z. B. Waren einer TE entnommen, geprüft, hinzugefügt oder umgepackt werden. Dies ist beispielsweise für Qualitätskontrollen und zur Kommissionierung notwendig.

Ausgangssituation

Das Modul *iWACS*[®].*SAV* (*Service, Analysis, Visualization*) dient als Visualisierungssoftware. Es erfragt aktuelle Zustandsdaten von den SPSen der Anlage und zeigt diese dem Benutzer in übersichtlicher Form an. Außerdem ruft das *.SAV* auch sogenannte Alarmer, also Meldungen über Probleme, von den anderen Modulen ab und speichert diese, zusammen mit den SPS-seitigen Störungen, in einem Protokoll.

Ende 2016 wurde in der TSS beschlossen, iWACS®.SAV vollständig neu zu implementieren. Diese Entscheidung gründete auf einer Reihe verschiedener Faktoren:

- Das bisherige .SAV basiert auf z. T. sehr alten Komponenten und Grundstrukturen; dadurch ist es teilweise veraltet und kaum erweiterbar.
- Mit dem bisherigen .SAV sind für jedes Projekt zahlreiche manuelle Einstellungen und Konfigurationen notwendig, die bei der Realisierung viel Zeit kosten.
- Das .SAV soll inzwischen nicht nur für die Projekte der TSS, sondern für alle Intralogistikprojekte in der gesamten TGW-Gruppe eingesetzt werden; dadurch kommen eine Vielzahl neuer Problemstellungen und Anforderungen zustande.
- Eine groß angelegte, konzernweite Anforderungsermittlung hinsichtlich Intralogistik-Visualisierungssoftware mit zahlreichen Stakeholdern ergab über 300 Anforderungen, von denen viele mit dem bisherigen .SAV nicht umgesetzt werden können.
- Kommerziell verfügbare, ähnliche Produkte decken den benötigten Funktionsumfang nicht im geforderten Maße ab.

Insbesondere kamen bei der Anforderungsermittlung viele Punkte auf, aus denen klar wurde, dass in heutigen, durch das allgemeine Wachstum immer komplexer werdenden Intralogistikprojekten eine anlagenweite, zentrale Software zur Präsentation aller wichtigen Daten aus allen Modulen und Systemen benötigt wird.

Ein wesentlicher Bestandteil davon ist die Darstellung von sogenannten Betriebsdaten und Statistiken aller Module und Systeme in der Anlage – dies reicht von Leistungsdaten bestimmter Anlagenteile über den aktuellen Fortschritt im Tagesarbeitspensum und Rechnerantwortzeiten bis hin zur Überwachung von Temperatur und Stromverbrauch einzelner Bauteile. Der Begriff *Betriebsdaten* bezeichnet hierbei im Folgenden immer sämtliche Daten, die vergangene Ereignisse, Vorgänge oder Zustände in einer Logistikanlage quantitativ beschreiben.

Da diese zukünftig in .SAV benötigten Daten durch zahlreiche verschiedene Systeme erzeugt werden, ist es notwendig, diese in ein einheitliches Format zu überführen und klar zu strukturieren. Anschließend müssen die Daten, die z. T. in sehr hohen Frequenzen und damit großen Mengen anfallen, schnell und sicher zwischen Datenquelle und .SAV transportiert werden können. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine zentrale Verwaltungskomponente zum Austausch von Betriebsdaten und Statistiken zwischen den einzelnen Systemen in einer Intralogistikanlage zu schaffen, die diese Aufgaben übernimmt.

Auch für die übrigen Module und hinsichtlich einer permanenten Langzeitarchivierung kann eine solche zentrale Komponente nützlich sein. Ein zentrales Datenarchiv könnte z. B. für nachträgliche, großangelegte Auswertungen eingesetzt

werden, um Zusammenhänge auf verschiedenen Ebenen der Anlagensteuerung zu erkennen oder um Wartungsintervalle besser bestimmen zu können.

ISTANALYSE

Da die Sammlung, Speicherung, Darstellung und Auswertung von Betriebsdaten in vielen Anwendungsfällen notwendig ist, wird diese in iWACS® auch bereits an einigen Stellen praktiziert – wenn auch nicht über ein einheitliches System oder Format. Daher werden hier zunächst die bisher verwendeten Lösungen kurz vorgestellt.

Aufzeichnung von quantifizierbaren Ereignissen mithilfe des Statistikframeworks

Das *Statistikframework* ist eine kleine interne Library, die dazu dient, numerische Werte, die von bestimmten Ereignissen generiert werden, in über einen bestimmten Zeitintervall aufsummierter Form in der Datenbank eines Moduls festzuhalten. Typische Beispiele für solche Ereignisse sind die Bearbeitung einer TE an einem Arbeitsplatz, Ein- und Auslagerungen in einem Lager oder die Dauern bestimmter Verarbeitungsschritte.

Das Modul meldet dabei dem Statistikframework pro Ereignis einen Datensatz, der zum einen Felder enthält, die das Ereignis kategorisieren und zum anderen Felder mit den eigentlichen numerischen Daten dieses Ereignisses. Das Statistikframework summiert die numerischen Daten aller Ereignisse aus einer Kategorie, die in dasselbe (konfigurierbare) Zeitintervall fallen, auf. Diese Datensätze können dann im Client des Moduls angezeigt werden, sodass im Nachhinein – im Rahmen der konfigurierten Genauigkeit – Gesamtsummen und Durchschnitte oder auch Anteile über einen längeren Zeitraum hinweg nachvollzogen werden können.

Performancedatenprotokollierung mittels RRDB-Logging

Das *RRDB-Logging* ist eine firmeninterne Library, die in verschiedenen iWACS®-Modulen dazu verwendet wird, Betriebsdaten aufzuzeichnen und zu aggregieren; insbesondere für modulinterne Performancemessungen.

Eine aufzuzeichnende Zeitreihe muss vom jeweiligen Modul am RRDB-Logging angemeldet werden. Das RRDB-Logging fragt dann einmal pro Minute alle registrierten Signale ab und speichert die gewonnenen Werte in CSV-Dateien. Im Laufe der Zeit werden dann die gespeicherten Werte nach und nach aggregiert, um Speicherplatz zu sparen. Somit ist sichergestellt, dass die Daten (in der größten Aggregationsstufe) bis zu ein Jahr lang aufbewahrt werden können und zugleich nicht übermäßig viel Speicherplatz benötigt wird.

Da es sich um CSV-Dateien handelt, können die gespeicherten Werte mit relativ geringem Aufwand durch Tabellenkalkulationsprogramme wie Excel dargestellt und ausgewertet werden.

Typische Daten, die mit dem RRDB-Logging aufgezeichnet werden, sind Kennziffern von Garbage-Collector-Läufen, Thread-Anzahlen, belegter Arbeitsspeicher, CPU-Last oder Ausführungsdauern bestimmter Aktionen.

Livedatenanzeige in der Komponente Cockpit

Das *Cockpit* ist eine Library, die in allen iWACS[®]-Modulen verwendet werden kann. Sie ermöglicht es dem Modul, bestimmte sogenannte Kennzahlen (die vom Modul programmatisch an der Cockpit-Komponente angemeldet werden) mithilfe von verschiedenen Diagrammen zu visualisieren und ist im Wesentlichen zur Anzeige von Livedaten und aktuellen Zuständen konzipiert.

Im Client eines iWACS[®]-Moduls, in dem die Cockpit-Library verwendet wird, steht dem Benutzer der Cockpit-Dialog zur Verfügung. Hier wird eine Liste aller registrierten Kennzahlen angezeigt. Für jede Kennzahl können mehrere Widgets angelegt werden, um die (aktuellen) Werte der Kennzahlen zu visualisieren; beispielsweise Torten-, Balken- oder Liniendiagramme, aber auch Tabellen oder eine simple textuelle Ausgabe des aktuellen Werts.

Typische Daten, die im Cockpit angezeigt werden, sind Durchsätze von Fördererstrecken, Fehllesungen von Scannern, Füllstände von Puffern oder Lagern, offene oder abgearbeitete Aufträge oder Wareneingänge seit Tagesbeginn.

Umgebungsdatenüberwachung im Modul .MON

Das Modul iWACS[®].MON kann bestimmte Kennzahlen einer iWACS[®]-Installation überwachen und aufzeichnen. Dazu werden diese Werte durch konfigurierbare Prüfungen, beispielsweise auf Schwellwertüberschreitungen geprüft. Wenn eine konfigurierte Prüfung einmal oder mehrmals fehlschlägt, kann .MON beispielsweise zugeordnete E-Mail-Benachrichtigungen versenden.

.MON kann verschiedene Arten von Daten aufzeichnen – beispielsweise Daten, die er über eine vorgegebene Abfrage auf einer Moduldatenbank auslesen kann, oder Werte, die die Module in ihrem jeweiligen Cockpit angemeldet haben. Vornehmlich wird .MON jedoch eingesetzt, um eher hardwarebezogene Kennzahlen zu überwachen, z. B. die CPU-Auslastung von Rechnern, Füllgrade von Datenbanken und Festplatten oder Netzwerklatenzen.

Reporterstellung im Modul .MIS

Das Modul iWACS[®].MIS dient dazu, in regelmäßigen Intervallen individuelle Berichte über den Zustand der Anlage zu erstellen und zu versenden. Ein Bericht wird dabei immer auf Basis einer sogenannten *Berichtsvorlage* generiert, die der Benutzer des .MIS mit dem separaten Tool *.MIS Report Designer* erstellen kann; hierbei legt er fest, welche Daten und Auswertungen der Bericht in welchem Format (Tabelle, Diagramm usw.) enthalten soll. In einer Berichtsvorlage können verschiedene Daten über grafisch zusammenstellbare oder direkt in JavaScript programmierbare Berechnungen miteinander verknüpft werden.

.MIS kann bei der Generierung eines Berichts auf verschiedene Datenquellen zugreifen; meist verwendet es Daten aus den Archivdatenbanken der verschiedenen iWACS[®]-Module.

ANFORDERUNGEN

Um die Erfassung der Anforderungen an eine zentrale Betriebsdatenverwaltung durchführen zu können, müssen zunächst die Ziele des Systems definiert, die Abgrenzung der Komponente zu anderen Aufgaben und Systemen vorgenommen und die Anforderungsquellen für das System ermittelt werden (Rupp 2014, S. 74). Diese Schritte werden im Folgenden beschrieben.

Ziele und Abgrenzung der Betriebsdatenverwaltung

In Absprache mit den Entwicklungsleitern von .SAV und iWACS[®] insgesamt wurden Ziele für die zu realisierende Betriebsdatenverwaltung festgelegt.

Zunächst soll die Betriebsdatenverwaltung, wie bereits beschrieben, dazu dienen, Betriebsdaten von den verschiedenen iWACS[®]-Modulen zum .SAV zu übermitteln. Gleichzeitig gibt es jedoch auch andere Module, die einen Nutzen aus den gesammelten Daten ziehen können, wie beispielsweise .MIS für Berichte. Allgemein formuliert, soll die Betriebsdatenverwaltung also allen angebotenen Modulen die Möglichkeit bieten, auf die Werte aller Module zuzugreifen.

Neben diesem zentralen Anwendungsfall sollen im Zuge der Realisierung der vereinheitlichten Betriebsdatenverwaltung auch die verschiedenen Varianten und z. T. doppelten Implementierungen zur Speicherung und Verarbeitung von Betriebsdaten in den einzelnen Modulen nach Möglichkeit abgelöst werden. Dies betrifft

- die mittelfristige Speicherung der Daten,
- die korrekte Behandlung von Datenformaten und Einheiten sowie der Semantik der Daten,
- die Überwachung bestimmter Datenreihen z. B. auf Schwellwertüberschreitungen, und
- die Berechnung von aggregierten Werten und Statistiken.

Als weiteres Ziel soll die Betriebsdatenverwaltung größere Auswertungen über alle gesammelten Daten eines längeren Zeitraums ermöglichen, um dadurch systemübergreifende Zusammenhänge besser erkennen zu können. Solche Auswertungen werden voraussichtlich aber nicht am Anlagenstandort, sondern extern durchgeführt. Auch für die Verwendung in .MIS können gesammelte Datenwerte über lange Zeiträume nützlich sein.

Weitere Ziele beschäftigen sich mehr mit den nichtfunktionalen Eigenschaften der Betriebsdatenverwaltung:

- Skalierbarkeit bzgl. der Datenmengen
- Ausfallsicherheit (Vermeidung eines Single Point of Failure)
- gute Performance

- Flexibilität in der Struktur (wichtig bei verschiedenartigen Konfigurationen von Modulen oder Ressourcen in unterschiedlichen Anlagen)
- Keine Beeinträchtigungen des regulären Betriebs der Module
- Benutzbarkeit

Diese Ziele stecken grob die Funktionalitäten ab, die die Betriebsdatenverwaltung leisten muss. Funktionen, die über den hier beschriebenen Bereich hinausgehen, sollen (zumindest vorerst) nicht integriert werden und grenzen so die zu entwickelnde Betriebsdatenverwaltung ab. Dies betrifft beispielsweise

- Komponenten zur Visualisierung der Daten
- Unterstützung der augenblicklichen Kommunikation von Livedaten (z. B. zu aktuell laufenden Vorgängen oder Aktionen)
- Übertragung von Daten, die keine Beschreibung von Vorgängen in der Anlage darstellen, sondern z. B. diese steuern
- Übertragung von nichtnumerischen Daten wie Texte

Ermittlung der Anforderungen

Um Anforderungen an die Betriebsdatenverwaltung erarbeiten zu können, müssen zunächst alle relevanten Anforderungsquellen ermittelt werden. Dies ist eine zentrale Aufgabe innerhalb des Requirements Engineering: Wenn wichtige Anforderungsquellen übersehen werden, können deren Anforderungen nicht dokumentiert werden, was dazu führen kann, dass das System später wichtige Funktionalitäten nicht abdeckt. Mögliche Anforderungsquellen sind dabei Dokumente (Handbücher zu Altsystemen, Prozessbeschreibungen), Systeme (Vorgängersysteme, Nachbarsysteme) und Stakeholder (Personen oder Organisationen, die Einfluss auf die Anforderungen haben) (Rupp 2014, S. 77).

Die zu untersuchenden Dokumente umfassten insbesondere Konzepte für Entwicklung und Einsatz des neuen .SAV sowie Dokumentationen zu bestehenden Modulen und Tools.

Bedingt durch das Prinzip der Betriebsdatenverwaltung mit zahlreichen angebundenen Komponenten existiert auch eine Reihe von Systemen, die Anforderungen an die Betriebsdatenverwaltung stellen – sowohl Vorgängersysteme, die in der Ist-Analyse beschrieben wurden, als auch benachbarte Systeme, die an die Betriebsdatenverwaltung angebunden werden sollen.

Bei der Realisierung der Betriebsdatenverwaltung sind zudem auch die Stakeholder mit einzubeziehen, die Anforderungen an diese stellen können. Die Ermittlung der Stakeholderanforderungen ist wichtig, da bei der Betriebsdatenverwaltung wie bei jedem System mehrere Personen bzw. Gruppen betroffen sind, die ganz unterschiedliche Sichten auf das System haben und unterschiedliche – z. T. sogar gegenläufige – Zielsetzungen verfolgen und

Ansprüche stellen können (Rupp 2014, S. 79). Die Stakeholder der Betriebsdatenverwaltung beinhalten u. a. den .SAV-Produktmanager, die Entwickler der einzelnen iWACS®-Module, die Realisierungs- und die Serviceabteilung der TSS sowie den Endkunden.

Um alle Anforderungen an die Betriebsdatenverwaltung zusammenstellen zu können, mussten daher die betreffenden Personen befragt und die beschriebenen Dokumente und Systeme auf Anforderungen untersucht werden. Dabei entstanden die sogenannten *Stakeholderanforderungen*, also Funktionen, die konkret von einem Stakeholder benötigt werden oder deren Notwendigkeit aus einem Dokument bzw. einem bestehenden System ersichtlich ist.

Aus den Stakeholderanforderungen wurden anschließend *Produktanforderungen* abgeleitet, die die Stakeholderanforderungen konsolidieren und vor allem auch spezifizieren, wie diese durch das System umgesetzt werden sollen.

MODELLENTWURF ZUR ABBILDUNG VON BETRIEBSDATEN

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der Anforderungsanalyse hinsichtlich der Entitäten, Beziehungen und Abläufe, die die Betriebsdatenverwaltung aus Sicht der angebundenen Module abbilden können muss. Hierzu wird Schritt für Schritt ein Modell vorgestellt, das die Erkenntnisse aus den entsprechenden Anforderungen zusammenfasst. Insbesondere werden hierbei auch einige neue Begriffe eingeführt und unscharf verwendete Begriffe genauer definiert.

Datenelemente

Der Begriff *Betriebsdaten* wurde bereits definiert als „sämtliche Daten, die vergangene Ereignisse, Vorgänge oder Zustände in einer Logistikanlage quantitativ beschreiben“. Betriebsdaten sind demzufolge im Wesentlichen eine Sammlung von numerischen Werten. Ein einzelnes („Betriebs-“) Datum, d. h. ein einzelner Zahlenwert, den die Module über die Betriebsdatenverwaltung veröffentlichen und abfragen können sollen, wird im Folgenden als *Datenelement* bezeichnet; synonym wird manchmal auch einfacher *Wert* genutzt.

Metriken

Die Datenelemente, die die Betriebsdatenverwaltung sammeln soll, werden in *Zeitreihen* erfasst; d. h. eine bestimmte Größe wird im *Zeitverlauf* in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen bestimmt und abgespeichert. Solche Größen werden im Folgenden *Metriken* genannt; ein Datenelement ist also immer einer Metrik fest zugeordnet. Die Metrik eines Datenelements stellt somit eine Beschreibung der inhaltlichen Aussage dieses Datenelements dar. Jedes Datenelement kann über die zugeordnete Metrik und seine Zeitangabe eindeutig identifiziert werden.

Beispiele für Metriken sind:

- Kommissionierte Menge an einem Arbeitsplatz bei der Bearbeitung von TEs vom Typ X durch einen bestimmten Lagermitarbeiter

- Anzahl ausgelagerter TEs innerhalb von 24 Stunden in der gesamten Anlage
- Durchschnittliche Temperatur eines Motors nach Tagen aufgeschlüsselt
- Kumulierter Zeitaufwand für Garbage Collection seit dem Start eines bestimmten Moduls
- Anzahl Prozessoren eines Rechners, die in der letzten halben Stunde länger als 10 Minuten eine Auslastung größer 90% aufwiesen

Von entscheidender Bedeutung für die Strukturierung der gesammelten Daten innerhalb der Betriebsdatenverwaltung ist die Art und Weise, wie Metriken definiert und klassifiziert werden; dies beeinflusst auch, wie flexibel die gesammelten Daten später kombiniert, aggregiert und analysiert werden können.

Denkbar wäre, die Metriken einer Anlage in einer Art Baumstruktur von Namespaces einzuordnen. Da zwischen den einzelnen Unterscheidungskriterien allerdings oftmals kein hierarchischer Zusammenhang besteht, ist es sinnvoller, hier eine nicht-hierarchische Gliederung einzusetzen. Dazu muss auf jeder Metrik zur eindeutigen Identifikation eine Liste von *Tags* gespeichert werden. Jeder Tag besteht aus einem Key-Value-Paar; der Key ist dabei ein *Merkmal* wie „Modul“, „Förderer“, „SPS“ oder „Lager“, anhand dessen die Metrik klassifiziert wird; ein Tag *definiert* sein Merkmal auf dieser Metrik. Ein Merkmal kann auf einer Metrik natürlich nicht mehrfach definiert werden. Ähnlich beschreibt auch DIN 1313 ein Merkmal als „eine in objektiver Weise präzierte Eigenschaft, durch die Objekten, die Träger für das Merkmal sind, jeweils ein Merkmalswert als Kennzeichen der Erscheinungsform zugeordnet wird. (...) Ein Objekt kann Merkmalswerte unterschiedlicher Merkmale tragen, aber von jedem Merkmal kommt ihm nur ein Merkmalswert zu.“ (DIN 1998, S. 15) Der Value eines Tags stellt entsprechend die *Ausprägung* bzw. den Wert des Merkmals für die jeweilige Metrik dar.

Die Tags dürfen sich auch fachlich teilweise überschneiden und damit Redundanzen enthalten, wenn dies z. B. für Aggregationen sinnvoll ist; wichtig ist nur, dass sie in ihrer Gesamtheit je Metrik eindeutig sind. Der Begriff „Tag“ ist hierbei aus dem Kontext der bekannten Zeitreihendatenbank *InfluxDB* entliehen, welche die einzelnen in ihr gespeicherten Metriken (dort als *series* bezeichnet) auf ganz ähnliche Weise unterscheidet (vgl. InfluxData 2018).

Merkmal „Größe“

Die *Größe* ist ein spezielles Merkmal, das auf jeder Metrik definiert sein muss.

DIN 1313 definiert die Größe als ein spezielles „Merkmal, für das zu je zwei Merkmalswerten ein Verhältnis gebildet werden kann, das eine reelle Zahl ist.“ (DIN 1998) In diesem Sinne stellt eine Metrik im Kontext der Betriebsdatenverwaltung also einen Schlüssel für eine bestimmte Größe an einem bestimmten Objekt bzw. Merkmalsträger

dar, deren Wert sich im Zeitverlauf verändert. Derjenige konkrete Merkmalswert, den die Metrik „messen“ soll, wird durch den Tag mit dem Merkmal Größe festgelegt; das Objekt, auf das sich die Metrik bezieht, wird durch die übrigen Tags definiert.

Beispiele für Ausprägungen des Merkmals „Größe“ auf einer Metrik könnten z. B. sein:

- Elektrische Leistungsaufnahme, Ausführungsdauer
- Kontext Fahrzeugantriebe: Betriebsstundenzähler, Kilometerzähler, aktuelle Position, aktuelle Geschwindigkeit, aktuelles Drehmoment
- Kontext Systemüberwachung: CPU-Last, Netzwerklatenzzeit, Übertragungsrate, Disk-IO, DB-Füllgrad, Prozess aktiv
- Kontext Materialfluss: Kreuzungsdurchsatz, Anzahl Fehllösungen

Jeder Größe ist fest eine Dimension (d. h. beispielsweise Länge, Geschwindigkeit, Anzahl, Gewicht, ...) zugeordnet. Dadurch kann die Betriebsdatenverwaltung auch bei Berechnungen informiert reagieren und z. B. die Dimensionen (und damit auch Einheiten) von Ergebnissen automatisch bestimmen. (DIN 1998, S. 6) Die Betriebsdatenverwaltung muss dazu die sieben SI-Basisdimensionen sowie die Dimensionen *Zahl* und *Datenmenge* kennen. Alle abgeleiteten Dimensionen gehen dann auf ein Produkt von Potenzen der Basisdimensionen zurück. (DIN 1998, S. 8)

Die Größe einer Metrik ist auch wichtig, um mögliche Aggregationen bestimmen zu können. Multiplikationen und Divisionen zwischen verschiedenen Größen (oder selbst Dimensionen) sind prinzipiell immer denkbar (wenn auch nicht immer physikalisch sinnvoll). Addition oder Subtraktion zwischen Werten verschiedener Dimensionen sind zwar nicht möglich; ob diese Operationen zwischen verschiedenen *Größen* sinnvoll sind, kann jedoch oft nicht eindeutig definiert werden. Ein (physikalisches) Beispiel hierfür sind die Größen „Arbeit“ und „Drehmoment“. (Wallot 1953, S. 140) Beide haben die Dimension $M \cdot L^2 \cdot T^{-2}$ bzw. „Kraft mal Länge“, jedoch leitet sich dies im Fall der Arbeit von einer Kraft ab, die über diese Länge hinweg wirkt, während beim Drehmoment die Länge eines Hebels, an dem die Kraft wirkt, gemeint ist; um das Drehmoment in eine Energie zu überführen, ist zusätzlich noch die Angabe des Drehwinkels des Hebels notwendig. Ebenso macht es im Kontext einer Logistikanlage wenig Sinn, z. B. die Anzahl der aktiven SPS-Störungen, die Anzahl TEs in einem Lager und die Anzahl Scanner-Fehllösungen innerhalb der letzten Stunde zu addieren, auch wenn es sich jeweils um Größen der Dimension „Zahl“ handelt. Umgekehrt kann es jedoch durchaus sinnvoll sein, etwa die Anzahl offener Auslageraufträge von der Anzahl TEs in einem Lager zu subtrahieren. Aus diesem Grund sind Addition und Subtraktion zwischen Metriken verschiedener Größen, aber gleicher Dimension, in der Betriebsdatenverwaltung grundsätzlich zugelassen.

Erfassungen

Aus den Anforderungen an die Betriebsdatenverwaltung ergibt sich, dass drei grundlegende Arten der Datenentstehung berücksichtigt werden müssen: aktiv, passiv und berechnend.

Die Art, wie die Datenelemente einer Metrik entstehen, ist nicht zwingend für alle Datenelemente der Metrik gleich; daraus folgt, dass diese nicht an der Metrik, sondern an einer weiteren Entität festgemacht werden muss, die die Art der Datengewinnung für eine bestimmte Metrik in einem bestimmten Zeitraum beschreibt. Diese Entität wird im Folgenden als *Erfassung* bezeichnet.

Diese Aufteilung ist insbesondere deswegen notwendig, weil auch denkbar ist, dass eine Erfassung mehrere Metriken gleichzeitig mit Datenelementen versorgen kann. Dies betrifft z. B. Erfassungen, die mehrere Werte in einer einzelnen Datenbanktransaktion abfragen, oder Berechnungen, bei denen mehrere Ergebnisse entstehen.

Bei einer **passiven Erfassung** werden die Daten aus einer Logik innerhalb eines Moduls heraus gemeldet; dies ist z. B. bei der Aufzeichnung von Ereignissen der Fall.

Aktive Erfassungen werden verwendet, wenn die Betriebsdatenverwaltung nach Anweisung eines Moduls selbständig regelmäßig Werte für eine Metrik ermittelt; dies ist vor allem bei der Abtastung von Zuständen nützlich und wird in den bestehenden Lösungen (Cockpit, RRDB) bereits vielfach angeboten. Das Modul muss hierzu der Betriebsdatenverwaltung die Abfragehäufigkeit und die Logik für die Abfrage mitteilen; anschließend ist die Betriebsdatenverwaltung dafür verantwortlich, die Abfragelogik entsprechend den geforderten Intervallen aufzurufen.

Prinzipiell könnte ein solcher Mechanismus zur regelmäßigen Abfrage auch durch die Module selbst implementiert werden; jedoch würde dies wieder Aufwände und Duplizierungen in den einzelnen Modulen verursachen.

Berechnende Erfassungen, oder kurz Berechnungen, führen Transformationen und Aggregationen der Daten durch. Diese Erfassungen generieren also ihre Datenelemente vollständig innerhalb der Betriebsdatenverwaltung, indem sie sie aus anderen, bereits bekannten Datenelementen berechnen.

Löschkonfigurationen

Die gesammelten Beobachtungen werden in der Praxis nicht für immer aufbewahrt werden können; stattdessen ist es erforderlich, aus Kapazitätsgründen alte Daten nach einiger Zeit zu löschen oder zusammenzufassen. Dies soll die Betriebsdatenverwaltung über sogenannte *Löschkonfigurationen* ermöglichen.

Hierzu muss die Betriebsdatenverwaltung alle Metriken regelmäßig überprüfen. Wenn zu einer Metrik in einem bestimmten Zeitraum mehr Beobachtungen gespeichert sind als nach der zugeordneten Löschkonfiguration gespeichert sein

sollten, werden diese mit einer in der Löschkonfiguration angegebenen Funktion aggregiert, die Ergebnisse in einer zugeordneten Metrik als Beobachtungen abgelegt und die alten Beobachtungen werden gelöscht.

Abfragen und Abonnements

Um die gesammelten Daten nutzen zu können, müssen die Module Möglichkeiten haben, diese abzufragen. Hierbei werden grundsätzlich zwei Varianten unterschieden: Abfragen von Datenelementen eines definierten Zeitraums (der Vergangenheit) und Abonnements von Metriken.

Bei der Abfrage eines Datenelements aus einem definierten Zeitraum gibt das Modul die Metrik an, aus der es Datenelemente benötigt, sowie den gewünschten Zeitraum, die gewünschte Einheit und die gewünschte Auflösung; die Betriebsdatenverwaltung liefert dann die benötigten Daten zurück.

Ein Modul kann außerdem eine Metrik abonnieren, um bei der Entstehung neuer Datenelemente dieser Metrik benachrichtigt zu werden. Wenn ein Modul beendet wird, verfallen seine Abonnements.

KONZEPTAUSWAHL ZUR GROBSTRUKTUR DER IMPLEMENTIERUNG

Dieser Abschnitt stellt nun zunächst eine Reihe von Varianten zum grundlegenden technischen Aufbau eines Betriebsdatenverwaltungssystems vor; anschließend werden die Konzepte gegeneinander abgewogen, um zuletzt eine Empfehlung auszusprechen.

Grundsätzlich fallen im Rahmen der Betriebsdatenverwaltung Zeitreihendaten und Metadaten an. Die Zeitreihendaten entsprechen dabei den Datenelementen, die die Betriebsdatenverwaltung in großer Anzahl speichern und verwalten muss, während alle übrigen Informationen (Metriken, Merkmale, Merkmalsausprägungen, Erfassungen usw.) in die Kategorie der Metadaten fallen.

In jeder Konstellation ist es notwendig, dass die Schnittstelle zwischen den einzelnen Modulen und der Betriebsdatenverwaltung über eine Programmlibrary realisiert ist, sodass aus Sicht der Module zur Interaktion ausschließlich direkte API-Aufrufe notwendig sind. So kann sichergestellt werden, dass die Meldung von Beobachtungen durch die Module nicht blockiert und dass kein redundanter Code in den Modulen nötig ist. Alle iWACS[®]-Module sind in Java implementiert, sodass hier für alle Module dieselbe Bibliothek eingesetzt werden kann. Wenn im Folgenden von Aktionen der Module gesprochen wird, so sind damit auch Aktionen gemeint, die durch die eingebundene Betriebsdaten-Library in den Modulen durchgeführt werden.

Metadatenverwaltung

Zunächst sollen zwei Möglichkeiten beschrieben werden, um die Metadaten innerhalb einer Installation der Betriebsdatenverwaltung zu speichern. Die Metadaten sind zwar erheblich weniger umfangreich als die Zeitreihendaten, jedoch

ist ihre Verwendung und ganz allgemein ihr Lebenszyklus deutlich komplexer: Sie müssen über alle Module hinweg konsistent bekannt sein, und viele Metadatenätze können nach dem Anlegen auch bearbeitet und evtl. wieder gelöscht werden.

Die einfachste und naheliegendste Option ist es, die Metadaten je Installation in einer einzelnen, zentralen Datenbank zu speichern, die klassischerweise relational aufgebaut und unabhängig von den Modulen ist. Somit ist sichergestellt, dass nur ein einziger, konsistenter und persistent abgelegter Datenstand existiert. Die Absicherung der Konsistenz und die Verhinderung von parallelen Zugriffen durch mehrere Module auf einen Datensatz erfolgt durch die Concurrency-Bordmittel der Datenbank, die diese im benötigten Umfang mitbringen muss.

Eine zweite Variante wäre, dass jedes Modul einen eigenen Metadatenpeicher hält und die Module (bzw. genauer die Betriebsdaten-Libraries) die Synchronisierung übernehmen. Diese Datenbank könnte auch einfach in die bestehende Datenbank des jeweiligen Moduls integriert werden. Der komplexeste Teil an dieser Lösung ist der notwendige Synchronisationsmechanismus, der sicherstellt, dass die Datenstände der einzelnen Module sich nicht widersprechen. Dieser erfordert ein hohes Maß an Kommunikation zwischen den Modulen und kann insbesondere zu Problemen führen, wenn die Verbindung eines Moduls nach außen abbricht und es sich nicht mit den anderen Modulen abstimmen kann.

In Abbildung 1 werden die beiden Konzepte anschaulich schematisch gegenübergestellt: Links die dezentrale, rechts die zentrale Metadatenverwaltung. Die roten Datenbank-symbole und Pfeile stellen Speicher bzw. Flüsse von Metadaten dar; die Library zur Betriebsdatenverwaltung, die in die Module eingebunden wird, ist hier mit „BDV-Library“ abgekürzt.

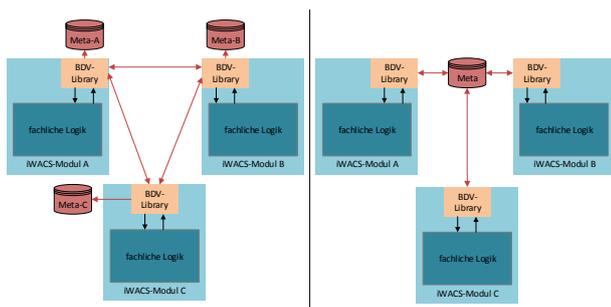


Abbildung 1. Mögliche Strukturen zur Verwaltung der Metadaten

Die dezentrale Organisation hat gegenüber der zentralen Form einige Vorteile:

- Die Module können autarker arbeiten, da jedes eine Kopie der Metadatenbasis zur Verfügung hat.
- Es existiert kein Single Point of Failure.

- Es muss nicht zwingend eine separate Datenbank für die Metadaten eingerichtet werden; stattdessen kann das Schema zur Metadatenverwaltung auch in die – so wieso notwendige – Datenbank des iWACS[®]-Moduls integriert werden.
- Je nach Ausgestaltung des Synchronisationsmechanismus können Netzwerkzugriffe prinzipiell flexibel so früh oder so spät wie möglich vorgesehen werden (*lazy loading* oder *eager loading*).
- Falls die Module räumlich verteilt installiert sind (z. B. einige Module in einem Serverraum direkt in der Anlage und andere Module in einem entfernten Rechenzentrum), kann die jeweilige Metadaten-DB beim Modul mit installiert werden, was Zugriffszeiten und Durchsätze verbessert.

Diesen Punkten steht aber auch eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

- Das nötige Synchronisationsprotokoll zwischen den Modulen ist sehr komplex und würde im Wesentlichen eine Nachimplementierung von bereits existierenden verteilten Datenbankanwendungen darstellen; hingegen sind die Concurrency-Funktionalitäten vieler verbreiteter Datenbanken bewährt und ausgereift.
- Die Struktur des Systems ist komplex und die Abläufe sind schwierig zu verstehen, was die Analyse von Fehlern und Problemen erschwert.
- Bei Abfragen z. B. aller Metriken ist oft viel (zeit-aufwändige) Kommunikation mit zahlreichen Partnern notwendig, bevor ein Ergebnis vorliegt.
- Es gibt keine zentrale Stelle, an der bestimmte systemweite Konfigurationen wie Verbindungsdaten einheitlich gepflegt werden könnten.

Aufgrund dieser Nachteile für die Realisierung der Metadatenverwaltung wird die erstgenannte **zentralisierte Variante** empfohlen. Diese Entscheidung beruht auf der Komplexität und den unvermeidbaren Problemen bei der Umsetzung des Synchronisationsprotokolls. Hingegen relativieren sich die Vorteile der dezentralen Option bei genauerer Betrachtung zumindest teilweise wieder:

- Autarkes Arbeiten ist nur so lange möglich, wie keine Kommunikation benötigt wird; diese kann aber den meisten Fällen (je nach Ausgestaltung der Synchronisation) nicht vermieden werden.
- Ausfallsicherheit kann auch bei (aus Benutzersicht monolithischen) relationalen Datenbanken z. B. durch Replizierung erreicht werden.
- Bei räumlicher Verteilung der Module kann das dezentrale Modell zwar die Zugriffszeiten auf die Metadaten-DB verbessern, gleichzeitig dürfte aber die verlangsamte Kommunikation bei der Synchronisierung diesen Vorteil wieder zunichtemachen.

Zeitreihenverwaltung

Die Zeitreihendaten sind im Vergleich zu den Metadaten deutlich einfacher strukturiert: Im Wesentlichen handelt es sich um große Mengen an Datenelementen, die nur hinzugefügt, aber nie bearbeitet werden. Stattdessen stellt hier die Datenmenge die eigentliche Herausforderung dar; Schätzungen ergaben, dass bei großen Anlagen und intensiver Sammlung von Daten bis zu 20.000 Datenelemente pro Sekunde im Durchschnitt (!) zu erwarten sind.

Der Anwendungsfall, größere Mengen an Zeitreihendaten zu speichern und auszuwerten, kommt auch außerhalb der Intralogistik relativ häufig vor. Aus diesem Grund existiert bereits eine große Anzahl an speziell dafür konzipierten Zeitreihendatenbanken; Beispiele hierfür sind *InfluxDB*, *OpenTSDB*, *Prometheus* oder *Riak TS*. Diese sind auf die oben beschriebene Verwendung hin optimiert und erlauben insbesondere auch oft bereits eine Vielzahl an Aggregationen über die gespeicherten Daten, sodass diese direkt in der Datenbank ausgeführt werden können; dies dürfte die Ausführungszeiten für solche Operationen erheblich senken. Außerdem verwenden diese Datenbanken oft Datenstrukturen, die dem vorgestellten Modell sehr ähnlich sind, was die Ablage der Daten stark erleichtert. Es empfiehlt sich also, für die Betriebsdatenverwaltung ebenfalls eine solche Datenbank einzusetzen.

Zudem muss die Betriebsdatenverwaltung bei jeder Entstehung eines neuen Datenelements (sowohl bei Beobachtungen als auch bei Derivaten) eventuell andere Module benachrichtigen (z. B. Module, die die Metrik des Datenelements abonniert haben, oder die das Datenelement für die Aktualisierung von aggregierten Werten benötigen).

1) *Zentrale Datenhaltung*: Der naheliegendste Ansatz ist auch in diesem Fall der Einsatz einer einzelnen, zentralen Datenbank, die die Beobachtungen sämtlicher Module aufnimmt. Alle Module (bzw. die Betriebsdatenverwaltung-Libraries) senden ihre Beobachtungen direkt an diese Datenbank und fragen sie direkt dort ab. Notwendige Aggregationen und Berechnungen werden bereits durch die Datenbank durchgeführt, d. h. die Datenmenge, die ein einzelnes Modul von der Datenbank abfragt, hält sich in den meisten Fällen in engen Grenzen. In der Library selbst muss daher in diesem Szenario im Idealfall auch keine Logik für Aggregationen implementiert sein.

Falls die Zeitreihendatenbank dies zulässt, könnte das Schema für die Metadaten auch in diese Datenbank mit integriert werden; somit wäre für das gesamte System nur eine einzige zusätzliche Datenbank notwendig.

Diese Datenbank muss so ausgelegt sein, dass sie die anfallende Datenmenge verarbeiten kann: sowohl das Gesamtvolumen, als auch die Einfügsrate. Die Datenbank sollte Hardwareressourcen nicht mit einem Modul teilen müssen, um gegenseitige Beeinträchtigungen zu verhindern.

Berechnungen werden durch diejenigen Module angestoßen, die die Werte benötigen (also die die Zielmetriken der Berechnung abonniert haben oder Werte aus ihnen abfragen). Somit ist sichergestellt, dass jedes Modul alle benötigten aggregierten Daten immer ermitteln kann, wenn die Zeitreihendatenbank erreichbar ist. Nachteilig ist jedoch, dass eventuell dieselbe Berechnung von mehreren Modulen einzeln angefordert wird. Manche Zeitreihendatenbanken (z. B. *InfluxDB* (InfluxData 2018) oder *OpenTSDB* (OpenTSDB 2016)) unterstützen auch automatisierte, regelmäßige Aggregationen innerhalb der Datenbank, um dieses Problem zu entschärfen.

Wenn ein Modul eine neue Beobachtung meldet, muss es auch die nötigen Benachrichtigungen an alle Module versenden; für diesen Zweck muss es Verbindungen zu allen anderen Modulen unterhalten.

Optional ist es denkbar, vor die zentrale Datenbank noch einen separaten Prozess zu platzieren, der zwischen den Modulen und der Datenbank vermittelt. Dieser könnte Berechnungen übernehmen, die die Datenbank nicht unterstützt und die aufgrund des hohen Berechnungsaufwands nicht durch das anfragende Modul durchgeführt werden sollten. Außerdem könnten Benachrichtigungen der Module sowie Berechnungen zentral über diesen Prozess abgewickelt werden, sodass überhaupt keine Verbindungen mehr zwischen den Modulen untereinander notwendig sind. Andererseits erhöht ein solcher zusätzlicher Prozess wieder die Komplexität des Gesamtsystems und verschlechtert Durchsätze und Latenzen, da alle Datenbankzugriffe über eine weitere Zwischenstation laufen müssen.

2) *Dezentrale Datenhaltung*: Den Gegensatz zur gerade beschriebenen Variante stellt eine vollständig dezentrale Datenhaltung dar. Dies bedeutet, dass für jedes Modul eine eigene Zeitreihendatenbank angelegt wird, in der alle Beobachtungen gespeichert werden, die durch dieses Modul erfasst werden. Diese Datenbank wird allein durch das jeweilige Modul verwaltet; dadurch muss sie auch keine parallelen Zugriffe mehrerer Prozesse verarbeiten können.

Benachrichtigungen an andere Module sendet jedes Modul auch hier selbständig.

Bei Abfragen muss das interessierte Modul zunächst ermitteln, welches Modul die benötigten Daten erfasst hat und sie dann von diesem Modul anfordern. Aggregationen, die über Daten aus mehreren verschiedenen Modulen laufen, müssen dann zumindest teilweise durch das anfragende Modul erledigt werden; d. h. die Daten der einzelnen Module werden zunächst durch das erfassende Modul und seine Datenbank soweit wie möglich aggregiert, und die Ergebnisse werden an das anfragende Modul übertragen, welches dann die verbleibenden Berechnungen durchführt.

Auch hier ist wichtig, dass den Zeitreihendatenbanken entsprechende Hardwareressourcen zur Verfügung stehen, die sich nicht mit denen der Module selbst überschneiden.

Berechnungen müssen auch in dieser Konstellation durch jedes Modul, das eine Zielmetrik einer Berechnung abonniert hat, selbständig angestoßen werden. Eventuell können die einzelnen Module Ergebnisse von Abfragen einige Zeit zwischenspeichern, um mehrfache Berechnungen zu vermeiden.

Alternativ wäre auch denkbar, dass die Module bei Abfragen aus Zeitreihendatenbanken anderer Module direkt auf diese Datenbanken zugreifen. Dies könnte Kommunikationsoverhead einsparen, erfordert dann jedoch, dass jedes Modul pro anderem Modul *zwei* Verbindungen verwalten muss.

3) *Gemischte Datenhaltung*: Die dritte Option, die hier vorgestellt werden soll, stellt eine Kombination aus zentraler und dezentraler Datenspeicherung dar.

Hierbei werden sowohl eine zentrale Zeitreihendatenbank, als auch verteilte Datenbanken pro Modul angelegt. Bei der Entstehung von Beobachtungen werden diese durch das Modul in dessen eigene, private Datenbank und zusätzlich noch in die zentrale Datenbank eingetragen. Dies könnte über zwei Einfügeoperationen auf den beiden Datenbanken gelöst werden, oder auch durch die Datenbanken selbst, wenn diese eine solche Funktion (Spiegelung aller Einfügeoperationen an eine andere Datenbankinstanz) unterstützen.

Abfragen werden in diesem Szenario wie bei der zentralen Datenhaltung auf der zentralen Datenbank ausgeführt. Hierfür ist insbesondere wichtig, dass die Datenbanken immer synchron gehalten werden, um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden (z. B. wenn eine Berechnung aufgrund einer neuen Quellbeobachtung aufgerufen wird, aber die Quellbeobachtung noch nicht in der zentralen Datenbank abgelegt wurde). Falls Netzwerkprobleme auftreten sollten, können die einzelnen Module immer noch regulär Daten einspeisen und auch die eigenen Daten abfragen.

Auch in dieser Variante ist denkbar, vor die zentrale Datenbank einen separaten Prozess zur Vermittlung zu schalten.

4) *Konzeptempfehlung*: Um die drei vorgestellten Konzepte und ihre Varianten übersichtlich miteinander vergleichen und bewerten zu können, wurden diese zusammen mit ihren Vor- und Nachteilen in einer Entscheidungsmatrix gegenübergestellt.

Auf dieser Basis habe ich entschieden, die Variante „Zentrale Datenhaltung“ mit einem Zentralprozess als beste Option zu empfehlen. Diese Entscheidung basiert vor allem auf folgenden Gründen:

- Die Anzahl notwendiger Systeme und Verbindungen ist vergleichsweise gering, da nur eine Zeitreihendatenbank und ein einzelner zentraler Prozess benötigt wird. Dies reduziert die Komplexität der Lösung deutlich im Vergleich zu anderen Varianten.
- Aggregationen können zentral durchgeführt und koordiniert werden. Dadurch ist eine Belastung der Module durch aufwändige Berechnungen und große zu

übertragende Datenmengen ausgeschlossen. Zudem ist keine Abstimmung über die Durchführung von Aggregationen notwendig und Aggregationen müssen nicht auf mehrere Datenbanken aufgesplittet werden, was ebenfalls die Komplexität des Systems ganz erheblich vermindert.

- Für Datenabfragen bzw. Benachrichtigungen aufgrund von Abonnements ist zwar eine Verbindung zum Zentralprozess notwendig; zumindest die Benachrichtigungen, die nicht auf berechnenden Erfassungen basieren, könnten aber über Direktverbindungen auch bei einem Ausfall des Zentralprozesses übermittelt werden. Das Melden neuer Beobachtungen muss aufgrund hoher Performanceanforderungen ohnehin gepuffert werden und ist daher (zumindest übergangsweise) auch ohne Verbindung zum Zentralprozess möglich.
- Es werden keine Daten mehrfach gehalten, was den Speicherplatzbedarf reduziert.

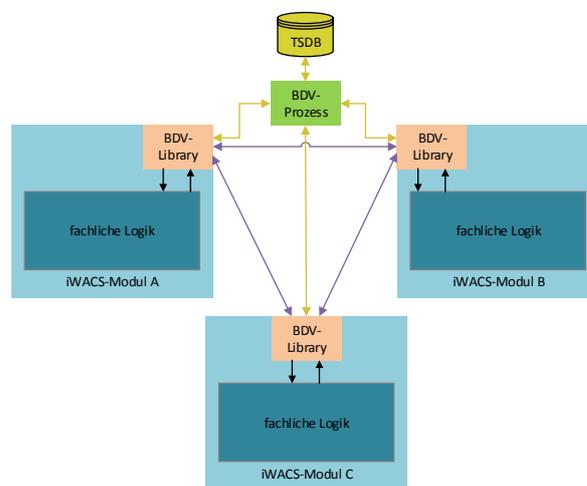


Abbildung 2. Empfohlene Struktur zur Verwaltung der Zeitreihendaten

Die empfohlene Struktur ist in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Die gelben Pfeile stellen Flüsse von Zeitreihendaten dar; die violetten hingegen stehen für die (optionalen) direkten Benachrichtigungen zwischen den Modulen. Die Metadatenverwaltung ist hier zur besseren Übersichtlichkeit nicht mit abgebildet.

FAZIT

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die ersten Schritte hin zu einer einheitlichen Erfassung, Verwaltung und Kommunikation von Betriebsdaten in iWACS®-Intralogistiksystemen unternommen.

Dies beinhaltete zunächst die Analyse des Istzustandes in diesem Bereich innerhalb der iWACS®-Plattform. In einem zweiten Schritt erfolgte dann die Anforderungsanalyse, in der aus den Zieldefinitionen, aus Interviews mit Stakeholdern und aus der Untersuchung von Dokumenten und älteren

Systemen Anforderungen an die Betriebsdatenverwaltung gewonnen wurden.

Anschließend wurde ein Datenmodell entwickelt und vorgestellt, mit dem Betriebsdaten einer Intralogistikanlage so abgebildet werden können, dass die ermittelten Anforderungen möglichst gut abgedeckt werden.

Zuletzt erfolgte eine Untersuchung möglicher Konzepte zur Strukturierung der Betriebsdatenverwaltung, von denen schließlich für eines eine Empfehlung ausgesprochen wurde.

Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für das weitere Vorgehen zur Entwicklung der Betriebsdatenverwaltung. Als nächstes wird hierzu ein erster Prototyp entworfen und implementiert, mit dem durch Tests dann untersucht werden kann, welche Konzepte und Technologien für die Umsetzung der Betriebsdatenverwaltung eingesetzt werden sollten; dies betrifft z. B. die verwendete Zeitreihendatenbank und die Technologien zur Kommunikation der einzelnen Komponenten des Systems untereinander.

REFERENCES

- DIN (Dez. 1998). *DIN 1313 – Größen*. Norm. Deutsches Institut für Normung e. V.
- InfluxData (Nov. 2018). *InfluxDB 1.7 Documentation*. InfluxData. URL: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.7/> (besucht am 19. 11. 2018).
- OpenTSDB (2016). *OpenTSDB 2.3 documentation: Rollup And Pre-Aggregates*. URL: http://opentsdb.net/docs/build/html/user_guide/rollups.html (besucht am 21. 12. 2018).
- Rupp, Chris (2014). *Requirements-Engineering und -management*. 6. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Wallot, Julius (1953). *Grössengleichungen, Einheiten und Dimensionen*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth Verlag.

Framework for Quantitative Digitalization Measurement in Supply Chain Planning

Tim Lauer

Infineon Technologies AG

Technical University of
Dortmund
Am Campeon 1-15
85579 Munich

E-Mail: tim.lauer@infineon.com

Maximilian Wolf

Infineon Technologies AG

Munich University of Applied
Sciences
Lothstraße 64
80335 Munich

E-Mail: maxi.wolf5@t-online.de

Jörg Puchan

Munich School of Engineering
and Management

Munich University of Applied
Sciences
Lothstraße 64
80335 Munich

E-Mail: puchan@hm.edu

KEYWORDS

Quantitative Digitalization Measurement Framework, Quantification of Digitalization, Digitalization Monitoring, Digital Transformation, Digitalization, Supply Chain Planning

ABSTRACT

Measurement is a central element for any effective management. The megatrend of digitalization enables new possibilities, but also requires research on its appropriate monitoring considering digital transformation. In supply chain planning, today's methods are mostly qualitative. Thus, this study analyzes how the impact of digitalization can be quantified scoped to this field of application.

Based on the literature streams supply chain planning performance measurement, digitalization assessment and digital technologies the authors develop a holistic framework for quantitative digitalization measurement (QDMF). The framework comprises three dimensions: 'Man', 'Technology', and 'Organization'. These itemize to 22 measurands specific to the context. The logic allows the comprehensive assessment of the effectiveness of digitalization projects and provides reliable, informative value for decision-making by the quantitative scaling. The framework is applied by conducting expert interviews for customization and data collection, whereon analytics calculates the measurands. In the end, experts interpret the results.

For verification and validation, the framework is deployed to the empirical use case of Infineon Technologies AG, Europe's largest semiconductor manufacturer. The study concludes that quantitative digitalization monitoring is promising and can deliver new insights for effective managerial decision-making. Obstacles as limited data availability and constrained explanatory power are investigated and provide options for further studies.

INTRODUCTION

Digitalization is an extensive megatrend that no longer affects only traditional IT companies, but rather transforms all industries and business segments (BMW,

2019; Yoo *et al.*, 2010). Moreover for supply chain management, digitalization is an ongoing driver (Klötzer and Pflaum, 2017). Digitalization enables great potentials to increase efficiency, to improve productivity, to create new revenue streams, and to find new value adding opportunities (Kotarba, 2017). It is important to state, that digitalization goes beyond the conversion from analog to digital, it rather signifies the transformation of entire socio-technical structures (Yoo *et al.*, 2010). Nevertheless, proceeding digitalization poses major challenges to companies (Furmans and Wimmer, 2018). Thus, new management approaches are needed, to implement digitalization effectively. According to classical management literature, e.g. PDCA-cycle (Deming, 2000), and more specific management 4.0 literature, e.g. Dortmund Management Model (Furmans and Wimmer, 2018), the monitoring of digitalization projects, besides planning and implementation, constitute a key element. To measure the progress in these processes, digitalization has to be assessed. Recent literature discusses several assessment tools mainly introduced by research agencies, consulting companies, government organizations, and other interest groups. A metalevel of production surroundings often comprises the focus of these approaches (Klötzer and Pflaum, 2017). The models are limited in their scope, their qualitative assessment methods, and their scientific resilience and foundation. Supply chain management poses a suitable research area due to rare but raising attention in actual publications in this context. Moreover, the number of digital technologies and innovations is steadily and rapidly growing. For instance, artificial intelligence, machine learning or data mining are technologies promising to cope with the challenges of planning in volatile and competitive market environments (Panetta, 2018).

As deduction, further investigations into digitalization assessment in the direction of quantification might be promising for supply chain planning. As a result, the authors aimed at narrowing the research gap by dealing with the following research questions:

Research Question 1: How can digitalization be quantified for supply chain planning processes?

Research Question 2: How does the implementation of digital technologies affect digitalization measurement?

Therefore, in Chapter 2 the literature foundation is provided. Chapter 3 outlines the development of the framework and ends by summarizing the final approach. Chapter 4 discusses the use case validation. Finally, in Chapter 5 the authors draw conclusions and describe future enhancement options.

LITERATURE REVIEW

Embedding this research in its scientific context, the relevant literature streams are reviewed. This study is located in the field of application of supply chain planning with focus on measuring and monitoring. Hence, the first subchapter deals with classical metrics and measures in terms of planning. This extensive summary gives the foundation of the developed framework. Due to the purpose of quantifying digitalization, existing the assessments of digitalization are discussed. As this stream is one core element, the second subchapter is the most extensive and detailed one verifying the announced research gap as well. To consider a use cases oriented point of view the authors furthermore reviewed current digital technologies trends. Subsequently the framework conditions for the construction of a theoretical model can be set.

Performance Measurement in Supply Chain Planning

The recent literature regarding performance measurement in supply chain planning targets on the collection and development of indicators as well as the evaluation of indicator sets. Consequently, a huge number of performance measurement indicators and systems have been developed in the recent years.

Well-known review papers providing those performance measurement frameworks are Gunasekaran *et al.* (2001), Gunasekaran, Patel and McGaughey (2004) and Chae (2009). In-depth literature reviews like Gunasekaran and Kobu (2007), Shepherd and Günter (2011)) show that indicators are related to different contexts. Thus, the researchers differentiate indicators by their decision-making horizon (Gunasekaran *et al.*, 2001; Gunasekaran *et al.*, 2004), their financial base (Gunasekaran *et al.*, 2001), their measurement base (Shepherd and Günter, 2011), their measured supply chain goal (Shepherd and Günter, 2011) or their level of consideration (Chae, 2009).

Concisely, a huge number of performance measurands associated to the area of supply chain planning is identified. However, there is no connection between performance measurement and digitalization of supply chain planning yet. Consequently, the insights into the effects of digitalization in this functional area is limited.

Digitalization Assessment

Since the terms digitalization and industry 4.0 are strongly related especially in German-speaking countries

(Furmans and Wimmer, 2018), both terms are taken into account in the literature research.

Regarding digitalization or industry 4.0 assessment, the analysis of literature shows that current research concentrates on maturity or readiness models. Whereas some others differentiate between both terms in practice these are used synonymously (Schumacher *et al.*, 2016). Within the recent years a vast number of these models have been developed by research institutes, consulting companies and other interest groups. The authors identified a list of models which is presented in Table 1.

Table 1: Digitalization Assessment Models

Model Name	Author, Date
Industry 4.0 Maturity Model	Schumacher <i>et al.</i> , 2019
Reifegradmodell Industrie 4.0	Schagerl <i>et al.</i> , 2016
360 Digital Maturity Assessment	Colli <i>et al.</i> , 2018
Acatech Industrie 4.0 Maturity Index	Schuh <i>et al.</i> , 2017
SIMMI 4.0	Leyh <i>et al.</i> , 2016
Impuls Industrie 4.0 Readiness Model	Lichtblau <i>et al.</i> , 2015
Industry 4.0 Reifegradmodell	Lanza <i>et al.</i> , 2016
Digital Index	Gruda <i>et al.</i> , 2016
The Connected Enterprise Maturity Model	Beadley, 2014
Industry 4.0 Maturity Model	Geissbauer <i>et al.</i> , 2016
APM Maturity Model (Asset Performance Management Maturity Model)	Dennis <i>et al.</i> , 2017
Digitalization Degree of Manufacturing Industry	Bogner <i>et al.</i> , 2016
Three stage maturity model	Ganzarain and Errasti, 2016
Industry 4.0 Maturity Model	Gökalp <i>et al.</i> , 2017
M2DDM (Maturity Model for Data Driven Manufacturing)	Weber <i>et al.</i> , 2017
Pathfinder i4.0	Innovationszentrum für Industrie 4.0, 2019
DREAMY (Digital REadiness Assessment MaturitY model)	Carolis <i>et al.</i> , 2017
The Digital Maturity Model 4.0	Gill and VanBoskirk, 2016
VTM Model for Digimaturity	Leino <i>et al.</i> , 2017
Digital Maturity Model	Berghaus and Back, 2016
Digitalization Maturity Model for the manufacturing sector	Canetta <i>et al.</i> , 2018

Five of these models are recognized as particular basis for this research work, selected by the evaluation of their scientific background and their level of delivered details. In the following sections a brief overview of these models is presented:

The ‘Acatech Industrie 4.0 Maturity Index’ (Schuh *et al.*, 2017; Zeller *et al.*, 2018) was introduced in 2017 by the National Academy of Science and Engineering (Acatech). It is a practice-oriented but scientifically grounded industry 4.0 assessment model dedicated to manufacturing industries. The emphasis of the model is on the evaluation of maturity on a business process level.

An application to sub-processes such as the supply chain planning is not proven. A questionnaire of around 600 questions evaluates indicators representing the digitalization assessment methodology. These indicators are based on the judgment of interviewees and therefore bears the risk of subjectivity. Hence, the eligibility of the model for the desired purpose, the digitalization monitoring of single processes and projects, is limited especially through its extensive scope, the unverified industry transferability and the lack of objectivity.

The 'Industry 4.0 Maturity Model' (Schumacher *et al.*, 2016; Schumacher *et al.*, 2019). publicized in 2016 and updated in 2019 was developed by the Fraunhofer Austria Research GmbH in cooperation with the Institute of Management Science at Vienna University of Technology. It constitutes a scientifically grounded maturity model with a validated applicability for manufacturing industries. The model focuses mainly on organizational aspects of digitalization. Assessment, therefore, is performed on a general company level. The scope of the model is limited to 65 questions for the maturity evaluation. Subjectively valued indicators in the form of a moderated self-assessment provide the evaluation basis. Consequently, the limited industry validation, the level of consideration, as well as the potential subjectivity in the assessment are an issue for the use as a monitoring tool for digitalization.

The 'Impuls Industrie 4.0 Readiness Model' (Lichtblau *et al.*, 2015), developed on behalf of VDMA's IMPULS foundation, was published in 2015. The authors review revealed that it is a scientifically well-grounded, widely used, valid readiness model in the mechanical and plant-engineering sector. Thereby, the model is designed to assess companies as a whole. The assessment is based on an online self-assessment relying on the subjective valuations of the assessors. However, there is no proof of applicability in other industries, the level of consideration is limited and there is a risk of subjectivity in the assessment. Subsequently it is not directly suitable for the desired purpose.

The 'Readiness Model for Industry 4.0' (Jodlbauer and Schagerl, 2016; Schagerl *et al.*, 2016). was developed in 2016 by Business Upper Austria – OÖ Wirtschaftsagentur in cooperation with the Institute for Intelligent Production at University of Applied Sciences Upper Austria. The approach targets on the assessment of industry 4.0 readiness and is not limited to a specific industry sector or application scope. Although the indicators are derived from literature, no detailed insight in the development methodology is given. The number or industry sectors of companies that have applied this model are unknown. The assessment is performed by structured interviews. Accordingly, even if the level of consideration and the wide application scope is eligible for the monitoring application, the model lacks on objectivity and on insights verifying the validity.

An examination of the previously presented models shows, none of the existing digitalization assessment models is particularly designed as monitoring tool for an

operational sub-process level. Most approaches lack information on the value of improvement through their measurements based on an interval scale, for instance 'Acatech Industrie 4.0 Maturity Index', 'Industry 4.0 Maturity Model' and 'Impuls Industrie 4.0 Readiness Model'. The method of questioning, mainly judgmental based questions, of all reviewed models also bears the risk of subjectivity due to the personal views of the assessors. The scope of some models is too extensive for the use as a monitoring tool, e.g. 'Acatech Industrie 4.0 Maturity Index'. Regarding the results, most assessment models are not applicable for the evaluation of operational sub-processes such as the supply chain planning, as they target on a generalized meta-level of digitalization. In particular, just whole companies or overall business processes can be assessed. Solely the 'Readiness Model for Industry 4.0' is not limited to a specific assessment level. But as it lacks information about validity and applicability, none of the existing models is appropriate for the desired application.

Nevertheless, there is huge scientific foundation in the delimitation of digitalization characteristics within these models. Thus, they form an important basis for the suggested solution of this research paper.

Digital Technologies

This section summarizes the current state of research on digital technologies to set the framework conditions and derive structuring criteria for its development.

Digital Technologies can be defined as the entirety of technologies to generate, process, transmit, and use digital assets (Loebbecke, 2006). For instance, these include technologies such as artificial intelligence, machine learning or datamining technologies. Analyzing current technology trend overviews, for instance Gartner's hype cycle for emerging technologies 2018 (Panetta, 2018; Payne, 2016) or the Munich Re trend radar (Bonaty, 2018), indicates that digital technologies are in focus of recent research, fast and unpredictable emerging and unstructured in deployed methods and application fields. Looking into detail, a rough categorization of their targets can be drawn: improving the human-machine interaction (e.g. conversational interfaces), enhancing the acquisition of data (e.g. smart factory), connecting and integrating data and systems (IOT platform), advancing the analytics to support or automate decisions (advanced machine learning) and refining the production, the processes, the products and the services (e.g. location based services). Many of the in brackets mentioned technologies are associated with artificial intelligence (AI) and are expected to change current business models (McAfee and Daugherty, 2017). Concluding from the reviews and the categorization, there is a huge number of emerging digital technologies with potential impact on processes and business models.

In the field of supply chain planning the main challenges are to deal with uncertainty, ambiguity and the complexity (Böhnke *et al.*, 2017). Experience has shown, digital technologies such as advanced analytics enable to coun-

teract these challenges and increase the planning performance. However, the literature review demonstrated that digital technologies are often discussed in more general. Detailed and comparable information on the precise impact of dedicated digital technologies especially on the supply chain planning are not in the focus of digital technology research yet. Therefore, the measurement of digitalization effect through a standardized framework adapted to the specific field of application opens up new opportunities. Furthermore, the literature review revealed that digital technologies can be structured by their purpose. To measure the effect of these technologies this structure can be applied to the technological structuring of the framework.

Findings

Summing up the literature review, a missing link between the performance measurement in supply chain planning and evaluating digitalization is identified. Furthermore, the existing digitalization assessments are not applicable as monitoring tools due to reasons of scope, risk of subjectivity, assessment level and of validity. There is a lack of research regarding the impact of technology implementation as representation of digitalization and performance. Thus, the authors develop a framework narrowing the identified research gap by combining the research fields of supply chain planning and digitalization assessment, fulfilling the requirements of monitoring and enabling impact monitoring of technology implementations.

QUANTITATIVE DIGITALIZATION

MEASUREMENT FRAMEWORK (QDMF)

To fill the analyzed research gaps the authors developed a new framework called Quantitative Digitalization Measurement Framework (QDMF), which delivers an alternative approach for measuring digitalization based on quantitative measurands. Therefore, the authors set up a development procedure allowing for the development of a scientifically substantiated framework. This procedure, as well as the final framework and the subsequent case validation of the framework are presented in the following subchapters.

Development Procedure

Screening scientific standard methodologies, the authors decided to go for a literature-based meta-development procedure. The main reasons are the large amount of suitable publications, as stated in the literature review, and the vast scope of fundamental theories, which need to substantiate the indicators.

From the comparison of different approaches, i.e. Bourne *et al.*, 2000; Lohman *et al.*, 2004; Neely *et al.*, 1997; Neely *et al.*, 1995; Franceschini *et al.*, 2019a, the authors extracted a five step development procedure and enhanced by two steps at the beginning to bridge to the targeted sub-process level:

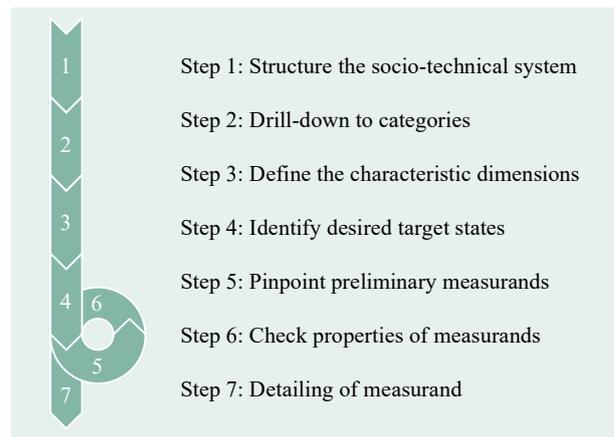


Figure 1: Framework Development Procedure

A basic theory to structure socio-technical systems is the fundamental MTO-model, which is already applied in similar cases such as the ‘Dortmund Management Model’ (Furmans and Wimmer, 2018). The MTO-model comprises socio-technical systems into human, technological and organizational subsystems.

Transferred, this framework is organized on the digitalization dimensions ‘Man’, ‘Technology’, and ‘Organization’. Drilling into detail these dimensions can be subdivided into different categories.

The authors develop these categories by considering specialized literature. Based on leadership and human resource basic theories, e.g. theory of motivation (Niermeyer, 2007), the characteristics of the dimension man can be subdivided into the categories skills, willingness and leadership (see Niermeyer, 2007; Helldorff and Kahle, 2014; Boxall and Purcell, 2011). The dimension technology is clustered on the basis of the reviewed literature of digital technologies into the categories data acquisition, connectivity and integration, data analytics and human-machine interaction (Lackes and Siepermann, 2018; Panetta, 2018; Bonaty, 2018). The third dimension of the framework relates to literature about organizational theory (Laux and Liermann, 2005; Hatch, 2018). Subsequently, the authors categorized the organizational digitalization characteristics into strategy, financials, management and collaboration factors. In summary, 18 characteristics of digitalization related to supply chain planning context are elaborated.

Considering the existing maturity models, there is already a scientifically acknowledged definition of digitalization characteristics, which are utilized. Thus, the characteristic dimensions for measuring digitalization are derived from these publications. To gain a broad set of characteristics, all four maturity models previously introduced are analyzed and compared in detail. Therefore, each single maturity item is listed and assigned to a consolidated categorization.

In the next step, desired target states for each of these characteristics is defined. These are general goals of digitalization derived from the target vision of digitalization and industry 4.0 delivered by the previously analyzed maturity models.

In the fifth step, the authors defined preliminary measurands. The definition of measurands has substantial impact on the measurement significance (Petri *et al.*, 2015). Hence, they have to be aligned to the property intended to be measured in reference to the given goal. To find adequate measurands, the target state for each characteristic is reviewed. In doing so, several requirements must be fulfilled. According to Franceschini *et al.*, 2019b to ensure objectivity measurands are designed on a cardinal scale: interval or when possible ratio respective absolute scales. Another requirement in line with the research gap is understanding the logical connection between classical supply chain performance measurement and digitalization measurement. This is solved the following: An analysis of existing supply chain performance measurands in the literature delivers implications for the definition of indicators (Gunasekaran *et al.*, 2001, Gunasekaran *et al.*, 2004, Chae, 2009 Gunasekaran and Kobu, 2007, Shepherd and Günter, 2011). A correlation analysis of these performance indicators and the identified digitalization targets is performed. The final list of supply chain planning performance measurands is juxtaposed with the characteristic target states. Subsequently, measurands are derived from the insights of the correlation matrix and appropriated to measure the desired target state. To constrain the assessment effort, the number of measurands should be kept low. Consequently, the authors follow the principle of Occam's razor.

Finally, the most important requirements for the design of performance measurement systems have to be checked. Hence, the authors proceed an iterative process of indicator definition and properties check. Based on (Franceschini *et al.*, 2019a), the properties of the measurands are evaluated on plausibility and consistency of indicators. Hereby, the authors consider the factors meaningfulness, reliability and practical feasibility. The remaining indicators are assessed by professionals from the case company, but more cases are needed to verify the validity. The measurands are either accepted or revised by consensus.

To prepare the framework for application, the authors perform a final detailing. Besides the name of the measurand, a unique ID, a description, a formula, the unit of measure as well as the possible range and the targeted trend of the measurand is specified in line to the KPI description in ISO 22400 (ISO International Organization for Standardization, 2014).

Framework

Summarizing, the developed framework consists of three dimensions which are based on the definition of digitalization as transformation process of socio-technical system: 'Man', 'Technology' and 'Organization'. These dimensions are subdivided into eleven categories, which are represented by 18 characteristics based on analysis of existing assessment models from the literature. These characteristics can be measured by 22 measurands for the case of supply chain planning or more specific operational demand planning respecting the case study. These measurands are described by several items such as a

name, an ID, a description, a scope, a formula, a unit of measure, a range and a desired trend. The concept is depicted in the Figure 2.

Application Procedure

The quantitative digitalization measurement framework (QDMF) can be applied to different scopes (see Figure 3). For the application in practice, the authors suggest the following application procedure:

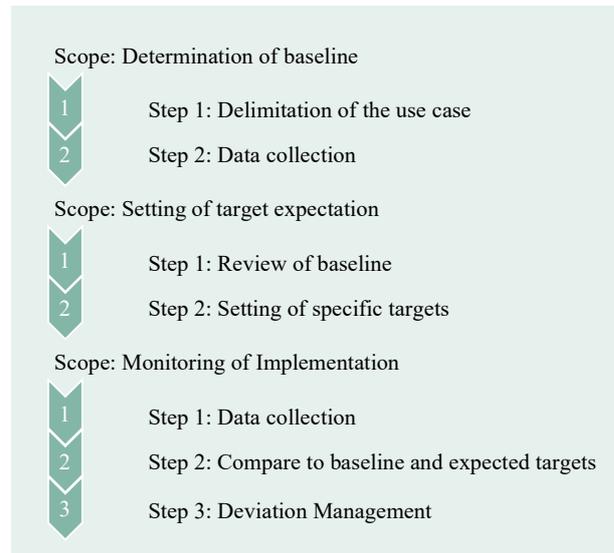


Figure 3: Scope and Application Procedure of QDMF

The QDMF can be used to determine the baseline for a digitalization project. This is the basis for potential benchmarking and the monitoring of the project progress. For that, the scope of the monitoring subject needs to be specified first. This requires the delimitation of the process which should be assessed and a description of the associated digitalization project. Afterwards, the collection of the relevant data for the assessment can be started. The data collection is executed by a survey method, as the digitalization measurement requires the knowledge of various experts and the acquisition of information that is usually not tracked yet. If the respective case is already situated in a highly digitalized environment, the surveys might be exchanged by data extraction from databases. For the moment, the authors propose structured interviews based on questionnaires with selected experts for the different dimensions: Whereas the assessment of the dimension 'Man' requires the knowledge of managers, project managers and HR experts, similar to the organizational dimension, the dimension 'Technology' also requires the knowledge of process and technical experts. This data collection procedure can be reiterated either regularly or at specific milestones during the implementation of a digital technology. To extract the information

MAN

Category	Characteristic	Measurand	Description	Unit
skills	skill / awareness level	skill transfer participation	participation rate in related skill transfer measures (e.g. training)	%
	skill acquisition	training offering	number of training per relevant skill (e.g. technology, process)	number
willingness	change management	change managers	number of dedicated change managers per project	number
	change adoption	change initiation	number of improvement proposals per employee	number
leadership	ruling / objectives	job adaption rate	rate of job descriptions adapted	%
	decision-making	project decision time	project decision time	months

TECHNOLOGY

Category	Characteristic	Measurand	Description	Unit
data acquisition	data collection	acquisition capacity	data volume collected (e.g. customer data, product master data) per time period	MB/week
connectivity and integration	information exchange	system integration	number of systems / applications used per process	number
	digital model building	data currency	update frequency of data (vs. forecasting frequency)	1/week
data analytics	(big) data analysis	data volume	data volume available in the related database	GB
		analysis capacity	data points analyzed per planning item	number
	analysis frequency	planning frequency (vs. volatility)	1/week	
	automation rate	rate of not manually adapted values	%	
decision support / analysis automation	decision support / analysis automation	machine forecast accuracy	forecast accuracy of the algorithm (vs. volatility)	%
		spreading width	interquartile range of the forecast accuracy	%
		information effort	number of screens accessed per process	screens/planning item
human-machine interaction	information provision	information effort	number of screens accessed per process	screens/planning item
	cooperation / collaboration of humans and machines	human-machine performance	human-machine system forecast accuracy (vs. volatility)	%

ORGANIZATION

Category	Characteristic	Measurand	Description	Unit
strategy	implementation status	target attainment	attainment of strategic digitalization targets in a project	%
financials	budget / investment	personnel deployment	number of full-time-equivalents spent per project	FTE
management	management level	management rate	frequency of digitalization project consideration by the management	1/month
collaboration	settings / principles	communication offering	rate of official communication channels offered per project	%
	cooperation / collaboration level	stakeholder involvement	number of stakeholders per project	number

Figure 2: Quantitative Digitalization Measurement Framework with Exemplary Measurands

from this assessment, the gathered data can be compared to previously assessed project states i.e. the baseline. For this the data for the project state is displayed in a structured manner and the absolute and relative changes of the measurands can be calculated. Furthermore, the data can be interpreted by the comparison to the initial target expectations, which can be defined at the beginning of the project. These expectations can be set by means of the QDMF through the review of the baseline, the benchmarking to similar projects and the experiences of experts. Nevertheless, to draw a conclusion of the results and manage deviations an estimation of an expert is recommended.

Case Validation

To validate the QDMF as a practical digitalization monitoring tool, the framework is applied on a specific use case in the field of supply chain planning at the Infineon Technologies AG. Infineon is one of the leading semiconductor manufacturers in Europe with production facilities all over the world. To manage its complex supply chains the company manages it following the generic SCOR-model (APICS, 2017). Within these SCOR-model the supply chain planning plays a central role. In this environment the authors decided for a digitalization project for the operational demand planning, which is important to balance demand and supply on a short-term basis. The investigated project comprises the implementation of a machine learning based algorithm for operational demand prediction. Therefore, available data bases are prepared to deliver sufficient data for the algorithm. The data is analyzed to identify the essential data for the demand prediction. An algorithm is set up to analyze this data using machine learning approaches to automatically generate a prediction of the future demand based on patterns from historical data. The project has four phases: development phase, pilot application phase, interims phase and productive phase. At date of the survey the project was at pilot phase, which means that a pilot algorithm is tested in particular departments.

Following the recommended application procedure, the authors measured all exemplary measurands (see figure 2) from the QDMF at the beginning of the project if data was available. As the assessment was performed in retrospect, the authors only surveyed specific target states, which were already determined for the project. In addition, the authors performed further interviews to get the available data for the current project state. The assessment and comparison of the measurands revealed the following results exemplarily:

In the dimension 'Man', the training offering and the skill transfer participation was measured. The assessment disclosed an increase of relevant trainings through the project, which means that skill transfer is sufficiently managed as all trainings for the affected process were already adapted or developed. The participation in these newly developed trainings was still at 0%, as the project was in an early project phase at date of assessment. Hence, this measurand is more important in later project phases. Apart from that, the change managers' evaluation of the

measurands showed that there were no dedicated change managers. Thus, the willingness to manage the change through the digitalized process was relatively low, yet. As professional change management is essential for a successful change process, it shows that there is still room for improvement in this project.

In the dimension 'Technology', especially the measurands data volume, automation rate as well as the analysis capacity and the analysis frequency were targeted. As databases were prepared for the automation algorithm, the data volume increased by 5%. Furthermore, the analysis capacity increased by 1000% as the algorithm considers more data points than the prior standard process. In addition, the analysis frequency could be improved by 300% through the lowered manual effort. These measurands show the effect of the project from a technological point of view. Whereas these measurands show the details, the main control parameter was the automation rate. The project targeted to reach an automation rate of 95% for the considered planning step. But the assessment showed only 77% automation rate could be accomplished within the current pilot algorithm, which means development work has to be continued to improve it for the desired target.

In the dimension 'Organization', for instance, the target attainment as well as the stakeholder involvement was measured. As only very little strategic targets were defined, the measurand target attainment is not fully conclusive, but the assessment showed that 85% of the strategic goals were already fulfilled. The number of stakeholder involved in the project increased by 100% during the project, showing the gained interest in general favored by the preliminary results.

The application of the QDMF to the use case shows, the framework is applicable for its design purpose in general. In particular, the results verify that the structure of the examined characteristics delivers comprehensive insights into different aspects of digitalization. Consequently, additional insights for effective management of digitalization can be given. For example, the assessment showed that there is a need for the establishment of a professional change management.

With these gained insights of quantitative digitalization measurement with objective performance, measurands underpin the subjective evaluation of the interviewed experts. Weaknesses within the project implementation and recommendations for future activities could be identified on a managerial as well on an operational-technical level. The monitoring of the technology dimension provides detailed indications on important requirements for future projects and the expectable effect of a technology in dedicated aspects of a socio-technical system.

Regarding the application procedure, the QDMF is largely appropriate to the selected case. Nevertheless, there are some hurdles to be taken to reach the goal of a general, applicable, quantitative digitalization monitoring tool.

In the case, several measurands are completely new and the required data is not tracked yet the acquisition takes time and effort, limiting the data availability. However, it

already points out white spots in the current monitoring: In the examination, dimensions differ a lot in terms of available data. Whereas the assessment of technological factors is very common within digitalization projects, organizational and people-oriented factors are widely not established yet. Crosschecks with other ongoing projects highlight that each use case has specifics, concluding that an interpretation layer for adaption of the QDMF is necessary. For instance, each type of project has individual target areas and therefore different methods and effects. Thus, it is sometimes not necessary to monitor all measurands within all projects. But it is important to consider all project aspects, when setting the targets and sub-targets of a digitalization project. Consequently, for the general application the authors recommend to review and pre-select the characteristics, which should be targeted within the project and the monitoring scope. In this, not only technological aspects should be selected, but also organizational and people related aspects. This brings along the opportunity to set specific measurable targets for each characteristic based on the proposed measurands. Making it short, the delimitation of the use case and the scope are crucial. Another hurdle is the limited explanatory power of the quantitative measurands. The application shows the quantitative digitalization measurement requires additional information to set measurands into context. The reference information can be delivered through several measures. On the one hand, the setting of targets for the specific measurand can be the point of reference. On the other hand, the necessary information can be revealed through the comparison with other projects. Besides that, the results can be interpreted through the contextual information from experts.

The third constraint of the approach determines the constrained application opportunity within the scope of the study. Currently, the framework is only be applied to one use case. It represents a typical digitalization project within the supply chain planning context. Hence, a first indication about the general validity of the concept is evaluated. Nevertheless, the validity of all particular measurands in all situations is finite. To verify the applicability and comparability, the research has to be expanded to more cases. Thereby, not only classical technology-focused projects such as the actual use case should be investigated, but also organizational projects and projects targeting at the people perspective. This diversity of projects would complete the assessment of the validity of the framework and its measurands from all perspectives.

Overall, the use case application reveals that the provided measurands can only represent a proposal. There is still need to review the measurands for the applicability to the specific use case. For example, the assessment of the capacity planning might require measuring other outputs, i.e. capacity utilization, than the demand planning. Therefore, the integration of an interpretation layer states a potential enhancement of the QDMF. Nevertheless, the current framework gives a guideline for other applications in the field of supply chain planning. Additionally, the findings demonstrate the complexity to conceptualize

a procedure to develop a general quantification criterion, which is also applicable for very specific use cases. Concluding, the research states the necessary groundwork for future applications and enhancements of the framework and delivers no final set of valid digitalization monitoring metrics.

CONCLUSION AND OUTLOOK

The study aimed at analyzing, how digitalization can be quantified within the context of supply chain planning. Therefore, a quantitative digitalization measurement framework (QDMF) was developed and validated on a use case study on demand planning in the semiconductor industry. The approach states a contribution to bridge the research gap between the constrained applicability of existing supply chain performance metrics and digitalization assessments. In addition, the limited objectivity of digitalization assessment models in the current literature was tackled by underpinning the personal view of digitalization with quantitative measurands. Although the framework still has its limitations, an initial guideline for quantitative digitalization measurement can be given. As result, the study delivers the groundwork for more extensive investigations on this topic and shows the general feasibility of the concept of quantifying digitalization. Besides, the framework proves its capability to monitor the impact of digitalization projects on the categorical level. The application of the QDMF to a machine learning project for demand planning demonstrated, the effect of the technological implementation can be captured through the framework within various digitalization aspects. The comprehensiveness of the framework allows not only tracking the direct effect on the technological side, but also the accompanying personnel and organizational impact. Thus, the general effect and experiences regarding a digital technology can be recorded. Consequently, further applications will support the management in the definition of adequate digitalization targets and monitoring their attainment. As a consequence, digitalization can be managed more effectively.

One possibility offers the expansion of the analysis of the assessment result expanded by the valuation of target attainments and the benchmarking of different digitalization projects. Hereby, the meaningfulness of the quantitative measurands is expected to increase significantly. Besides that, adaptations for better practicability such as a reasonable preselection of assessed indicators for different types of digitalization projects might be a benefit, where an interpretation layer might be one solution. Another direction is the validation of the concept by the application on more projects even in other industries.

Coming to an end, all findings result in the conclusion that through the research within this study, progress is made on the target of showing how digitalization can be measured quantitatively. Also, the effect of the implementation of digital technologies on the different aspects of digitalization could be measured. But there are several research options for enhancement in the direction of a universal and practicable measurement framework with high validity.

REFERENCES

- APICS (2017), *Supply Chain Operations Reference Model: Version 12.0*, Chicago.
- Beadley, A. (2014), “The Connected Enterprise Maturity Model”, available at: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/cie-wp002_-en-p.pdf (accessed 6 November 2019).
- Berghaus, S. and Back, A. (2016), “Gestaltungsbereiche der Digitalen Transformation von Unternehmen: Entwicklung eines Reifegradmodells”, *Die Unternehmung*, Vol. 70 No. 2, pp. 98–123.
- BMW (2019), “Den digitalen Wandel gestalten”, available at: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/digitalisierung.html> (accessed 1 October 2019).
- Bogner, E., Voelklein, T., Schroedel, O. and Franke, J. (2016), “Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany”, *Procedia CIRP*, Vol. 57, pp. 14–19.
- Böhnke, N.-C., Pointner, A. and Ramsauer, C. (2017), “Supply-Chain-Strategien im Zeitalter von VUCA”, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 112 No. 9, pp. 555–558.
- Bonaty, T. (2018), “Tech Trend Radar 2018”, available at: https://www.munichre.com/content/dam/munichre/global/content-pieces/documents/MunichRE-IT-Technology-Radar-2018_free_version.pdf (accessed 07/09/2019).
- Bourne, M., Mills, J., Wilcox, M., Neely, A. and Platts, K. (2000), “Designing, implementing and updating performance measurement systems”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 No. 7, pp. 754–771.
- Boxall, P.F. and Purcell, J. (2011), *Strategy and human resource management, Management, work, and organisations*, 3rd ed., Palgrave Macmillan, Basingstoke.
- Canetta, L., Barni, A. and Montini, E. (2018), “Development of a Digitalization Maturity Model for the Manufacturing Sector”, in *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Stuttgart, 17.06.2018 - 20.06.2018*, IEEE, pp. 1–7.
- Carolis, A. de, Macchi, M., Negri, E. and Terzi, S. (2017), “A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies”, in Lödding, H., Riedel, R., Thoben, K.-D., Cieminski, G. von and Kiritsis, D. (Eds.), *Advances in Production Management Systems*, Vol. 513, Springer International Publishing, Cham, pp. 13–20.
- Chae, B. (2009), “Developing key performance indicators for supply chain: an industry perspective”, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 14 No. 6, pp. 422–428.
- Colli, M., Madsen, O., Berger, U., Møller, C., Wæhrens, B.V. and Bockholt, M. (2018), “Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51 No. 11, pp. 1347–1352.
- Deming, W.E. (2000), *Out of the crisis*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Dennis, M., Ramaswamy, C., Ameen, M.N. and Jayaram, V. (2017), “Asset Performance Management Maturity Model. Strategic Roadmap to Digital Manufacturing”, available at: https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/08/asset_performance_management_maturity_model_paper_web_version.pdf (accessed 6 November 2019).
- Franceschini, F., Galetto, M. and Maisano, D. (2019a), “Designing a Performance Measurement System”, in Franceschini, F., Galetto, M. and Maisano, D. (Eds.), *Designing Performance Measurement Systems, Management for Professionals*, Vol. 1, Springer International Publishing, Cham, pp. 133–205.
- Franceschini, F., Galetto, M. and Maisano, D. (Eds.) (2019b), *Designing Performance Measurement Systems, Management for Professionals*, Springer International Publishing, Cham.
- Furmans, K. and Wimmer, T. (Eds.) (2018), *Understanding Future Logistics - Models, Applications, Insights*, Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Bremen.
- Ganzarain, J. and Errasti, N. (2016), “Three stage maturity model in SME’s toward industry 4.0”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 9 No. 5, p. 1119.
- Geissbauer, R., Vedso, J. and Schrauf, S. (2016), “Industry 4.0: Building the digital enterprise”, available at: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf> (accessed 6 November 2019).
- Gill, M. and VanBoskirk, S. (2016), “The Digital Maturity Model 4.0”, available at: <https://forrester.nitro-digital.com/pdf/Forrester-s%20Digital%20Maturity%20Model%204.0.pdf> (accessed 6 November 2019).
- Gökalp, E., Şener, U. and Eren, P.E. (2017), “Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM”, in Mas, A., Mesquida, A., O’Connor, R.V., Rout, T. and Dorling, A. (Eds.), *Software Process Improvement and Capability Determination, Communications in Computer and Information Science*, Vol. 770, Springer International Publishing, Cham, pp. 128–142.
- Gruda, K., Jakubów, M. and Szyk, R. (2016), “Digital Index. Studa results”, available at: <https://www.rolandberger.com/de/Publications/Digital-index.html> (accessed 6 November 2019).
- Gunasekaran, A. and Kobu, B. (2007), “Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: a review of recent literature (1995–2004) for research and applications”, *International Journal of Production Research*, Vol. 45 No. 12, pp. 2819–2840.

- Gunasekaran, A., Patel, C. and McGaughey, R.E. (2004), “A framework for supply chain performance measurement”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 87 No. 3, pp. 333–347.
- Gunasekaran, A., Patel, C. and Tirtiroglu, E. (2001), “Performance measures and metrics in a supply chain environment”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 21 1/2, pp. 71–87.
- Hatch, M.J. (2018), *Organization theory: Modern, symbolic, and postmodern perspectives*, Fourth edition, Oxford University Press, Oxford.
- Helldorff, S. and Kahle, E. (2014), “Mehr Können–mehr Wollen–mehr Dürfen. Die Anwendung des Kompetenznetzes auf die Kompetenzentwicklung in Unternehmen”, *Zeitschrift Führung und Organisation*, Vol. 83 No. 03, pp. 153–161.
- Innovationszentrum für Industrie 4.0 (2019), “Pathfinder i4.0”, available at: <https://www.i40.de/beratung/pathfinder-i40> (accessed 6 November 2019).
- ISO International Organization for Standardization (2014), *Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions* ISO 22400-2, Switzerland, available at: <https://www.iso.org/standard/54497.html> (accessed 23 September 2019).
- Jodlbauer, H. and Schagerl, M. (2016), “Reifegradmodell industrie 4.0 - Ein vorgehensmodell zur identifikation von industrie 4.0 potentialen”, *Informatik 2016*, pp. 1473–1487.
- Klötzer, C. and Pflaum, A. (Eds.) (2017), *Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry's Supply Chain*.
- Kotarba, M. (2017), “Measuring Digitalization – Key Metrics”, *Foundations of Management*, Vol. 9 No. 1, pp. 123–138.
- Lackes, R. and Siepermann, M. (2018), “Gabler Wirtschaftslexikon”, available at: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/datenverarbeitung-28581/version-252209> (accessed 16 July 2019).
- Lanza, G., Nyhuis, P., Ansari, S.M., Kuprat, T. and Liebrecht, C. (2016), “Befähigungs- und Einführungsstrategien für Industrie 4.0”, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 111 1-2, pp. 76–79.
- Laux, H. and Liermann, F. (2005), *Grundlagen der Organisation: Die Steuerung von Entscheidungen als Grundproblem der Betriebswirtschaftslehre ; mit 13 Tabellen*, Springer-Lehrbuch, 6. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Leino, S.-P., Kuusisto, O., Paasi, J. and Tihinen, M. (2017), “VTT Model of Digimaturity”, in Paasi, J. (Ed.), *Towards a new era in manufacturing: Final report of VTT's For Industry spearhead programme*, pp. 41–46.
- Leyh, C., Schäffer, T., Bley, K. and Forstehäusler, S. (2016), “SIMMI 4.0 – A Maturity Model for Classifying the Enterprise-wide IT and Software Landscape Focusing on Industry 4.0”, in *Proceedings of the 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 11.09.2016 - 14.09.2016*, IEEE, pp. 1297–1302.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E. and Schröter, M. (2015), *INDUSTRIE 4.0 READINESS*, Aachen, Cologne.
- Loebbecke, C. (2006), “Digitalisierung — Technologien und Unternehmensstrategien”, in Scholz, C. (Ed.), *Handbuch Medienmanagement*, Vol. 29, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 357–373.
- Lohman, C., Fortuin, L. and Wouters, M. (2004), “Designing a performance measurement system: A case study”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156 No. 2, pp. 267–286.
- McAfee, A. and Daugherty, P. (2017), “The Business of Artificial Intelligence”, *Havard Business Review*, pp. 1–20.
- Neely, A., Gregory, M. and Platts, K. (1995), “Performance measurement system design”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15 No. 4, pp. 80–116.
- Neely, A., Richards, H., Mills, J., Platts, K. and Bourne, M. (1997), “Designing performance measures: a structured approach”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17 No. 11, pp. 1131–1152.
- Niermeyer, R. (2007), *Motivation: Instrumente zur Führung und Verführung*, Kienbaum, 2. Aufl., Haufe-Mediengruppe, Freiburg, Br., Berlin, München i.e. Planegg.
- Panetta, K. (2018), “5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018”, available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/> (accessed 9 July 2019).
- Payne, T. (2016), “Hype Cycle for Supply Chain Planning, 2016”, available at: <https://www.gartner.com/en/documents/3508818> (accessed 8 May 2019).
- Petri, D., Mari, L. and Carbone, P. (2015), “A Structured Methodology for Measurement Development”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64 No. 9, pp. 2367–2379.
- Schagerl, M., Jodlbauer, H. and Brunner, M. (2016), “Reifegradmodell Industrie 4.0–Der Weg zur digitalen Transformation”, *Productivity Management*, Vol. 21 No. 4, pp. 40–42.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Hompel, M. ten and Wahlster, W. (Eds.) (2017), *Industrie 4.0 Maturity Index: Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*, Acatech Studie, Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- Schumacher, A., Erol, S. and Sihn, W. (2016), “A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness

- and Maturity of Manufacturing Enterprises”, *Procedia CIRP*, Vol. 52, pp. 161–166.
- Schumacher, A., Nemeth, T. and Sihn, W. (2019), “Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises”, *Procedia CIRP*, Vol. 79, pp. 409–414.
- Shepherd, C. and Günter, H. (2011), “Measuring Supply Chain Performance: Current Research and Future Directions”, in Fransoo, J.C., Waefler, T. and Wilson, J.R. (Eds.), *Behavioral Operations in Planning and Scheduling*, Vol. 10, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 105–121.
- Weber, C., Königsberger, J., Kassner, L. and Mitschang, B. (2017), “M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing”, *Procedia CIRP*, Vol. 63, pp. 173–178.
- Yoo, Y., Lyytinen, K.J., Boland, R.J. and Berente, N. (2010), “The Next Wave of Digital Innovation: Opportunities and Challenges: A Report on the Research Workshop 'Digital Challenges in Innovation Research'”, *SSRN Electronic Journal*.
- Zeller, V., Hocken, C. and Stich, V. (2018), “acatech Industrie 4.0 Maturity Index – A Multidimensional Maturity Model”, in Moon, I., Lee, G.M., Park, J., Kiritsis, D. and Cieminski, G. von (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 536, Springer International Publishing, Cham, pp. 105–113.

AUTHOR BIOGRAPHIES

TIM LAUER is responsible for R&D strategy processes at the Infineon Technologies AG. In addition, he conducts research on supply chain innovations focusing on digitalization and artificial intelligence. Thus, he writes his PhD in the field of human-AI system optimization at the Technical University of Dortmund.

MAXIMILIAN WOLF is an alumnus of the master program ‘Engineering and Management’ at the Munich University of Applied Sciences. He conducted research on supply chain digitalization in cooperation with the Infineon Technologies AG, which was part of his master thesis and the base for this publication.

JÖRG PUCHAN is Professor for Applied Computer Science at Munich University of Applied Sciences, Munich School of Engineering and Management. His main academic interests both in research and teaching are in the field of IT-management and business optimization.

CHANCEN UND HINDERUNGSGRÜNDE EINER URBANEN MOBILITÄTSPLATTFORM AUS ANWENDERSICHT

Birte Malzahn
Studiengang
Wirtschaftsinformatik
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
Treskowallee 8
10318 Berlin
birte.malzahn@htw-berlin.de

Peter Mathias Konhäusner
Studiengang
Wirtschaftsinformatik
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
Treskowallee 8
10318 Berlin
konhaeu@htw-berlin.de

Ngoc Huyen Dao
Studiengang
Wirtschaftsinformatik
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
Treskowallee 8
10318 Berlin

KEYWORDS

Integrierte Mobilitätsplattform, Mobility-as-a-Service, urbane Mobilität

ABSTRACT

In diesem Beitrag wird untersucht, welche Chancen und Hinderungsgründe der Nutzung einer urbanen integrierten Mobilitätsplattform aus Sicht von Anwendern bestehen. Hierfür wurde eine qualitative Studie in Form von Tiefeninterviews durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Vorteile einer integrierten Mobilitätsplattform vor allem in einer, aus Sicht der Nutzer, effizienten Informationsbeschaffung hinsichtlich verfügbarer Verkehrsmittel sowie deren Buchung gesehen werden. Wichtigste Hemmschwelle stellt die Zusammenstellung des Angebots an Mobilitätsdienstleistungen auf der integrierten Mobilitätsplattform dar. Wird dieses als unvollständig angesehen, beispielsweise aufgrund von nicht integrierter Intermodalität oder fehlenden, vom Anwender präferierten Anbietern, ist die Vorteilhaftigkeit der Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform nicht gegeben.

EINLEITUNG

Die zunehmende Digitalisierung führt auch im Bereich der Mobilität zu neuartigen Geschäftsmodellen. Diese haben zum Ziel, die Bedürfnisse von Kunden nach flexiblen und individuellen Mobilitätslösungen zu erfüllen (vgl. Adam und Meyer 2015). Besonders wichtig sind diese Entwicklungen im urbanen Raum, da mit steigenden Kosten für das eigene Auto, weniger verfügbaren Parkflächen und zunehmender Verkehrsbelastung flexible Alternativen zum eigenen Fahrzeug immer mehr an Bedeutung gewinnen (vgl. Adam und Meyer 2015). Erfolgreiche Geschäftsmodelle im Mobilitätssektor werden deshalb darauf abzielen, den Kunden mithilfe digitaler Technologien ganzheitliche, maßgeschneiderte Mobilitätsangebote zu bieten und zu einer effizienteren Nutzung der Verkehrsinfrastrukturen beizutragen (Scherer et al. 2019).

Integrierte Mobilitätsplattformen bündeln den Zugang zu verschiedenen Mobilitätsangeboten wie öffentlichen Verkehrsmitteln oder Car-Sharing in einer integrierten Anwendung. Die Angebote sind über eine singuläre App zugänglich und können über einen einzigen Account genutzt werden (vgl. Spulber und Dennis 2016).

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Ergebnisse einer qualitativen Studie vorgestellt, die Chancen und Hinderungsgründe integrierter Mobilitätsplattformen untersucht hat.

GRUNDLAGEN

Mobilitätsangebote und -dienste

Ein Mobilitätsangebot besteht aus einer Mobilitätsdienstleistung sowie einem zugehörigen Preis (vgl. Terwelp 2019). Mobilitätsdienstleistungen werden zur Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen durchgeführt (vgl. Hoffmann 2009).

Mobilitätsdienstleistungen sind im betrachteten Kontext der öffentliche Personennahverkehr, jedoch auch marktgetriebene Mobilitätsangebote (vgl. Terwelp 2019).

Marktgetrieben sind zum einen Sharing-Angebote wie Car-Sharing, Bike-Sharing sowie Motorroller- und Tretroller-Sharing. Sharing-Angebote ermöglichen den Kunden die Nutzung von verschiedenen Fortbewegungsmitteln, ohne dass diese selbst gekauft und unterhalten werden müssen. Viele der Fahrzeuge stehen auch mit elektrischem Antrieb zur Verfügung. Der Angebotspreis berechnet sich aus der jeweiligen Nutzungsdauer und / oder der zurückgelegten Distanz (vgl. Witzke 2015). Insbesondere beim Car-Sharing können die herkömmliche stationsgebundene und die stationsunabhängige Form unterschieden werden (vgl. Schmöller et al. 2019). Bike-Sharing erfährt durch die Verbreitung stationsloser Systeme eine dynamische Entwicklung in den vergangenen Jahren (vgl. Agora Verkehrswende 2019). Motorroller sind für Distanzen zwischen drei und fünfzehn Kilometern gut geeignet. Im Sharing-Bereich haben die meisten Motorroller einen elektrischen Antrieb (vgl. Nefzger 2019). E-Tretroller dürfen in Deutschland seit Juni 2019 genutzt werden. Sie werden als besonders geeignet angesehen,

um die „letzte Meile“ bspw. von einer Haltestelle zum Zielort oder umgekehrt zu bewältigen (vgl. Hamann et al. 2019).

Weitere Arten von Mobilitätsdienstleistungen stellen Fahrdienste wie Taxis, Vermittlungsdienste für Personenbeförderung wie Uber sowie Ride-Pooling dar (vgl. Spulber und Dennis 2016; vgl. Hoffmann 2009). Über die digitale Uber-Plattform werden Anbieter von Fahrdiensten mit entsprechenden Nachfragern in Verbindung gebracht (vgl. Mittendorf 2017). In Deutschland müssen alle Fahrer unter anderem Inhaber eines Personenbeförderungsscheins sein (vgl. Uber Deutschland 2020). Beim Ride-Pooling werden Routen nach Fahrtwunschübermittlung an den Anbieter dynamisch generiert. Veränderungen der Abfahrts- und Ankunftszeit sind durch flexible Routenanpassungen beim Teilen von Fahrten mit weiteren Fahrgästen möglich. Eine Besonderheit des Ride-Poolings ist der geringere Preis für jeden Einzelnen, da die gesamte Fahrt durch mehrere Personen unternommen wird (vgl. König und Grippenkoven 2019). Ein Beispiel für einen Ride-Pooling-Dienst ist Clever-Shuttle, der in verschiedenen deutschen Großstädten verfügbar ist (vgl. GHT Mobility GmbH 2020). In Berlin wird zudem im Rahmen eines Pilotprojektes seit dem Jahr 2018 der Ride-Pooling-Dienst Berlkönig von den Berliner Verkehrsbetrieben in Kooperation mit ViaVan angeboten (vgl. BVG 2020a).

Terwelp (2019) unterscheidet als so genannte *Mobilitätsmodi* die Nutzung von Mobilitätsdienstleistungen, aber auch die Möglichkeiten der Fortbewegung zu Fuß, mit dem Fahrrad oder mit einem individuellen, motorisierten Fahrzeug (vgl. Terwelp 2019).

Multimodale Mobilität bedeutet, dass für einen Weg mehrere alternative Verkehrsmittel zur Auswahl stehen und genutzt werden können. Für den gesamten Weg wird jedoch nur eines der zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel wie z. B. öffentlicher Nahverkehr oder Carsharing genutzt (vgl. Hoffmann 2009).

Intermodale Mobilität bezeichnet die Kombination mehrerer Mobilitätsmodi innerhalb einer Reisetätigkeit (vgl. Terwelp 2019). Ein Beispiel für intermodale Mobilität ist z. B. eine Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln in Kombination mit der Nutzung eines Fahrrads (vgl. Schuster und Waidelich 2019). Bei dieser Definition wird der Modus „zu Fuß“ jedoch nicht berücksichtigt, da dieser bei jeder Reisekette vorliegt (vgl. Terwelp 2019).

Obwohl Autos noch immer das dominante Verkehrsmittel im individuellen Mobilitätsverhalten darstellen, nimmt, verglichen mit früheren Untersuchungen, die Nutzung alternativer Verkehrsmittel zu (vgl. Schuster und Waidelich 2019). Um Staus und Luftverschmutzung zu reduzieren sowie die Raumnutzung v. a. in wachsenden Metropolen zu optimieren, hat auch der öffentliche Sektor ein Interesse an der Reduktion des (individuellen) Autoverkehrs (vgl. Schuster und Waidelich 2019).

Digitale Plattformen

Eine Plattform ist ein Geschäftsmodell, das darauf basiert, wertstiftende Interaktionen zwischen externen Anbietern und Konsumenten zu ermöglichen (vgl. Parker et

al. 2016). Auf *digitalen* Plattformen vereinfacht das Medium Internet den Austausch von Gütern und Dienstleistungen (vgl. Hamari et al. 2016). Digitale Plattform-Ökosysteme verfügen über eine Struktur mit vier Akteuren: Die Eigentümer der Plattform, die rechtliche Inhaber der Software sind; die Betreiber der Plattform, welche die Schnittstelle zum Konsumenten gestalten; die Anbieter von Gütern und Dienstleistungen auf der Plattform sowie die Konsumenten der entsprechenden Angebote (vgl. van Alstyne et al. 2016; vgl. Malzahn et al. 2018).

Die Digitalisierung fördert unter anderem die Entwicklung digitaler *Mobilitätsplattformen* (vgl. Becker und Link 2019). Eine Mobilitätsplattform stellt einen elektronischen Marktplatz für Mobilitätsangebote dar. Die Plattform bietet die technische Grundlage, über die Anbieter ihre Mobilitätsdienstleistungen den Kunden zugänglich machen können (vgl. Terwelp 2019).

Oftmals ist es auf digitalen Plattformen möglich, dass Konsumenten zu Anbietern werden, was wiederum die Attraktivität dieser Geschäftsmodelle steigert (vgl. van Alstyne et al. 2016). Beispiele hierfür im Mobilitätssektor sind das Anbieten privater Fahrzeuge über Getaround (vgl. Pawletzki 2019) sowie das Angebot von Fahrdienstleistungen über Uber (vgl. Mittendorf 2017) oder BlaBlaCar (vgl. Mittendorf 2018).

Elektronische Märkte zeichnen sich u. a. durch nahezu vollständige Informationen über Produkte und Unternehmen und damit eine hohe Markttransparenz aus. Ineffiziente Angebote werden sichtbar und können schwer am Markt bestehen (vgl. Clement und Schreiber 2016). Somit ist einer der Vorteile von digitalen Plattformen die Senkung der Transaktionskosten der Informationsbeschaffung für Anbieter und Nachfrager (vgl. Clement und Schreiber 2016). Plattformen können somit einen Beitrag zur Markttransparenz und zur Reduktion von Informationsasymmetrien leisten. Durch einheitliche Schnittstellen werden beispielsweise die Kontaktaufnahme, der Vertragsabschluss sowie ggf. die Reklamation erleichtert (vgl. Clement und Schreiber 2016).

Integrierte Mobilitätsplattformen

Eine *integrierte Mobilitätsplattform* stellt dem Kunden auf einer geplanten Route *verschiedene* Verkehrsmittel durch eine zentrale Buchung bereit und ermöglicht die Bezahlung. Dem Kunden werden anschließend die entsprechenden Tickets oder eine Zugangsmöglichkeit für die einzelnen Verkehrsmittel zur Verfügung gestellt (vgl. Becker und Link 2019).

Zur Entscheidungsunterstützung können Nutzer in der App Informationen über mögliche Verkehrsmittel sowie deren Fahrdauer und Kosten abrufen und vergleichen. Denkbar ist auch eine Auswahl der Verkehrsmittel anhand von aktuellen, externen Einflussfaktoren wie dem Wetter, der Verkehrslage, Verspätungen des öffentlichen Nahverkehrs oder anhand einer Anzeige des CO₂-Ausstoßes der Alternativen (vgl. Adam und Meyer 2015). Für das Angebot der Lösungen müssen verschiedene Daten berücksichtigt werden, beispielsweise der

Standort des Nutzers, der Zeitplan des öffentlichen Verkehrs oder Informationen zur aktuellen Verkehrssituation (Pflügler et al. 2018).

Einzelanbieter von Mobilitätsdienstleistungen können über Schnittstellen an die Plattform angebunden werden und so ihr Angebot als Teil des Gesamtangebots der Plattform einbringen (vgl. Adam und Meyer 2015). Um ein attraktives Angebot für eine möglichst breite Zielgruppe bereitstellen zu können, ist der Plattformbetreiber auf eine ausreichend hohe Anzahl an verfügbaren Einzelanbietern angewiesen (vgl. Adam und Meyer 2015).

Im Kontext integrierter Mobilitätsplattformen wird der Begriff Mobility-as-a-Service (MaaS) verwendet (vgl. Becker und Link 2019). MaaS-Lösungen ermöglichen den flexiblen Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdienstleistungen und können so den Besitz privater Fahrzeuge obsolet machen (vgl. Jittrapirom et al. 2017; vgl. Barbu et al. 2018).

Integrierte Mobilitätsplattformen wurden bereits für verschiedene Großstädte entwickelt. Als Beispiel kann die Plattform Whim dienen, die derzeit in Helsinki, Wien, Birmingham und Antwerpen verfügbar ist (vgl. Shieber 2019). In Stockholm ist die Plattform UbiGo nutzbar (vgl. Frost 2019). Die integrierte Mobilitätsplattform Jelbi ist in Berlin seit dem Jahr 2019 in Betrieb (vgl. Weiß 2019) und wird im Folgenden exemplarisch näher beleuchtet.

Zur Nutzung des Jelbi-Angebotes ist zunächst eine Registrierung und ggfs. eine Validierung des Identitätsnachweises und Führerscheins notwendig. Anschließend können verschiedene Verkehrsmittel über die Jelbi-App gebucht werden. Derzeit sind neben dem öffentlichen Nahverkehr verschiedene Sharing-Angebote über die App nutzbar: Stationsunabhängiges Car-Sharing über MILES, Motorroller-Sharing über emmy, Bike-Sharing über nextbike, E-Tretroller-Sharing über TIER sowie Ride-Pooling über BerlKönig (vgl. BVG 2020b).

Nach Eingabe der Reisedaten in der App werden dem Nutzer verschiedene Verbindungsmöglichkeiten sowie deren Preis und Dauer angezeigt (s. Abbildung 1). Sind die notwendigen Voraussetzungen erfüllt, können über die App Fahrzeuge reserviert und zur Nutzung entsperrt werden (s. Abbildung 2), ein BerlKönig-Fahrer angefordert oder Tickets für den öffentlichen Nahverkehr erworben werden (s. Abbildung 3).

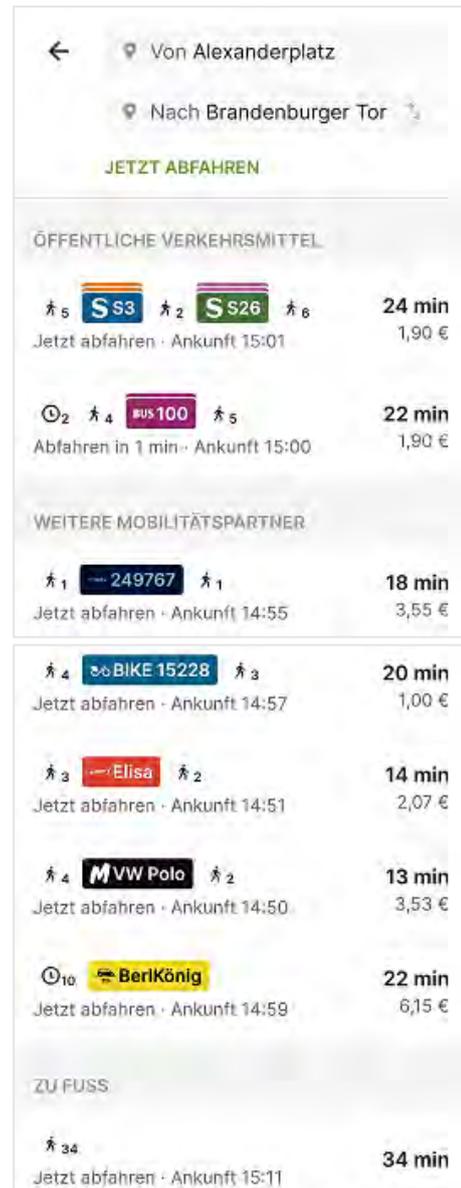


Abbildung 1 Reiseauskunft über die Jelbi-App (Screenshot)

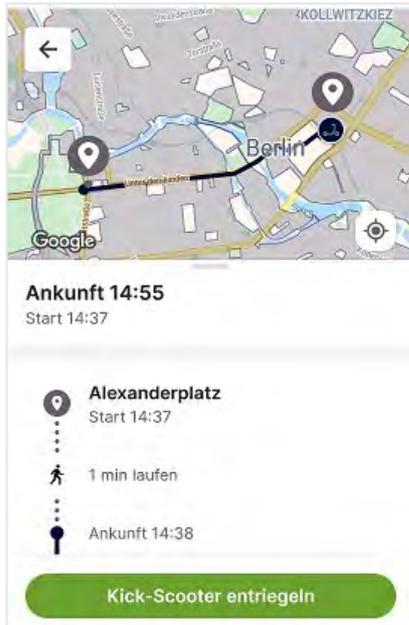


Abbildung 2 Fahrzeugnutzung über die Jelbi-App (Screenshot)



Abbildung 3 Kauf von BVG-Tickets über die Jelbi-App (Screenshot)

Intermodale Verbindungen, d. h. die Kombination verschiedener Mobilitätsdienstleistungen innerhalb einer Wegstrecke, werden derzeit jedoch noch nicht von der App bzw. der Plattform berechnet und unterstützt. So werden verschiedene Möglichkeiten für die gesamte Strecke vorgeschlagen, eine Kombination aus den Fortbewegungsmitteln wird nicht angezeigt (beispielsweise E-Tretroller und öffentliche Verkehrsmittel). Meistens wird eine Kombination aus Fußweg und Verkehrsmittel offeriert.

FORSCHUNGSSTAND

Es existieren bereits mehrere Studien, die sich mit Einflussfaktoren auf die Nutzung digitaler Mobilitätsplattformen beschäftigt haben.

So wurden beispielsweise Einflussfaktoren auf die Nutzung von Uber (Barbu et al. 2018; Lee et al. 2018; Min et al. 2018) oder BlaBlaCar (Mittendorf 2018) in Studien überprüft. Krämer und Bongaerts (2019) untersuchten Motive der Nutzung von Car-, Bike- und Ride-Sharing-Angeboten.

Scheuerle (2017) untersuchte in Fallstudien u. a. Kundenvorteile der Nutzung integrierter Mobilitätsplattformen. Lund et al. (2017) stellen auf Basis einer Literaturrecherche u. a. Motive der Konsumenten bezüglich der Nutzung integrierter Mobilitätsplattformen zusammen.

EMPIRISCHE DATENERHEBUNG

Da Forschungsergebnisse hinsichtlich der Nutzung integrierter Mobilitätsplattformen noch nicht umfangreich vorliegen, wurde ein qualitativer Forschungsansatz gewählt. Diese Forschungsmethodik erlaubt es, ein Phänomen zu erkunden und zu verstehen, anstatt (mitunter quantitativer) Zusammenhänge zu beweisen (vgl. Nuttavuthisit 2019).

Im Dezember 2019 und Januar 2020 wurden qualitative Tiefeninterviews mit neun Personen geführt (vgl. Dao 2020). Die Interviewpersonen wurden nicht zufällig, sondern gezielt danach ausgewählt, ob sie viel im urbanen Raum unterwegs sind und bereits Erfahrungen mit verschiedenen Mobilitätslösungen gesammelt haben. Aufrufe zur Beteiligung erfolgten u. a. über Facebook und Instagram.

Die Befragung erfolgte anhand eines Interviewleitfadens entweder in einem persönlichen Gespräch oder mittels eines Video-Telefonats über Skype. Der Interviewleitfaden umfasste Fragen zu folgenden Themen:

- Anzahl der Tage pro Woche, an denen die Interviewpersonen durchschnittlich im urbanen Raum unterwegs sind
- genutzte Fortbewegungsmöglichkeiten
- genutzte Mobilitäts-Apps sowie deren Nutzungshäufigkeit und Auswahlkriterien
- Beurteilung der Mobilitätsplattform Jelbi (nach einer etwaigen Vorstellung der Plattform, falls diese noch nicht bekannt gewesen war)
- Anforderungen, Schwierigkeiten und Chancen bei der Nutzung einer Mobilitätsplattform
- demographische Angaben zur Person

Die Interviews wurden aufgezeichnet und dauerten durchschnittlich 38 Minuten.

Es wurden vier weibliche und fünf männliche Personen befragt. Der Altersdurchschnitt lag bei 24,5 Jahren.

Die durchgeführten Interviews wurden transkribiert. Dabei wurden Versprecher und Füllwörter entfernt.

Die so erhaltenen Daten wurden einer Inhaltsanalyse nach Mayring unterzogen (vgl. Mayring und Fenzl 2019). Die Inhalte wurden dabei kodiert und Kategorien

zugeordnet (vgl. Mayring 2015). Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der Software MAXQDA (vgl. VERBI GmbH 2020).

ERGEBNISSE

Auswahlkriterien bzgl. Mobilitätsdienstleistungen

Das am meiste genannte Entscheidungskriterium ist der *Preis bzw. das Preis-Leistungsverhältnis*.

„[...] der Preis, das ist das ausschlaggebende Kriterium. Z. B. bei zwei Mobilitätsdienstleistern mit dem gleichen Geschäftsmodell, [...] nehme ich natürlich das günstigere.“

Eine wichtige Rolle bei der Wahl von Mobilitätsdienstleistungen spielt zudem die *Verfügbarkeit* der Mobilitätsdienstleistungen. Einige Verbindungen des öffentlichen Nahverkehrs sind am späteren Abend / in der Nacht weniger oder nicht verfügbar. Auch andere Mobilitätsdienstleistungen wie beispielsweise stationsungebundene Sharing-Angebote können im gewünschten Gebiet grundsätzlich oder temporär nicht zur Verfügung stehen.

„Wenn ich jetzt mal abends in der Innenstadt bin oder nachts, ist es schwierig, ein verfügbares Fahrzeug zu bekommen.“

Die *Zeitdauer* einer Verbindung spielt bei der Auswahl eines Mobilitätsangebotes ebenfalls eine wichtige Rolle.

„[...] wenn ich weitere Strecken fahre und ich mit dem Auto Zeit einsparen würde von um die 20-30 Minuten, dann benutze ich Car-Sharing.“

Manche Wege sind beispielsweise mit dem öffentlichen Nahverkehr grundsätzlich nur mit hohem zeitlichen Aufwand zu bewältigen. Des Weiteren ist relevant, ob im Zielgebiet Parkplätze vorhanden sind.

Ebenso hat die *Bequemlichkeit* einen Einfluss auf die Wahl des Verkehrsmittels.

„[...] Wenn ich im Club war oder in der Bar getrunken habe, dann nehme ich das (Anm.: Taxianbieter wie CleverShuttle oder FREE NOW), weil [...] die BVG dann [...] für mich zu unbequem ist. [...] Das ist mir das Geld dann wert [...].“

Damit in Zusammenhang stehen auch die *Wetterbedingungen*, die ebenfalls in die Entscheidung mit einfließen.

„[...] dann benutze ich Car-Sharing. Oder wenn es draußen kalt ist.“

Anforderungen an eine Mobilitätsplattform

Die Anforderungen an eine Mobilitätsapp wurden anhand des Beispiels Jelbi erhoben.

Einerseits wird die *Vollständigkeit der verfügbaren Anbieter* in der integrierten Mobilitätsplattform als wichtig angesehen, um ein möglichst vorteilhaftes Angebot auswählen zu können und eine große Auswahl zu haben.

„[...] ich möchte das Gefühl haben, dass die App [...] mir eine genaue Anzeige von allen Anbietern zeigt, damit ich einen guten Überblick über die gesamten Preise habe und nicht das Gefühl bekomme, [...] über den Tisch gezogen zu werden, wenn die nur mit bestimmten Unternehmen zusammenarbeiten“.

Anderen Interviewpersonen ist es dagegen vor allem wichtig, dass die von ihnen präferierten Anbieter über die Plattform verfügbar sind.

Als wünschenswert sehen mehrere Interviewpersonen *intermodale Angebote* durch eine integrierte Mobilitätsplattform an, d. h. die Möglichkeit, verschiedene Verkehrsmittel für eine Wegstrecke zu kombinieren.

„Und dass man auch die einzelnen Sachen kombinieren kann. Also wenn ich mit der Bahn fahren möchte, dass ich die Bahnoption habe und den Rest der Strecke mit dem Auto zurücklege, weil die Bahn da nicht hinfährt.“

Als vorteilhaft am Beispiel Jelbi wurde die *nahtlose Integration von Suche, Buchung und Bezahlung* der Mobilitätsdienstleistungen in derselben App bewertet, ebenso die *nur einmal erforderliche Registrierung und Validierung* der erforderlichen Dokumente.

„[...] einfach seinen Identitätsstuf einträgt und Führerschein und dann kann man alles benutzen. [...] Ich finde es schon gut, es alles in einer App zu haben [...].“

Hinsichtlich der *Benutzerschnittstelle* in der App wurden folgende Aspekte als wichtig erachtet:

- Anzeige des Gesamtpreises, der Fahrtdauer, der zeitlichen Verfügbarkeit sowie ggfs. geeigneter Echtzeitinformationen
- Filtermöglichkeiten zur Reduktion des Informationsangebotes
- übersichtliches und zeitgemäßes Design

Zudem wurde erwähnt, dass die *Datenweitergabe* an die einzelnen Mobilitätsanbieter transparent dargelegt werden sollte.

Das Angebot einer *Business-to-Business-Lösung* wurde von einer Interviewperson als wichtig erachtet, beispielsweise, um geschäftlich bedingte Fahrten komfortabel abrechnen zu können.

Des Weiteren sollten *verschiedene Zahlungsmittel*, insbesondere PayPal angeboten werden. Schließlich sollten *Fahrkarten gespeichert* und in der *Vergangenheit* getätigte Fahrten in der App einsehbar sein.

Hinderungsgründe der Nutzung

Größter Hinderungsgrund bei der Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform ist, wie schon im Rahmen der Anforderungen erläutert, das *Fehlen von Anbietern*. Entsteht bei den Anwendern der Eindruck, dass Anbieter nur unvollständig vertreten sind, besteht die Sorge, dass nicht das vorteilhafteste Angebot am Markt gewählt werden kann.

„[...] ok, es zeigt mir sowieso nicht alle Möglichkeiten an. Also schaue ich mir dann doch lieber nochmal Car2go selbst an [...].“

Eine Interviewperson berichtete des Weiteren, dass kein Grund zur Nutzung einer Mobilitätsplattform bestünde, wenn sie sich *bereits über eigenen Präferenzen klar wäre*.

„[...] wenn ich beispielsweise dauerhaft nur Car2go nutze und meine BVG-Strecken kenne, da gibt es nämlich eigentlich keinen Grund, Jelbi zu nutzen.“

Ein weiteres Hemmnis wird in der *Gewöhnung an die neue App* bzw. deren Benutzerschnittstelle gesehen. Zudem vermuten einige Interviewpersonen, dass durch die Plattform *Vermittlungsgebühren* für die Anwender entstehen könnten. Insofern scheint das Geschäftsmodell nicht transparent dargestellt zu sein. Auch ist manchen Nutzern unklar, ob die *gespeicherten Nutzerdaten* von der Plattform an alle angebotenen oder nur die individuell genutzten Dienstleister weitergegeben werden.

Chancen der Nutzung

Chancen sehen die Interviewpersonen durch die *effiziente Zusammenstellung von Informationen bezüglich Mobilitätsangeboten* sowie deren Preis und Zeitdauer für die gewünschte Strecke. Der eigenständige Vergleich einzelner Angebote über unterschiedliche Apps ist damit nicht mehr notwendig.

„[...] ich muss mir ja keine Gedanken mehr machen, was eventuell die beste Lösung ist, weil ich kann das niemals so gut entscheiden wie ein Algorithmus.“

Bei der erstmaligen Nutzung einer neuen Mobilitätslösung muss keine zusätzliche App installiert werden, wenn die integrierte Mobilitätsplattform die direkte, nahtlose Nutzung der angeschlossenen Mobilitätsdienstleistungen ermöglicht. Dies kann zu einem *erleichterten Zugang zu verschiedenen Mobilitätsangeboten* führen.

„[...] muss man sich nicht an die verschiedenen Apps immer wieder neu gewöhnen, weil es immer das gleiche Interface hat, nur mit einem anderen Produkt.“

Durch Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform kann somit auch die *Anzahl der Mobilitätsapps auf dem Smartphone* reduziert werden. Die Aggregation der Dienstleistungen in einer Applikation hilft somit der *Komplexitätsreduktion*.

Eine Mobilitätsplattform kann dabei helfen, sich in einer Stadt zu orientieren bzw. sich einen *Überblick* über die dort vorhandenen Mobilitätslösungen zu schaffen.

„Wenn man in eine neue Stadt zieht, muss man sich erstmal einen Überblick verschaffen [...]. Wenn man sich nur irgendeinen Sharing-Anbieter holt, dann sieht man nicht die anderen Anbieter.“

Die Zusammenstellung verschiedener Mobilitätslösungen kann aber auch für Ortskundige dazu führen, dass Mobilitätsdienstleistungen kennengelernt und genutzt werden, die ansonsten nicht im Fokus der Anwender gewesen wären (*Marketing-Effekt*).

„Ich denke, wenn es alle Anbieter drin hat, habe ich auch die Möglichkeit, neue Anbieter zu entdecken.“ Ein weiterer Nutzen kann darin bestehen, dass die integrierte Mobilitätsplattform vergangene Buchungen analysiert und diese zur Ermittlung von Präferenzen verwendet (*Nutzung von Big Data zur Optimierung der User Experience*). Diese Ergebnisse lassen auf eine Reduktion der Transaktionskosten bei Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform gegenüber der Nutzung einzelner Mobilitätsplattformen schließen.

Abbildung 4 fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Auswahlkriterien bzgl. einer Mobilitätsdienstleistung
<ul style="list-style-type: none"> • Preis / Leistung • Verfügbarkeit • Zeitdauer • Bequemlichkeit
Anforderungen an eine Mobilitätsplattform
<ul style="list-style-type: none"> • Vollständigkeit der Anbieter • Intermodale Angebote • Integration von Suche, Buchung, Bezahlung • Komfortable Benutzerschnittstelle
Hinderungsgründe der Nutzung einer Mobilitätsplattform
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlen von Anbietern • Notwendige Umgewöhnung an neue App • Fragen zum Geschäftsmodell / Datenschutz
Chancen der Nutzung einer Mobilitätsplattform
<ul style="list-style-type: none"> • Effiziente Übersicht • Leichter Zugang zu verschiedenen Mobilitätsdienstleistungen • Reduktion der Komplexität

Abbildung 4: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Eine vollständige Übersicht aller Ergebnisse der empirischen Studie findet sich in Dao (2020).

FAZIT UND AUSBLICK

Die Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform bietet Anwendern mehrere Vorteile. Größter Nutzen ist die von den Nutzern als effizient wahrgenommene Zusammenstellung möglicher Mobilitätsangebote für eine gewählte Wegstrecke. Anhand persönlicher Präferenzen kann das beste Angebot nach den persönlichen Präferenzen effizient bestimmt und – falls die Plattform diese Möglichkeit bietet – auch gebucht werden. Dadurch können neue Mobilitätsdienstleistungen entdeckt und ohne Mehraufwand wie bspw. der Installation von neuen Apps genutzt werden. Die Komplexität der individuellen Mobilität kann demzufolge reduziert werden.

Einen großen Einfluss auf die Nutzung einer integrierten Mobilitätsplattform hat die Zusammenstellung der integrierten Anbieter. Fehlt aus Sicht der Anwender ein präferierter Anbieter bzw. entsteht der Eindruck, dass die Auswahl der Anbieter das Marktangebot nur unvollständig abdeckt, kann dies dazu führen, dass die Plattform nicht genutzt wird. Somit ist es für die Plattform selbst wichtig, attraktive Dienstleister zu integrieren und langfristig binden zu können (bspw. auch über exklusive Verträge).

Die Aussagekraft der Studienergebnisse unterliegt einigen Einschränkungen: Bei der qualitativen Befragung wurde der Fokus zunächst auf sehr mobile Personen gelegt. Um einen Eindruck einer breiten Nutzerbasis zu erhalten, sollten in einer zukünftigen Befragung auch weniger mobile Personen einbezogen werden. Die Stichprobe bestand zudem aus jungen Personen. Die Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an eine integrierte Mobilitätsplattform, können sich bei zusätzlicher Analyse anderer Personengruppen verändern. Insbesondere ältere Verkehrsteilnehmer wie Senioren könnten besondere Anforderungen haben. Diese konnten u. a. aufgrund der Werbung für die Befragung über

Social-Media-Kanäle nur eingeschränkt erreicht werden. Die Stichprobe war aufgrund des gewählten qualitativen Untersuchungsansatzes sehr klein. Die Ergebnisse der Studie sind somit nicht verallgemeinerbar. Im Rahmen einer quantitativen Untersuchung, die auf der qualitativen Studie aufbaut, können die gewonnenen Ergebnisse validiert werden.

LITERATUR

- Adam, S. und M. Meyer. 2015. "Integration der Kundenperspektive als Basis für Bedarfsorientierung und Weiterentwicklung integrierter Mobilitätsplattformen". In *Marktplätze im Umbruch: Digitale Strategien für Services im mobilen Internet 2015*, C. Linnhoff-Popien, M. Zaddach und A. Grahl (Eds.). Springer Vieweg, Berlin, 589–601.
- Agora Verkehrswende. 2019. "Bikesharing im Blickpunkt: Eine datengestützte Analyse von Fahrradverleihsystemen in Berlin". https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Stationslose_Bikesharing_Systeme/Bikesharing_im_Blickpunkt_20190304_web.pdf_20190304_web.pdf, Zugriff: 03.04.2020.
- Barbu, C. M.; Florea, D. L.; Ogarcă, R. F. und M. C. Barbu. 2018. "From Ownership to Access: How the Sharing Economy is Changing the Consumer Behavior". *Amfiteatru Economic* 20, No. 48, 373–387.
- Becker, C. und S. F. Link. 2019. "Herausragende Mobilität? Eine objektive Bewertungsheuristik für inter- und multimodale Mobilitätsplattformen". *Journal für Mobilität und Verkehr*, No. 2, 59–65.
- BVG. 2020a. "Dein Start ist smart – So funktioniert's!". <https://www.berlkoenig.de/>, Zugriff: 03.04.2020.
- BVG. 2020b. "Jelbi - EINE FÜR ALLE". <https://www.jelbi.de>, Zugriff: 03.04.2020.
- Clement, R. und D. Schreiber. 2016. "Internet-Ökonomie: Grundlagen und Fallbeispiele der vernetzten Wirtschaft". Springer Gabler, Berlin u. a.
- Dao, N. H. 2020. "Urbane Mobilitätsplattformen: Chancen und Hinderungsgründe". Bachelorarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin.
- Frost, A. 2019. "New MaaS Travel Service Launches in Stockholm". <https://www.trafficechnologytoday.com/news/mobility-as-a-service/new-maas-travel-service-launches-in-stockholm.html>, Zugriff: 10.04.2020.
- GHT Mobility GmbH. 2020. "Wir fahren dich in eine lebenswerte Zukunft". <https://www.clevershuttle.de/>, Zugriff: 03.04.2020.
- Hamann, R.; Knöll, V.; Schimanski, T.; Bayer, S. und S. Schulz. 2019. "(E-)Kleinstfahrzeuge – Tech-Blase oder Verkehrsrevolution?: Teil 2 – Welches Potential haben die „neuen“ vernetzten Mobilitätsangebote in Deutschland?". *Internationales Verkehrswesen* 71, No. 4, 80–85.
- Hamari, J.; Sjöklint, M. und A. Ukkonen. 2016. "The Sharing Economy: Why People Participate in Collaborative Consumption". *Journal of the Association for Information Science and Technology* 67, No. 9, 2047–2059.
- Hoffmann, C. 2009. "Erfolgsfaktoren umweltgerechter Mobilitätsdienstleistungen: Einflussfaktoren auf Kundenbindung am Beispiel DB Carsharing und Call a Bike". Dissertation, Universität Osnabrück.
- Jittrapirom, P.; Caiati, V.; Feneri, A.-M.; Ebrahimigharehbaghi, S.; González, M. J. A. und J. Narayan. 2017. "Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges". *Urban Planning* 2, No. 2, 13.
- König, A. und J. Grippenkoven. 2019. "Ridepooling, Mobility-on-demand, fahrerlose Busshuttles – Zur Psychologie des Teilens von Fahrten in bedarfsgesteuerten Mobilitätskonzepten". *Journal für Mobilität und Verkehr*, No. 2, 10–22.
- Krämer, A. und R. Bongaerts. 2019. "Shared Mobility: Wege aus der Nische?". *Marketing Review St. Gallen*, No. 5, 888–895.
- Lee, Z. W.Y.; Chan, T. K.H.; Balaji, M. S. und A. Y.-L. Chong. 2018. "Why People Participate in the Sharing Economy: An Empirical Investigation of Uber". *Internet Research* 28, No. 3, 829–850.
- Lund, E.; Kerttutill, J. und T. Koglin. 2017. "Drivers and Barriers for Integrated Mobility Services: A Review of Research. Lund University (K2 Working Papers: 3)". http://www.k2centrum.se/sites/default/files/drivers_and_barriers_for_integrated_mobility_services_k2_working_paper_2017_3.pdf, Zugriff: 08.06.2020.
- Malzahn, B.; Konhäusner, P. und D. Yozgatli. 2018. "Online-Plattformen als Quellen disruptiver Innovationen". In *Kreativität + X= Innovation: Beiträge und Positionen der HTW Berlin 2018*, M. Knaut (Eds.). Berliner Wissenschaftsverlag, 142–147.
- Mayring, P. 2015. "Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken". Beltz, Weinheim.
- Mayring, P. und T. Fenzl. 2019. "Qualitative Inhaltsanalyse". In *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung 2019*, N. Baur und J. Blasius (Eds.). Springer Fachmedien, Wiesbaden, 633–648.
- Min, S.; So, K. K. F. und M. Jeong. 2018. "Consumer Adoption of the Uber Mobile Application: Insights from Diffusion of Innovation Theory and Technology Acceptance Model". *Journal of Travel & Tourism Marketing* 13, No. 4, 1–14.
- Mittendorf, C. 2017. "The Implications of Trust in the Sharing Economy – An Empirical Analysis of

- Uber". *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 5837–5846.
- Mittendorf, C. 2018. "Trust and Distrust in Two-Sided Markets: An Example in the Sharing Economy". *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*, 5402–5411.
- Nefzger, E. 2019. "Das Geschäft mit den Leihmotorrollern". <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/rollersharing-der-eigentliche-scooter-boom-a-1295944.html>, Zugriff: 02.04.2020.
- Nuttavuthisit, K. 2019. "Qualitative Consumer and Marketing Research: The Asian Perspectives and Practices". Springer, Singapore.
- Parker, G.; van Alstyne, M. und S. P. Choudary. 2016. "Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy - and how to Make Them Work for You". W.W. Norton & Company, New York, London.
- Pawletzki, V. 2019. "P2P-Carsharing - Beweggründe für das Anbieten vom eigenen Fahrzeug am Beispiel von Drivy". Bachelorarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft.
- Pflügler, C.; Schreieck, M.; Hernandez, G.; Wiesche, M. und H. Krcmar. 2018. "Referenzmodell einer Mobilitätsplattform". In *Management digitaler Plattformen: Konzeption und Realisierung eines offenen Ökosystems für intelligente Mobilitätsdienste in der Smart City 2018*, M. Wiesche, P. Sauer, J. Krimmling und H. Krcmar (Eds.). Springer Gabler, Wiesbaden, 25-37.
- Scherer, S.; Reck, F. und A. Fliaster. 2019. "Anbau, Umbau, Neubau? – Digitale Transformationsstrategien im Mobilitätssektor". In *Digitale Geschäftsmodelle – Band 2: Geschäftsmodell-Innovationen, digitale Transformation, digitale Plattformen, Internet der Dinge und Industrie 4.0 2019*, S. Meinhardt und A. Pflaum (Eds.). Springer Vieweg, Wiesbaden, 57–71.
- Scheuerle, T. 2017. "Entwicklung und Gestaltung sektorübergreifender Geschäftsmodellinnovationen für integrierte Mobilitätsdienstleistungen in Städten". Dissertation, Universität St. Gallen.
- Schmöller, S.; Niels, T.; Hardt, C.; Lippoldt, K.; Dandl, F. und K. Bogenberger. 2019. "Carsharing in Deutschland". *Journal für Mobilität und Verkehr*, No. 2, 1–9.
- Schuster, T. und L. Waidelich. 2019. "Internetbasierte Mobilitätsdienste – Ein Lösungsansatz zur effizienten individuellen Mobilität?". *Journal für Mobilität und Verkehr*, No. 2, 50–58.
- Shieber, J. 2019. "Whim, the all-in-one mobility app for ridesharing, public transit and rentals is coming to the US". <https://techcrunch.com/2019/01/24/whim-the-all-in-one-mobility-app-for-ride-sharing-public-transit-and-rentals-is-coming-to-the-us/>, Zugriff: 03.04.2020.
- Spulber, A. und E. P. Dennis. 2016. "The Impact of New Mobility Services on the Automotive Industry". <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2017/02/The-Impact-of-New-Mobility-Services-on-the-Automotive-Industry.pdf>, Zugriff: 03.04.2020.
- Terwelp, C. 2019. "Entwicklung eines Referenzmodells für Mobilitätsplattformen". Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule.
- Uber Deutschland. 2020. "Fakten zu Uber in Deutschland". <https://www.uber.com/de/newsroom/fakten-uber-deutschland-sachlage/>, Zugriff: 03.04.2020.
- van Alstyne, M. W.; Parker, G. G. und S. P. Choudary. 2016. "Pipelines, Platforms, and the New Rules of Strategy". *Harvard Business Review* 94, No. 4, 54–62.
- VERBI GmbH. 2020. "MAXQDA - The Art of Data Analysis". <https://www.maxqda.de/>, Zugriff: 03.04.2020.
- Weiß, E. M. 2019. "Jelbi startet: Berlin bekommt eine Mobilitäts-App". <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Jelbi-startet-Berlin-bekommt-eine-Mobilitaets-App-4538015.html>, Zugriff: 03.04.2020.
- Witzke, S. 2015. "Carsharing und die Gesellschaft von Morgen". Springer Gabler, Wiesbaden.

AUTHOR BIOGRAPHIES

BIRTE MALZAHN ist seit 2012 Professorin für Informationswirtschaft, Geschäftsprozesse und Allgemeine Betriebswirtschaftslehre im Studiengang Wirtschaftsinformatik der HTW Berlin. Ihr Forschungsinteresse gilt unter anderem dem Nutzungsverhalten von IT-Anwender_innen und dessen Ursachen.

PETER MATHIAS KONHÄUSNER hat sein Studium der Wirtschaftswissenschaften (Management Science) an der Wirtschaftsuniversität Wien abgeschlossen. Mit Expertenwissen aus über 20 Jahren selbstständigem Unternehmertum ist er neben seiner Arbeit als freier Unternehmensberater als Redner, Lektor und Dozent tätig. Seine Lehrbereiche umfassen Unternehmens-, Medien-, Handels- und Personalmanagement, Informationslogistik, Prozessdesign sowie IT-Informationssysteme und Marketing.

NGOC HUYEN DAO hat im März 2020 ihr Bachelorstudium im Studiengang Wirtschaftsinformatik an der HTW Berlin erfolgreich abgeschlossen. Sie beginnt demnächst als Business Analyst Trainee bei der DKB zu arbeiten.

SURVIVING POSSIBLE? A QUALITATIVE ANALYSIS OF THE CURRENT TRANSFORMATION PROCESSES IN THE GERMAN AUTOMOTIVE SUPPLIER INDUSTRY, DUE TO AUTONOMOUS AND ELECTRIC VEHICLES

Johanna Heiler

Alumni Pforzheim University
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
johannaheiler@me.com

Véronique Goehlich

Pforzheim University
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
Veronique.Goehlich@hs-
pforzheim.de

Frank Morelli

Pforzheim University
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
Frank.Morelli@hs-pforzheim.de

ABSTRACT

The importance of the automotive industry for Germany's economy and employment is significant: Before Covid-19, 22% of total revenue for manufacturing and processing goods were gained by the automotive industry in Germany with over 830,000 employees. As the supply side contributes 3/4 to the value chain, the research focuses on German automotive suppliers and how they perceive the shift from combustion engines to electric engines and to fully autonomous vehicles. For the explorative study, a qualitative content analysis based on expert interviews was used. 15 top and high-level managers from 14 German automotive suppliers were personally interviewed. The analysis has proven that most suppliers are significantly affected through these transformations. Only three suppliers evaluate the changes mainly as growth drivers for their business, while the rest faces large challenges and great threats from the industry developments.

KEYWORDS

German automotive supplier industry, paradigm shift, disruption, transformation, autonomous vehicles, electric vehicles, Original Equipment Manufacturer (OEM)

INTRODUCTION

In total, the automotive industry is one of the most important economic sectors in Germany with a 22 %-share of the total revenue for manufacturing and processing goods (Statistisches Bundesamt, 2019). Germany's prospering economy is mainly driven by the export of German automobiles which accounted for €282,7 billion in 2019 (21% of total export) (Statistisches Bundesamt, 2020). However, the automotive sector not only counts in monetary terms for the well-being of Germany. The industry is also one of the largest employers of the country with over 830,000 employees in 2019, based on Destatis (Statistisches Bundesamt, 2020). One group of this industry represents the automotive suppliers that realized around €80 billion revenue in 2019 (18% of total revenue in the automotive industry) (Statistisches Bundesamt, 2020). Compared to manufacturers of automobiles and automotive engines (in the article, this group is considered as OEM) this could imply a rather low significance of the suppliers. However, when looking at the value chain, the automotive suppliers account for 75% of value-added. Also, the suppliers are one of the main drivers of innovation when considering that one-third of R&D expenses are made by suppliers. This again

acknowledges the importance and dependency of OEMs and the automotive suppliers (VDA, 2016).

During the recent years, the technological complexity of manufacturing vehicles increased constantly. The OEMs invested heavily in R&D to develop new products that would differentiate themselves from the competition (Kilian et al. 2017). One important trend is the expansion of assistant systems for comfort and safety towards fully autonomous vehicles. Especially new industry-remote competitors from Asia and North America like Baidu (Madhok, 2018) and Waymo (Waters & Burn-Murdoch, 2019) are entering the market by providing highly sophisticated software to advance the current status quo. They can be regarded as disruptive technology providers familiar with IT-related topics like big data, connectivity, social networks as well as platforms. This situation enables partnerships among different ecosystem players. Another dominant topic targets the emission reduction by downsizing the combustion engines as well as electrifying the powertrain (McKinsey, 2016). Since traffic makes up a large part of the CO₂ contribution with 18.2% of global energy-related CO₂ emission (BMU, 2017), governments decided to subsidize the development of electric vehicles. By 2025, there should be over 400 models of electric vehicles available (Singh, 2018). Thereby, global stock of electric vehicles is constantly increasing (+54% compared to the year before); however, the market is still representing a niche market with around 3 million electric passenger cars sold worldwide in 2017 (IEA, 2018) compared to 73 million total passenger cars sold with China being the largest market (OICA, 2017).

Besides new climate agreements, the increasing demand for alternative vehicles and mobility solutions can also be explained by a changing customer demand. Millennials (people born between 1980 and 1999) are emerging to become the largest purchasing group globally. Their idea of mobility has changed by regarding mobility as a vital service not as a status symbol. In 2016, already 33% of German Millennials used public transport systems compared to less than 15% among all other age groups (VDV, 2016). Also, over 2.1 million users were registered at car-sharing platforms in the beginning of 2018 (+24% compared to last year) (Bundesverband Car-Sharing, 2018). This offers opportunities from an added-value perspective in the direction of servitization and service-driven logic. Seeing service as the fundamental basis of exchange, value is cocreated by multiple actors in adequate ecosystems. Coordination takes place by using actor-generated institutions and institutional arrangements. Inter-organizational networks can be orchestrated with IT platforms: Creating connectivity enables the creation of value in the network (Floranta & Turunen, 2015). Furthermore, sharing proprietary resources can be a benefit for each participant regarding service innovation and provision. The integration logic can establish an efficient service delivery system. Therefore, the importance of IT platform approaches has high potential, especially the manufacturing context (Floranta & Turunen, 2015).

Besides this, suppliers can transform into business partners. On the other hand, this means that classical tier 1-3 suppliers are not only exposed to the threat of being replaced by disruptive technology providers, but also becoming less important than new service providers, regarding the share-of-value. According to Proff, Fojcik and Killian, the European automobile industry will experience a decrease of the value added per vehicle in the future. The OEMs will face the challenge to build new skills for young professionals on one side, and simultaneously break up their previously integrated value bringing architecture on the other side. This might result in a transfer of value added to their suppliers (Proff et al. 2015).

Based on these new industry developments, the study aims to identify in what forms German automotive suppliers perceive their current transformational environment as well as to extract possible variables that could influence these perceptions. Additionally, the analysis seeks to identify possible factors that determine whether a supplier might successfully integrate these changes.

LITERATURE REVIEW

As companies normally align their business model and strategy based on how they perceive their environment, changes within their micro or macro environment can have fundamental consequences for the company, but also for the industry (Tidd et al. 2005). The initiators for a transformation in the business context are always innovations. Hereby, one can distinguish between a technological novelty, business-related changes like

given market structures or rules, or in form of organizational innovation that can concern corporate structures, culture or systems (Tidd et al. 2005). Based on the type of innovation, the effects of transformations to the enterprise or industry vary. Incremental-continuous innovations are subject to an advancement of already existing problem-solving methods. The products are not substantially transformed but the potential of already successful technological designs is exploited through improvements of efficiency and the reinforcement of an established technical order (Tushman & Anderson, 1986). In contrast to that, radical-discontinuous innovations replace old technologies by destroying market structures with the introduction of completely new and revolutionary technologies (Tushman & Anderson, 1986).

Transformation Processes

Joseph Schumpeter defined in his theory of innovation in 1912 the emergence and development of new inventions. The process of transformations can be described in a s-curve based on the degree of maturity of a technology and time as shown in the graph below.

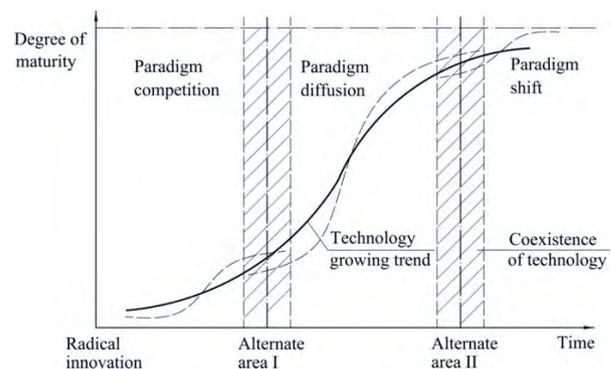


Figure 1: Paradigm shift as S-curve (Zheng & Xu, 2014)

Thereby, new innovations firstly emerge parallel to already existing structures (Schumpeter, 1939). Only when the realignment of means is developed fully and diffused successfully in the market, it competes with the old products and eventually can make the old innovation become obsolete (Schumpeter, 1939). After the technology is saturated in the market, a technology shift appears. In order to derive further profit, Schumpeter argues that many companies are constantly pursuing the process of “creative destruction”: introducing a new set of combinations that eventually destroys the old one (Schumpeter, 1942). Several models have been developed since then and the process of innovation is, based on the work of Kline and Rosenberg (Kline & Rosenberg, 1986), today seen as a complex system depending on hardware, market environment, production facilities, knowledge and socio-economical context (Brunetta et al. 2018).

In order to grow through transformations, a company needs to focus its attention simultaneously on three areas:

growing with the current business, developing new business models and identifying new trends and future growth opportunities (Baghai et al. 1999). However, companies oftentimes face difficulties in simultaneously maintaining their old business operations while investing into the radical innovation until the integration process is fully completed. Christensen refers to this managerial balancing act as “innovator’s dilemma” (Christensen, 2008). The integration process usually involves large investments that are mainly financed by the old business operation. Companies with a smaller amount of financial resources and highly specialized products oftentimes choose to stay in the “old” market, which will eventually become a niche market (specialization strategy). However, the growth expectations in niche markets are much lower than in mass markets. Hence, many specialized companies try to transfer their core competences onto other industries besides the innovated one (diversification strategy) (Porter, 1987).

Reasons why some companies are not able to adapt to the transforming circumstances are divers. Christensen and Raynor (Christensen & Raynor, 2013) identified two types of discontinuity: One where an existing market is confronted with a new bundle of performance parameters and the other one where disruptive innovations create completely new markets. Most companies do not fail to “cope with a breakthrough in the technological design [...] but with the emergence of new markets with very different needs and expectations” (Tidd and Bessant 2013, p. 30). Oftentimes, the later disrupted companies invented the disruptive innovation themselves, but they were not able to adapt their inventions to a new set of needs. Other firms struggle to identify the long-term growth potential of newly emerging markets, as the certainty of the full potential is not given at the beginning (Tidd & Bessant, 2013).

Organizational inertia is also considered to be an explanation why large companies fail to adapt to changes within the external environment. It is the tendency of experienced firms to continue their current trajectories. Hereby, it can be distinguished between an unwillingness to invest (resource rigidity) and the inability to adjust established patterns and logic that motivated those investments (Managing Research Library).

Innovation Management

To ensure a company’s success, it is necessary to develop specific structures and capabilities that can detect and adapt to radical-discontinuous as well as incremental-continuous changes (Tushman & O’Reilly, 1996).

In general, the process of innovation management consists of three different steps: searching, selecting and implementing new innovations. In this context, innovation management is “a generic activity associated with survival and growth” (Tidd and Bessant 2013, p.67 et seq.). No matter if the innovation is technology-oriented, organizational or business-related, a company needs to decide whether it wants to be an innovation pioneer or an innovation follower. One advantage of being a first-mover is the benefits that arise from a

temporary monopolistic position in the market. Monopolists usually achieve higher profit margins, reduce their manufacturing costs through learning effects and economies of scale and can increase the barriers to entry. They can also start establishing relations to suppliers as well as customers, which increases loyalty and trust. However, being a first-mover has also its disadvantages. The strong uncertainty concerning the development and acceptance of novelties, as well as financial and resource investments bear high risks. Companies become inflexible to further changes due to high development costs and little experience values (Tidd et al. 2005). Therefore, many companies decide to become early adopters or innovation followers.

METHODOLOGY AND DATA COLLECTION

The aim of this empirical study is to identify the strategic influences of fully autonomous and electric vehicles on German automotive suppliers. As these transformations are currently emerging, there is little to none empirical research conducted about the possible influences targeting the supplier industry so far. Therefore, an explorative research is used to provide a first analysis of this topic. For the analysis of the research questions a qualitative method was chosen (Patten & Newhart, 2017). Semi-structured expert interviews constitute the primary source of data collection. The interviews have been conducted with top-managers of German automotive suppliers since they represent the population of the research study.

Out of this population, a sample is derived through sampling (Stokes & Wall, 2014). Thereby, the selection criteria for possible interview partners included the following conditions:

- the interviewee needs to have a leading position within the company to ensure a realistic presentation of the company’s strategy, processes and assessments,
- the company of the manager manufactures and supplies products for the automotive industry and
- the company’s headquarter is located in Germany.

The aim of the study is to display a realistic picture of the industry. Thus, variations within the sample concerning size of company and type of product were preferred. The products provided by the suppliers range from small electric components to exhaust systems as well as to engineering services, as can be seen in the table below.

Table 1: Overview of interviewed suppliers based on several variables

ID	Company Structure			Type of product		
	Company Size	Profitability	Legal Structure	Product Type	Part of the Value Chain	Automotive Dependency
1	medium	small*	private company*	powertrain	components	large
2	large*	small*	private company	powertrain*, chassis*, electronics*	systems*	medium*
3	medium*	medium*	public corporation	powertrain*	components	small*
4	medium	medium*	private company*	powertrain, others	components*	medium, large
5	medium*	small*	private company*	powertrain*	systems	large*
6	medium	small	private company*	powertrain	systems	large*
7	small	n.a.	private company*	electronics	parts	large*
8	large*	large	public corporation*	powertrain	systems	large*
9	medium*	large*	private company	others*	parts	small*
10	medium*	medium*	public corporation	powertrain, chassis	components	large
11	large*	small*	private company*	powertrain*, others*	systems*	large
12	small	n.a.	private company*	others	parts*	large
13	medium	n.a.	private company*	electronics	components*	small

* No answer provided in the interview. Value is based on quantitative research.

The representatives of the interviewed suppliers hold the following positions within their companies:

- Head of department (four interviewees)
- Head of division (eight interviewees)
- CEO (three interviewees)

They assume responsibility in the fields of strategy and business development (six interviewees), product development (six interviewees), sales (one interviewee) and public relations (two interviewees). The interviews were conducted from September 20th, 2017 until October 30th, 2017. The duration of the interviews varied between 30 and 80 minutes and were carried out face-to-face (nine interviews) or via telephone (five interviews).

In all interviews the language spoken was German to create a comfortable interview environment for the interviewees. All interviews were transcribed subsequently by applying simplified rules of transcription. Although the study was already conducted in 2017, a consultation with the majority of the interview partners in June 2020 showed that the central statements are still valid.

Data Analysis

The analysis of the expert interviews aims to answer three research questions:

1. Which strategic influence does the transformation represent for German automotive suppliers?
2. Which variables could have a possible influence on how the suppliers perceive the transformations?
3. Which capabilities should a company hold in order to be fit for the transformations?

To answer these questions, a qualitative content analysis based on Mayring was chosen. This research method was used as it applies a systematic, theory-guided approach to text analysis where “the category system is the central point...” (Mayring 2014, p. 40). Hereby, a combination between summarizing and structuring the interview transcripts was chosen. To summarize the different forms of strategic implications for the first research question and the characteristics of fitness for the last research question, an inductive category system was used (Mayring, 2000). To identify possible variables that could have an impact on the strategic influence (second research question), a deductive category assignment was applied (Mayring, 2014). Since the three variables Size of Company, Type of Product and Innovation Management were targeted in the analysis, they constituted some of the categories.

FINDINGS

Strategic Influence

Based on the interviews, at least one of the two transformations will take influence on the business model and strategic orientation. Especially e-mobility was identified to be the main factor influencing the industry while by the majority autonomous vehicles are expected to affect the company only indirectly. The main reason for this presumption is that the production of autonomous vehicles not necessarily abdicates combustion engines and thus does not automatically threaten sales for vehicles with combustion engine: “We do not address autonomous driving for it has no relevance to us. As we are a supplier for modules, we do not care if the vehicle is driven by a person or by itself” (S05). Another supplier argued that autonomous driving “does not present any linkage to our core-competences” (S08). However, several interviewees conceded that the emergence of autonomous vehicles could reduce the vehicle stock and would have influence on the companies ((S11), (S04)).

Only one supplier identified autonomous vehicles also as a growth driver: “The revenue potential for the suppliers will increase significantly due to the transformations and the fully autonomous driving. In the next six to seven years, our company will generate 2 to 2,5 billion EUR additional revenue through autonomous driving.” (S14). On the other hand, electric vehicles influence all interviewed suppliers “dramatically” (S13), “significantly” (S11), “largely” ((S01), (S07), (S09)), “on the highest organizational level” (S08), “as an absolute strategic orientation” (S04). However, the nature of this influence can be diverse. In total, only three of the surveyed suppliers benefit completely from electric vehicles. For (S09), electric vehicles imply “one of the main growth drivers for several product types”. The manager argued: “We are already present in the battery market with our products. To put it simple: the transformation of e-mobility is not possible without our type of products.”

Initiated by the transformations, other suppliers have also started to develop and produce new products needed for the shift towards e-mobility ((S02), (S03), (S04), (S05), (S08), (S10)). Nonetheless, the integration of e-mobility into the strategy was executed at different times. (S10) started to research and develop new products for the battery since 2009: “I think we are in a relatively comfortable position since we have not just now started to engage in e-mobility”. Hence, the company is currently able to offer three serial products for batteries to the market. Other suppliers included the development for products concerning electric vehicles later: “Of course, we have positioned ourselves somewhat towards e-mobility in the past years. We offer components that can be used in these vehicles” (S03). This second group of automotive suppliers considers electric vehicles as an opportunity for some parts of their businesses. But when looking at the company as a whole, other departments and divisions will face severe difficulties when production and sales of e-cars gather speed or even prevail against the combustion technology. The most frequently mentioned challenges faced by the interviewed suppliers are displayed in the table below:

Table 2: Challenges

Challenge	Suppliers
Investment dilemma	S01, S02, S03, S04, S06, S07, S08, S10, S12, S14
New competence requirements	S02, S06, S08, S11, S12, S14
Increasing competition	S05, S06, S07, S11, S12
Reduction of parts	S01, S04, S05, S12
Others	S01, S04, S07, S08, S11, S14

Most of these suppliers are highly dependent on the combustion engine. As they do not expect that the conventional powertrain has reached its saturation point so far, they are pursuing multiple strategies. Their investments aim to both, conventional and electric powertrains: “We need to earn money by doing what we

did in the past to make investments into e-mobility possible” (S04). The difficulty for many suppliers is that the demand for their new products is still very small: “Currently, we do not make one cent with our technology we developed for e-mobility. The market is just too small at the moment” (S04). This conflict refers to the “innovator’s dilemma” by Christensen (Christensen, 2008). Most of the interviewed suppliers struggle to find the right timing to invest into an innovation and still being able to innovate their existing products efficiently. Also, the suppliers recognized that dynamic capabilities become necessary in order to maintain serving the market demand properly: “Each supplier will have its own starting position in terms of capabilities and will have to strive for the ultimate competence in electronics software, electric motor and transmission, coupled with the ability to manufacture this efficiently” (S02). These requirements emerge since new market participants from other industries are entering the market.

However, for some of the suppliers it might not be easy to transfer their capabilities of producing parts for conventional powertrains: “The electrification presents a large influence [...] as we currently do not manufacture products of this kind” (S11). This third group perceives the development of the electrification of the powertrain not only as challenge, but also as a “threat” ((S01), (S05), (S06), (S11) (S12)). Their know-how is very specialized and therefore it is difficult for them to adapt the transformation into their business models. (S01) and (S06) believe that the complexity and requirements of their products will further increase within the next years which implies that they expect further growth generated by combustion engines. Additionally, this group of suppliers faces great investment dilemmas: “We need to evolve and innovate simultaneously, but we also need to manage our core business. That means there are two parts, and the part of the core business has to finance and enable the innovative part” (S11). As a reaction to this, (S05), (S06) and (S12) decided to diversify their product portfolio horizontally in order to become less dependent on the automotive industry: “Our actual strategic aim is to distance ourselves from the automobile, at least from the powertrain” (S06). However, diversification is only one measure chosen to react to the transformations as seen in the table below:

Table 3: Reactions

Reactions	Suppliers
Internal restructuring process	S01, S02, S08, S09, S10, S11
New investments made	S02, S03, S04, S10, S12, S14
Move-up the value-chain	S02, S08, S10, S11, S14
Diversification	S05, S06, S10, S12
New corporate alignment	S01, S08, S11
No reaction	S07, S13
Others	S01, S05, S07, S09, S13

Another tendency observed: companies seek to move up the value chain to become system suppliers. Their aim is to compensate future losses from a reduced growth of combustion engines. Since electric vehicles will also increase the competition for a considerable smaller number of automotive parts, they hope to realize additional value by providing complete systems for batteries, electric engines and other systems related to EV. Other suppliers try to realign their focus on other parts of the company, for example thermal management, where an increasing demand through EV can be expected ((S01), (S11)).

Variables

For some suppliers, their size and internal structures determine how they invest and handle new industry trends. (S06) for example argued “as a medium sized company you can spend your money only once”. Therefore, the variable company structure was evaluated in detail. Another performance indicator of a company is its profitability: “Basically, we have to finance ourselves from our own profits” (S02). Linked to a company’s structure is also the organization form. This category was chosen as some interviewees highlighted their fortunate position of not being a public corporation but to have a corporate culture that targets “a long-term orientation towards sustainable growth” (S14), also (S01), (S02) and (S09). On the other side, the public corporation (S03) admitted: “It is always a fine line [to invest into the future without waiving dividend payments].” However, many suppliers also emphasized the benefits of working for a family-run enterprise or where the majority rights are held by a foundation: “[...] we are lucky to be a corporation but also a family business which means 52% of shares are held by one family. This family is highly interested that we continue our operations for the next 50 years [...]” (S10).

Since many new players are currently entering the market, the international orientation might also imply how the companies are handling new trends. Here, one can analyze whether a company develops, manufactures and distributes its products mainly in its home country or if the business operations surpass national boundaries. Concerning the answers from the interviewees, large differences could be identified. One needs to distinguish whether a company generates a large part of its revenue outside Germany, where the production plants of the suppliers are located and if also R&D is sourced abroad. (S13) for example has not only its production plants abroad but also engages 400 R&D employees outside Germany. Therefore, the supplier was assigned to the subcategory large international orientation. (S12) on the other side operates mainly nationally with customers and employees coming from Germany. Thus, this company represents a small international orientation.

Within the environment of a company, decisions by their customers towards or against the transformations could also have a large impact on the supplier’s scope of action.

Thus, customer dependency was considered in the analysis. Hereby, the dependency on customers can be reflected in the share of revenue of the largest customers: *“The top key accounts make 80% of our revenue with an 80-20 rule”* ((S08), or (S01), (S06), (S09), (S13)). Besides the revenue share, the actual number of customers might also be affecting the dependency. Some of the suppliers described their customer base to be *“all OEMs worldwide”* ((S02), (S05), (S10), (S11)) which represents a smaller dependency on each customer. Others claimed to have *“three automotive customers in total”* (S12). The reliance of the suppliers on their customers can also target the development of new products or location decisions as confirmed by (S05): *“We always choose the location for production facilities based on the request by the customers. Normally, they want us to build close to their own facilities. We are mostly following our OEMs”*.

In the answers provided by the interviewees, some suppliers mentioned that they intend to increase their share of the value chain in the automotive industry. However, being a tier one supplier can also bear a lot of risk: *“The products become more complex. Development expenses are increasing. Also, the responsibility is becoming larger [...] The risk is higher and production becomes more complex”* (S10). Also, not everyone has the expertise and competitive advantage to become a system supplier by itself. (S08) for example intends to secure an additional share of the value creation process by acquiring companies: *“[Many] products that we implement into the electrified powertrain today [...] have a smaller additional value since we need to buy them externally from other suppliers”* (S08).

When asking the interviewees: *“Do you believe that the automotive supplier industry will generally increase their share of the value chain in the future?”* the answers were not unanimous. Some believe that they can increase their share while others believe that the OEMs will try to regain larger parts of the value chain. An increasing dependency on the automotive industry is not for every supplier the appropriate strategic move. Many suppliers are aiming in the opposite direction by reducing their large automotive dependency: *“We are trying to become less dependent on the automotive industry by entering completely new areas. It is our goal to generate one third of our revenue within business areas outside the automotive industry in 2030”* (S05). They diversify their product portfolio into other applications ((S03), (S12)) or industries ((S06), (S11)). Advantages from being independent are mentioned by (S13): *“We continue with what we did in the past. We benefit from the fact that we have not only been an automotive supplier”*.

When comparing the supplier's resource utilization for R&D (employees and revenue share), large differences in the scope and target of the investments can be detected. Some suppliers claimed that they continuously reinvest around 10% of their total revenue into new developments ((S02), (S04), (S06), (S08), (S09), (S14)). They argue that being innovative is one of their biggest competitive advantages (S09). A medium investment rate including

R&D expenditures between 5 and 7% is being spend by a smaller group of suppliers: ((S01), (S03), and (S05)). But there are also suppliers that address only little attention on research and development: *“[...] only one or two people are actually developing at R&D”* (S07), also (S12) and (S13). They reason that the development of new products is mainly customer-related. This means that each product is individually developed for and in close coordination with the OEMs: *“At the end of the day we are just a contract producer for the automotive industry. We do innovation management mainly through orders from customers. Therefore, we invest very little resources to have a base – only one or two employees – and the innovation is developed together with the customer”* (S07). (S12) relates this kind of innovation management to the size of his company: *“Our innovation management is closely linked to customer projects. Due to our size, we do not pursue own product visions or developments”*. These different approaches of innovation management cannot only be measured with the spending rates but also when comparing the different internal structures to identify new industrial changes. On the one side, there is (S02) who has highly advanced R&D structures that include *“think-tanks”* where employees can experiment with new ideas in separate modern spaces. In other companies, the R&D Structures are rather moderate (compare to (S12)). Here, the employees *“stay up-to date”* (S12) by attending trainings.

Since many innovations are generated internally, the analysis also focused on how companies incentivize their employees to develop new products and to come up with new ideas. Most interviewed suppliers have an internal improvement suggestion system ((S02), (S04), (S05), (S08), (S14)). This serves for the presentation and evaluation of new ideas. If an idea is accepted and developed in the state to be patented, the company usually rewards the inventor with financial bonuses. Besides monetary benefits, others ((S04), (S08), (S13)) honor their innovative employees by transferring responsibility. (S11) motivates its employees by *“acknowledgment, involvement and management attention”*. Nonetheless, there are also companies that do not incentivize their employees in any particular form. For (S06), thinking economically and being innovative *“is part of the corporate culture”*. That means, the company does not award its employees specifically. However, since companies are sometimes not able to develop innovations internally, collaborations are another way to gain expertise in certain fields. When asked how many and which type of collaborations the suppliers have, the answers differed considerably. Concerning the amount of collaborations, the responses ranged from none to many. The variety of answers regarding the type of collaborations is represented in the following table:

Table 4: Types of Collaborations

Collaborations	Suppliers
Customers	S01, S02, S04, S05, S06, S07, S09, S10, S11, S12, S13, S14
Other suppliers	S02, S03, S04, S05, S08, S09, S10, S11, S13, S14
Universities and Institutes	S01, S04, S05, S06, S08, S13
Consultants	S04, S05
Others	S05, S12, S14

Most suppliers work closely with their customers. Besides having development projects with the OEMs and system suppliers, collaborations among other suppliers are also quite common. In this way, participants hope to build up long-term partnerships with other suppliers: *“When working together with other suppliers, the aim is to expand our competences which can be applied for several projects”* (S02). The third type of cooperation was collaborations with universities and institutes. This type of partnerships is often chosen since universities research on subjects of the future that could become relevant for the industry: *“They have an expertise in areas which we typically don’t have and which we don’t need permanently but temporary”* (S01). Also, universities represent a great source to find and hire qualified employees. Furthermore, some companies mentioned working with consultancies: *“We are advised by consulting companies, which tell us what they hear from the OEMs”* (S04). Most interviewed suppliers maintain at least one collaboration agreement. Companies that tend to have only a few partnerships mentioned that they experienced some difficulties in the past especially with partners of another cultural background. They also fear to lose their competitive advantage by transferring their know-how (e.g. (S01) or (S11)). Others believe that collaborations are indispensable: *“You have to collaborate with others, for it is not possible to cover the whole value chain”* (S14). Investing in start-ups is another possibility to enhance innovation of a company’s business activity. Within the group of investors, some maintain own venture capital departments that are scouting new investment possibilities ((S02), (S03), (S09)). Others finance their own start-up factories internally where employees can work in small start-ups that emerged from the parent company ((S05), (S08), (S14)). Two suppliers also mentioned that they finance start-up initiatives that evaluate new business ideas and support the winners financially ((S05), (S11)). Nonetheless, not all suppliers have the resources or see the necessity in investing into young businesses: *“We can’t afford to invest in a risk portfolio where from 100 start-ups only one survives”* (S06).

Most suppliers prefer to stay close to their core competence, whether this concerns their own R&D activities, collaborations or M&A: *“[...] there always has to be something similar. Whether the same customers, the same production processes or the same*

product technology [...] otherwise there are others that can do it better because we cannot rely on our experience”, (S01). However, as the transformations require new capabilities in some areas, it is advised to broaden a company’s field of operations. One example for expanded business activities is (S11): The supplier does not only invest in companies that are close to the core competence but represent an *“additional value”*.

Fitness

The final question for the interviewees was: *“What characteristics will be important for the future success of suppliers?”* The most frequent answer was: *“The right employees”*. Hereby, S04 pointed out that *“[...] new employees with new competences are required while the existing employees continue to work for the old products”*. Also, high degrees of flexibility, agility as well as fast and lean processes are required to be well prepared for the future. Nonetheless, external forces are also playing a large part and it is therefore essential that suppliers monitor possible market developments closely: *“[...] you need to develop a good understanding of market developments”* (S03), as well as having the capabilities to react to these changes. Some suppliers addressed cost-efficient production and a strong financial position as essential characteristics. Finding the right timing for identifying, developing and investing will be, based on the interviews, the main task of the future: *“We still have time to shape the transformation processes, but we know that we have to do it actively”* (S14).

CONCLUSION

Most of the interviewed suppliers are strongly affected by the disruptions. The emergence of digital innovations within the automotive industry, e.g. self-driving cars, connectivity and car sharing offer opportunities for new business models and services (Riasanow et al. 2017). New participants may feel attracted as they expect a *“Blue Ocean Strategy”* (Chan Kim & Mauborgne, 2005) in this area by creating is possible. Therefore, a new value network for the automotive industry is probable to arise (Riasanow et al. 2017). The traditional automotive industry model can be characterized by a one-sided supplier-buyer relationship. According to Christensen (Christensen, 1993), emerging technology providers stand for the elimination or replacement of established technologies. Furthermore, value added service providers are able to capture a position of higher relevance in actor-to-actor networks. They can e.g. come from telematics services or driver assistance software. Another type of value-added service providers offers digital services like entertainment or location-based information services. Especially, the trend towards e-mobility seems to influence most of the suppliers directly. Only three companies consider the changes as strong growth drivers for their business model. Nevertheless, the suppliers found ways to adapt to these changes by developing new products that will increase in demand in the future. Others seek to move up the value chain to secure a larger

share of value-added. An alternative reaction from some suppliers that are negatively affected by the transformations is a diversification into new industries. However, it is still questionable if these measures will lead to the same growth rates as in the past, particularly in terms of increasing competition for a smaller number of vehicle parts. In this context, the European Automobile Manufacturers Association (ACEA) mentions – besides sustainable propulsion with clean and energy efficient technologies – two further challenges for the automotive sector that mainly require investments and R&D-efforts: safe and integrated mobility as well as affordability and competitiveness to new automobile regions like Asia (Pries, L. and Wäcken, N., 2020). Also, the findings need to be interpreted with caution as one can assume that all interviewees intended to portray a quite optimistic picture of their company.

This paper intends to provide a first evaluation of the arising structural changes for the German automotive suppliers. The qualitative study identified several variables that could influence the strategic importance of the transformations on the suppliers: company structure, type of product and innovation management. However, it can be expected that there are interdependencies between several variables that extend the complexity to predict future industry developments. One of them might be seen in the digitalization of transport processes and/or innovation forced by climate change resp. global climate protection policies (Canzler, 2020). Another challenge is the emissions scandal at Volkswagen and its future impact on the international automotive industry (Pries, L. and Wäcken, N., 2020). Furthermore, the pandemic consequences are not easy to predict in this context.

In order to increase the understanding about the dimensions of the transformations, further studies with a large scale of participants will be necessary.

LITERATURE

- Baghai, M.; S. Coley; and D. White. 1999. *The alchemy of growth: practical insights for building the enduring enterprise*. New York: Perseus Publishing.
- BMU. 2017. *Klimaschutzbericht 2017*. Accessed August 17, 2018. <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzbericht-klima-2017/>
- Brunetta, F.; P. Boccadelli; and A. Lipparini. 2018. "The Role of Networks for Innovation in Temporary and Project-Based Organizations." *Learning and innovation in hybrid organizations : strategic and organizational insights*. - Cham, Switzerland: Palgrave Macmillan 101-114.
- Bundesverband Car-Sharing. 2018. Accessed September 07, 2018. <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-zahlen/aktuelle-zahlen-daten-zum-carsharing-deutschland>.
- Canzler, W. 2020 "Market and Technology Trends for the Automotive Future in Germany". In: L. Mez et al. (eds.) "The Ecological Modernization Capacity of Japan and Germany" Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, p. 155-169
- Chan Kim, W. and Renée Mauborgne. 2005. *Blue Ocean Strategy: How to Create Uncontested Market Space and Make Competition Irrelevant*. Boston: Harvard Business School Press.
- Christensen, C. 1993. "Exploring the limits of the technology S-curve." *Production and Operations Management, Vol. 1 No.4* 334-357.
- Christensen, C. 2008. *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston: Harvard Business School Press.
- Christensen, C. and M. Raynor. 2013. *The innovator's solution: Creating and sustaining successful growth*. Boston: Harvard Business Review Press.
- Floranta, V. and T. Turunen. 2015. "Platforms in service-driven manufacturing: Leveraging complexity by connecting, sharing, and integrating." *Industrial Marketing Management, Vol. 55* 178-186.
- IEA. 2018. Accessed September 07, 2018. <https://www.iea.org/gevo2018/>.
- Kilian, R.; C. Gauger; S. Stein; and M. Scherer. 2017. „BCG.“ Accessed September 07, 2018. Connected Vehicles. The road to revenue. [online] <https://www.bcg.com/de-de/publications/2017/connected-vehicles-road-revenue.aspx>
- Kline, S. J., and N. Rosenberg. 1986. *An overview of innovation*, p. 275-304, *The positive sum strategy: harnessing technology for economic growth*. Washington: National Academy Press.
- Madhok, A. 2018. *Baidu – New Poster Boy of Autonomous Vehicles*. Accessed March 31, 2019. <https://www.counterpointresearch.com/baidu-new-poster-boy-autonomous-vehicles/>.
- Managing Research Library. Accessed November 14, 2017. <https://managingresearchlibrary.org/glossary/organizational-inertia>.
- Mayring, P. 2000. „Qualitative Content Analysis.“ *Forum Qualitative Social Research, Vol. 1 No. 2 Art. 28*.
- Mayring, P. 2014. „Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution.“ Accessed September 07, 2018. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoar-395173>.
- McKinsey. 2016. „Automotive revolution - Perspective towards 2030. How the convergence of disruptive technology-driven trends could

- transform the auto industry.“ Accessed. November 07, 2018.
<https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/Auto%202030%20report%20Jan%2020216.ashx>
- OICA. 2017. *OICA*. Accessed September 07, 2018.
<http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>.
- Patten, M. L. and M. Newhart. 2017. *Understanding Research Methods*. New York: Routledge.
- Porter, M. 1987. „From Competitive Advantage to Corporate Strategy.“ *Harvard Business Review*, May 1987 43-59.
- Pries, L. and Wäcken, N. 2020. “The 2015 Volkswagen “Diesel-Gate” and Its Impact on German Carmakers“. In: A. Covarrubias V., S. M. Ramírez Perez (eds.) “New Frontiers of the Automobile Industry”. Palgrave Studies of Internationalization in Emerging Markets, https://doi.org/10.1007/978-3-030-18881-8_4
- Proff, H.; T. M. Fojcik; and D. Kilian. 2015. "Value Added and Competences in the Transition to Electric Mobility – An Analysis of the European Automotive Industry." *International Journal of Automotive Technology and Management*, Vol. 15 No. 1 20-42.
- Riasanow, T.; G. Galic; and M. Böhm. 2017. „Digital Transformation in the Automotive Industry: Towards a Generic Value Network.“ *Proceedings of the 24th European Conference on Information Systems (ECIS)*.
- Schumpeter, J. 1939. *Business Cycles: A theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Schumpeter, J. 1942. *Capitalism, Socialism and Democracy*. London: George Allen and Unwin.
- Singh, S. 2018. „Forbes.“ *Global Electric Vehicle Market Looks To Power Up In 2018*. Accessed March 31, 2019.
<https://www.forbes.com/sites/sarwantsingh/2018/04/03/global-electric-vehicle-market-looks-to-fire-on-all-motors-in-2018/#450a3f1e2927>.
- Statistisches Bundesamt. 2019. Accessed June 02, 2020.
<https://www.destatis.de>, Statistisches Jahrbuch 2019 – Kapitel 21 Verarbeitendes Gewerbe, jb-verarbeitendes-gewerbe.pdf
- Statistisches Bundesamt. 2020. Accessed June 02, 2020.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160479/umfrage/umsatz-der-deutschen-automobilindustrie/>
- Stokes, P. and T. Wall. 2014. *Research Methods*. London: Palgrave.
- Tidd, J.; J. Bessant; and K. Pavitt. 2005. *Managing Innovation - Integrating technological, market and organizational change*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Tidd, J., and J. Bessant. 2013. *Managing Innovation - Integrating technological, market and organizational change*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Tushman, M. and P. Anderson. 1986. „Technological Discontinuities and Organizational Environments.“ *Administrative Science Quarterly*, Vol. 31 No. 3 439-465.
- Tushman, M. and C. O'Reilly. 1996. "Ambidextrous Organizations - Managing Evolutionary and revolutionary change." *California Management Review*, Vol. 38 No. 4 8-29.
- VDA. 2016. Zugriff am 07. November 2018.
<https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/20160519-wissmann-deutsche-zulieferer-sind-innovationstreiber.html>.
- VDV. 2016. Zugriff am 09. November 2018.
<https://www.vdv.de/der-oe-pnv-im-urteil-der-bevoelkerung-2016.pdfx>.
- Waters, R. and J. Burn-Murdoch. 2019. "Financial Times." *Waymo builds big lead in self-driving car testing*. Accessed March 31, 2019.
<https://www.ft.com/content/7c8e1d02-2ff2-11e9-8744-e7016697f225>.
- Zheng, B., and J. Xu. 2014. "Carbon Capture and Storage Development Trends from a Techno-Paradigm Perspective." *Energies*, Vol. 7 No. 8 5221-5250.

AUTHORS BIOGRAPHIES

JOHANNA HEILER is currently a student of the Master program in Management at the University of Mannheim. Before, she graduated with a Bachelor's degree in International Business from the Pforzheim University in 2018.

Her email address is: johannaheiler@me.com

VÉRONIQUE GOEHLICH is Professor in the International Business program at Pforzheim University since 2010. Her main teaching interests lie in intercultural management and in Franco-German economic relations. In addition, she directs cooperations with several French partner universities (including the double degree program).

Her email address is: Veronique.Goehlich@hs-pforzheim.de

FRANK MORELLI is Professor of Information Management at Pforzheim University. In addition to fulfilling his teaching duties, he carries out research and practice-based projects in business process management, business intelligence, SAP S4HANA, project management and IT organization. He is the main point of contact for SAP University Alliance and acted as dean of the Master's Program in Information Systems until October 2019. In 2009 he received the Business School's first-ever Best Practice Award.

His email address is: Frank.Morelli@hs-pforzheim.de

EVALUIERUNG VON EVENTBASIERTEN ECHTZEITSYSTEMEN

Alexander Christoph B.Sc

Sven Hornberg M.Sc

Professor Dr.
Frank Herrmann

Josef Witt GmbH
CB1-CIO-AIN

Josef Witt GmbH
CB1-CIO-AIN

OTH Regensburg
Innovationszentrum für Produkti-
onslogistik und Fabrikplanung
Seybothstraße 2
93053 Regensburg
[frank.herrmann](mailto:frank.herrmann@oth-regensburg.de)
@oth-regensburg.de

Schillerstraße 4-12
92637 Weiden

Schillerstraße 4-12
92637 Weiden

[alexander.christoph@witt-
gruppe.eu](mailto:alexander.christoph@witt-gruppe.eu)

sven.hornberg@witt-gruppe.eu

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Echtzeit Datenverarbeitung, Apache Flink, Apache Spark

Zusammenfassung

In Zeiten von Big Data und einer immer mehr vernetzten Infrastruktur gewinnt die Verarbeitung von Echtzeit Daten zunehmend an Bedeutung. Daten, die in dem Moment der Generierung noch aktuell sind, können innerhalb von wenigen Sekunden schon veraltet und unbrauchbar sein. Dieser Herausforderung muss sich auch die Josef Witt GmbH stellen, um konkurrenzfähig zu bleiben und den Kunden ein besseres Einkaufserlebnis zu bieten. Ein Beispiel für eine solche Echtzeit Datenverarbeitung ist die Analyse von Benutzeraktionen in dem Online Shop. Mithilfe dieser können Produktvorschläge noch individueller auf den jeweiligen Nutzer angepasst werden.

Um Echtzeit Daten zu transferieren und zu verarbeiten gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. Insbesondere gibt es viele Stream-Processing Engines, die Programmierschnittstellen zur Verfügung stellen, welche die Verarbeitung von solchen kontinuierlichen Daten vereinfachen.

Diese Stream-Processing-Engines unterscheiden sich jedoch teilweise stark in ihrer Funktion und Performance. Außerdem bietet jede dieser Laufzeitbibliotheken eigene Programmierschnittstellen. Dies erschwert es den Entwicklern unterschiedliche Bibliotheken auf ihre Eignung für die jeweils zu lösende Aufgabe zu testen.

In dieser Arbeit wurde Apache BEAM entwickelt. BEAM bietet eine einheitliche Programmierschnittstelle für die Entwicklung von Stream-Verarbeitungs-Pipelines. Dies ermöglicht es entwickelte Pipelines mit angepasster Konfiguration auf unterschiedlichen Stream-Processing-Engines bereitzustellen.

Im Einzelnen wurde ein generischer Testablauf erschaffen, mit dem die Performance von Stream-Processing-Engines getestet werden kann. Anschließend wurde dieser auf Apache Spark und Apache Flink angewandt, um ihre Tauglichkeit zur Echtzeit Datenverarbeitung zu prüfen. Für Spark und Flink wurde sich aufgrund der hohen Verbreitung der beiden Frameworks, sowie deren Unterschied in der Stream Verarbeitung entschieden.

Als Erfolgskriterien wurde die folgenden Metriken verwendet: der durchschnittliche Datendurchsatz pro Sekunde (Verarbeitete Events pro Sekunde) und die Latenz (Dauer für die Verarbeitung von einzelnen Events).

Um einen kontinuierlichen Datenstrom zu simulieren wurde Apache Kafka als Messaging Broker verwendet. Kafka sendet die einzelnen Spalten eines Testdatensatzes¹ als kontinuierlichen Datenstrom an die Stream-Processing Engines. Diese verarbeiten die Daten und senden sie zurück an Kafka.

Um die Metriken zu berechnen, wurde der von Kafka generierte Zeitstempel für die Erstellung jeder Nachricht verwendet.

Die mit BEAM erstellten Pipelines sind folgende:

- Einfaches weiterleiten der Events.
- Filtern von ca. 45% aller Einträge des ursprünglichen Datensatzes.
- Hinzufügen einer neuen Spalte zu dem Event und weiterleiten des Events mit der neuen Spalte.

Die Ergebnisse der Arbeit belegen, dass der Performance Test zur Evaluierung unterschiedlicher Stream-Processing-Engines geeignet ist.

Bei dem Vergleich von Spark und Flink hat sich herausgestellt, dass der Datendurchsatz pro Sekunde für Spark im Durchschnitt höher war (teilw. +25,3%). Die Latenzen für die Verarbeitung von einzelnen Nachrichten waren jedoch bei Flink besser.

Hieraus lässt sich ableiten, dass Apache Flink für die Verarbeitung von zeitkritischen Echtzeitdaten eine bessere Wahl ist.

Wenn jedoch der Datendurchsatz im Fokus steht, sollte die Verwendung von Apache Spark ebenfalls in Betracht gezogen werden.

¹ <https://www.kaggle.com/mkechinov/ecommerceevents-history-in-cosmetics-shop> von: <https://rees46.com/>

Konzeption und Implementierung einer DICOM-Schnittstelle in einem Data Lake in der Cloud am Beispiel Microsoft Azure

Erik Damm

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Datenverarbeitung
Wilhelm-Leuschner-Str. 13
61169 Friedberg (Hessen)
erik.damm@mnd.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstr. 14
35390 Gießen
harald.ritz@mni.thm.de

Dipl.-Ing. Gert Jan Feick

INFOMOTION GmbH

BU Big Data
Westhafenplatz 1
60327 Frankfurt am Main
gert.jan.feick@infomotion.de

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Cloud Computing, Big Data, Data Lake, DICOM

Zusammenfassung

Die Digitalisierung im Gesundheitswesen und der damit einhergehende medizintechnische Fortschritt bieten große Chancen für ein effizientes Gesundheitssystem und dessen Versorgungsprozesse. Der Forschungscampus „Mannheim Molecular Intervention Environment (M2OLIE)“ beschäftigt sich in diesem Bereich mit der Behandlung oligometastasierter Patienten.

Im Rahmen dieses Forschungscampus soll ein geschlossener Behandlungsprozess entstehen, welcher die Behandlungsdauer verkürzt und die Behandlungsqualität steigern soll. Damit dieser Behandlungsprozess so effizient wie möglich gestaltet werden kann, müssen die Teilschritte der Behandlung zu einem Closed-Loop-Prozess integriert werden. Die Umsetzung eines solchen Closed-Loop-Prozesses bedarf einer zentralen Dateninfrastruktur. Diese Dateninfrastruktur soll als Data-Lake-Architektur in der Cloud auf Microsoft Azure umgesetzt werden. Die Umsetzung wirft dabei verschiedene Fragestellungen auf. Zum einen stellt sich die Frage, wie eine geeignete Data-Lake-Architektur in der Cloud umgesetzt werden kann, und zum anderen, wie sich eine DICOM-Schnittstelle zur Integration der klinischen Basissysteme implementieren lässt.

Ziel der Arbeit ist die Konzeption und Implementierung einer Data-Lake-Architektur in der Cloud auf Microsoft Azure und die Implementierung einer DICOM-Schnittstelle in den Data Lake, für die Integration der klinischen Basissysteme.

Dazu wurden zunächst die Anforderungen, sowohl an die DICOM-Schnittstelle, als auch an die Gesamt-

architektur definiert. Anhand der Anforderungen wurden im nächsten Schritt die für die Implementierung genutzten Azure Komponenten ausgewählt und die Abläufe der verschiedenen Funktionalitäten definiert. Darauf aufbauend folgt dann die Implementierung der einzelnen Azure-Komponenten sowie der zuvor konzipierten Abläufe.

Abschließend wird ein Abschlusstest der Implementierung zur Verifizierung der Umsetzung durchgeführt und deren Ergebnis dokumentiert. Die Frage- und Problemstellungen konnten durch die Konzeption und Implementierung beantwortet werden. Darüber hinaus wurden alle Anforderungen an die DICOM-Schnittstelle und die gesamte Data-Lake-Architektur in der Cloud auf Microsoft Azure erfüllt, getestet und dokumentiert.

Durchführung einer Potentialanalyse zur Prozessautomatisierung mit Robotic Process Automation (RPA) bei einem Automobilhersteller

Christoph Heilmann, M. Sc.

Hochschule Pforzheim
Fakultät Wirtschaft und Recht
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
christophheilmann@t-online.de

Frank Morelli

Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
frank.morelli@hs-pforzheim.de

Kategorie: Masterarbeit

Schlüsselwörter

Robotic Process Automation, Business Process Automation, Geschäftsprozessoptimierung, Information System Design

Zusammenfassung

Der Umschwung in der Automobilindustrie hin zur E-Mobilität belastet die Margen der Unternehmen. Investitionsstrategien im Niedrigzinsumfeld müssen geändert, Kosten gesenkt und neues Know-How eingekauft oder selbst generiert werden. Hohe Kostensenkungspotentiale bieten interne Bereiche bei Automobilherstellern, da sich Einsparungen direkt auf das unternehmerische Ergebnis auswirken. Entsprechend rückt die Automatisierung zugehöriger Geschäftsprozesse zunehmend in den Fokus, zum einen, um die Effizienz und Rentabilität der Unternehmung zu erhöhen. Zum anderen lassen sich Mitarbeiter motivieren, wenn man sie für Aufgaben mit einer höheren Wertschöpfung einsetzt.

Ein weiteres Problem beinhaltet die Zunahme an Komplexität bei Geschäftsprozessen aufgrund erhöhter regulatorischer Anforderungen. Die Systemlandschaften bei den Automobilbauern erweisen sich als sehr komplex, sodass für einige Anwendungsfälle traditionelle Optimierungsmethoden aufgrund fehlender Dokumentation und Standardisierung zu hohen Kosten und Integrationszeiten führen würden. Aus diesem Grund hat Robotic Process Automation (RPA) Einzug in operative Tätigkeitsfelder erhalten. Nach Weissenberg versteht man unter RPA „die automatisierte Bearbeitung von strukturierten Geschäftsprozessen durch digitale Software-Roboter.“

Seitens der Automobilbauer wird nach einer Möglichkeit gesucht, potenzielle Geschäftsprozesse für diese Technologie zu identifizieren und Einsparpotentiale sowie Eigenschaften messbar zu machen. Hieraus ergeben sich verschiedene Fragen: Welche Eigenschaften muss ein unternehmensinterner Prozess besitzen, damit man diesen im Rahmen von RPA automatisieren kann? Wie lässt sich RPA in bestehende

Organisationsstrukturen integrieren und welche Voraussetzungen müssen dafür gegeben sein?

Ziel der Arbeit ist es, in Kooperation mit einem großen Automobilbauer, einen Kriterienkatalog zu konzipieren, durch den sich End-to-End Prozesse oder RPA-fähige Teile von Geschäftsprozessen identifizieren lassen. Hierzu werden RPA-Charakteristika, Abgrenzungen zu anderen Technologien sowie Synergiepotentiale mit traditionellen Maßnahmen zur Geschäftsprozessoptimierung herausgearbeitet. Die Untersuchung basiert auf einer Analyse von Experteninterviews nach Mayring zusammen mit der Auswertung von aktuellen RPA-Studien. Als Ergebnis lassen sich organisatorische, technische, prozessuale, menschliche und wirtschaftliche Kategorien identifizieren. Diese wiederum beinhalten Charakteristika eines idealtypischen RPA-Prozesses.

Der erstellte Kriterienkatalog wird auf Prozesse im Controlling angewendet und die zugehörigen Ergebnisse evaluiert. Innerhalb des qualitativen Rahmens lassen sich Eigenschaften von Prozessen messbar und bewertbar machen, sodass man fachbereichsübergreifend Ergebnisse über eine Nutzwertanalyse vergleichen kann. Zentrales Ergebnis der Thesis ist es, dass neben der Art des Prozesses insbesondere die Kompetenzen der beteiligten Menschen darüber entscheiden, ob ein Geschäftsprozess RPA-fähig ist oder nicht. Fehlende Akzeptanz gegenüber dieser Technologie erweist sich als ein Ausschlusskriterium. RPA lässt sich darüber hinaus nur dann erfolgreich umsetzen, wenn die Unternehmensstrategie dieses Ziel konsequent verfolgt und anhand des Top-Down-Ansatzes alte Strukturen aufbricht. Der Einsatz muss individuell für jeden Geschäftsprozess entschieden und geprüft werden.

Grundlegende Eigenschaften von Standard-RPA werden über einen längeren Zeitraum ihre Gültigkeit behalten, jedoch kommen neue Entwicklungsstufen wie kognitive oder autonome Bots hinzu. Unter diesem Aspekt ist es für ein global agierendes Unternehmen wichtig, Kompetenzen in einem Center of Excellence (COE) zu bündeln, um die Verfügbarkeit der RPA-Technologie sicherzustellen, Skalierungseffekte auszunutzen und das interne Kommunikationsnetz über Power-User in Fachbereichen zentral auszubauen.

Virtuelle Head-Mounted-Display (HMD)-Kollaboration zur Abstimmung von Fahrzeugentwicklungsergebnissen

Alicia Rodriguez Kübler

Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
alicia.rodriguez@gmx.net

Robert Kail

Daimler AG
Mercedesstraße 120
70372 Stuttgart

Frank Morelli

Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Straße 65
75175 Pforzheim
frank.morelli@hs-pforzheim.de

Schlüsselwörter

Virtual Reality, Head-Mounted-Display, Kollaboration in der Automobilindustrie, automobile Wertschöpfungsstrukturen

Problemstellung und Zielsetzung

Die Automobilindustrie sieht sich durch eine immer größer werdende Produktkomplexität und einer steigenden Zahl von Wettbewerbern mit größeren Herausforderungen konfrontiert als je zuvor. Um in einem solch komplexen, volatilen Umfeld zu bestehen, muss es einem Unternehmen gelingen, sich schnell an Änderungen anzupassen. Ein Aspekt zugunsten einer schnelleren Adaption ist die Digitalisierung der Fahrzeugentwicklung. Sie ermöglicht es Kosten bereits in frühen Phasen einzusparen, einen höheren Reifegrad und folglich eine bessere Qualität zu erzielen sowie schnellere Entwicklungszyklen voranzutreiben. Daher sind Computer-aided-Design(CAD)-Systeme, als Grundlage für dreidimensionale, virtuelle Produktmodelle, bereits ein fester Bestandteil der Konstruktionsarbeit. Ein weitergehendes Digitalisierungspotential bietet die Kombination aus CAD-Daten und Virtual-Reality(VR)-Technologien. Während des gesamten Entwicklungsprozesses kann so eine virtuelle Umgebung entstehen, in der man mit Fahrzeugprototypen interagieren und technische Fahrzeugkonzepte überprüfen kann.

Die erwähnten Herausforderungen wirken sich allerdings auch auf die Beziehung zwischen Original Equipment Manufacturer (OEM) und ihren Lieferanten aus. Die Komplexität liegt darin, das optimale Verhältnis zwischen intern durchzuführenden Aktivitäten und extern auszulagernden Aufgaben, beispielsweise an Entwicklungsdienstleister (EDL), zu ermitteln. Das Ziel ist eine für den OEM optimierte Wertschöpfung durch die Reduzierung der Fertigungs- und Entwicklungstiefe und eine effiziente Zusammenarbeit auf Basis kollaborativer Prozesse. Ausgehend von dieser Problemstellung können die Visualisierung von Fahrzeugdaten durch VR-Technologien sowie die Kollaboration zwischen OEM und EDL zwei Erfolgsfaktoren der automobilen Fahrzeugentwicklung darstellen. Ein gemeinsames Betrachten von Fahrzeugdaten soll einer frühen Fehlervermeidung sowie

der digitalen Absicherung des Fahrzeuges in frühen Phasen dienen. Die Vision einer kollaborativen, inhaltlichen Bewertung des Entwicklungs- und Reifegradfortschritts zwischen OEM und EDL definiert das Ziel der Arbeit eine mögliche Head-Mounted-Display(HMD)-Kollaboration zu untersuchen. Grundlage bildet ein Bewertungsschema zur Evaluation verschiedener Entscheidungsalternativen, welches auf qualitativ abgeleiteten Anforderungen einer VR-Kollaborationslösung besteht.

Methodisches Vorgehen

Um Anforderungen an eine kollaborative VR-Lösung abzuleiten, werden zunächst Experteninterviews durchgeführt, transkribiert und qualitativ ausgewertet. Ein daraus resultierender Anforderungskatalog wird mit Hilfe von internen VR-Experten gewichtet und zu einem Bewertungsschema aufgestellt. Dies ermöglicht den Vergleich verschiedener Lösungen auf Basis eines errechneten Nutzwertes. Aus den Erkenntnissen der qualitativen Betrachtung und Nutzwertanalyse lässt sich eine Handlungsempfehlung für das Unternehmen ableiten. Abbildung 1 visualisiert zusammenfassend das methodische Vorgehen der Arbeit.



Abbildung 1: Methodisches Vorgehen.

Anforderungen an eine virtuelle HMD-Kollaboration

Insgesamt werden acht Interviews durchgeführt. Einzelne Mitarbeiter der RD-Fachbereiche des OEMs sowie ein Repräsentant eines EDLs dienen als grundlegende Basis der Informationsgewinnung. Zusätzlich erfolgt die Befragung zweier Personen aus den unternehmensinternen IT-Bereichen in Bezug auf Lieferantenintegration und Netzwerkplanung. Unterschiedliche Rollen wie Projektkoordinator, Bauteilverantwortlicher oder Repräsentant werden involviert, um verschiedene Blickwinkel zu vereinen. Allerdings ist damit noch kein Anspruch auf vollständige

Repräsentativität gegeben. Auf Basis der erhobenen Daten soll eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring Rückschlüsse auf die Kategorisierung des Datenmaterials geben. Hierbei wird die Vorgehensweise der induktive Kategorienbildung eingesetzt. Dafür erfolgt zunächst eine deduktive Kategorienbildung, basierend auf der literarischen Untergliederung von Anforderungen. Diese sind in Tabelle 1 beispielhaft dargestellt.

Code	Hauptkategorie	Gew. [in %]
A	<i>Funktionale Anforderungen</i>	48
B	<i>Anforderungen hinsichtlich Bedienung</i>	4
C	<i>Technische Anforderungen</i>	48

Tabelle 1: Deduktiv abgeleitete Anforderungen an eine HMD-Kollaborationslösung (Beispiel).

Daraufhin sollen alle konkreten Äußerungen zu Anforderungen an eine HMD-Kollaborationslösung transkribiert und den deduktiven Kategorien zugeordnet werden. Es erfolgt inkrementell eine Ausarbeitung induktiver Kategorien bzw. eine Codierung der Aussagen. Das induktiv ergänzte Kategoriensystem inklusive Ausprägungen ist beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt.

Code	Unterkategorie	Gew. [in %]
A.1	<i>Kommunikationsfunktionen</i> - Sprechen (Mikrophon) - Hören (Headset)	24,3
A.2	<i>DMU-Grundfunktionen</i> - Bauteil einfärben - Bauteil ein- und ausblenden - Durchs Fahrzeug schneiden - Bauteil drehen - Virtuelle Messungen	23,4
A.3	<i>DMU-Spezialfunktionen</i> - Bauteile miteinander vergleichen - Prüfung der Montage - Kollisionsprüfung - Fotorealistische Darstellung	8,1
A.4	<i>Aufzeichnung und Speicherung</i> - Gesamte VR-Session - Einzelne Bilder / Ausschnitte - Mit anderen Personen teilen	9
A.5	<i>Anzeigen von Bauteilmetadaten</i>	7,2
A.6	<i>Kollaborationsfunktionen</i> - Avatare - Gleiche Sichtweise / Blickfeld - Laserpointer - Einladung der Teilnehmer	27,9
B.1	<i>Usability</i>	60,9
B.2	<i>Verfügbarkeit eines internen Supports</i>	21,7
B.3	<i>Komplexitätsreduktion</i>	17,4

C.1	<i>Direkte Datenversorgung</i> - Vom / zum Lieferanten - Aus einem PDM-System heraus	15,6
C.3	<i>Datensicherheit und definiertes Rechte- und Rollenkonzept</i> - Rechte und Zugriff des EDLs - Daten vor Zugriff Dritter schützen	48,9
C.4	<i>Geräteunabhängigkeit der Anzeige</i> - Head-Mounted-Display - Desktop-PC - Smartphone	6,7
C.5	<i>Systemperformance</i> - VR Performance - Netzwerkperformance	28,9

Tabelle 2: Induktiv abgeleitete Anforderungen an eine HMD-Kollaborationslösung (Beispiel).

Aufstellen eines Bewertungsschemas

Um mögliche Entscheidungsalternativen zu evaluieren ist ein Schema, basierend auf der Methodik der Nutzwertanalyse, zu definieren. Die zuvor dargelegten Anforderungen fungieren als grundlegende Entscheidungskriterien. Eine Gewichtung der Anforderungen dient der Objektivierung im Sinne einer intersubjektiven Überprüfbarkeit. Hierfür werden VR-Experten des OEMs gebeten, die Kategorien durch die Paarvergleichsmethode zu bewerten. Dabei sollen die Anforderungen je induktiver Kategorie einander gegenübergestellt, das im Vergleich stehende, wichtigere Kriterium ausgewählt und ein Durchschnitt aller Antworten errechnet werden (entsprechend der Gewichtung in Tabelle 1 und 2). Im nächsten Schritt lassen sich die einzelnen Ausprägungen je Entscheidungsalternative bewerten und mit dem Kategoriengewicht multiplizieren. Die Summe aus den resultierenden Werten ergibt den Nutzwert, welcher die Rangfolge der Entscheidungsalternativen bestimmt.

Fazit

Digitale Tools sowie die voranschreitende Integration von Lieferanten in den Produktentstehungsprozess bilden maßgebende Bestandteile der zukünftigen Fahrzeugentwicklung. Eine Zusammenarbeit auf Basis von VR-Technologien ermöglicht die Betrachtung und die Überprüfung von 3D-basierten Fahrzeugentwicklungsständen und soll eine Beschleunigung der Entwicklungszeit bei gleichzeitiger Kostenreduzierung zur Folge haben. Die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit lassen sich für Automobilhersteller als Grundlage für die Evaluation und erfolgreiche Implementierung einer HMD-Kollaborationslösung nutzen. Das Einsatzpotential beschränkt sich dabei nicht nur auf die virtuelle Zusammenarbeit mit EDLs. Vielmehr kann dieses Konzept auch für weitere Entwicklungspartner wie Joint-Ventures oder global verteilte RD-Standorte eingesetzt werden.

Evaluation zur Integration von Docker in den Entwicklungsablauf der TGW Software Services GmbH

Markus Moser (BSc.)

Dipl.-Inf. Andreas
Bergermeier

Professor Dr.
Frank Herrmann

TGW Software Services GmbH

TGW Software Services GmbH

OTH Regensburg

IT-PD CORE

Lindenweg 13

92552 Teunz

E-Mail: markus.moser@tgw-group.com

Team Lead IT-PD CORE

Lindenweg 13

92552 Teunz

E-Mail: andreas.bergermeier@tgw-group.com

Innovationszentrum für

Produktionslogistik und

Fabrikplanung (IPF)

Galgenbergstraße 32,

93053 Regensburg

E-Mail: frank.herrmann@oth-regensburg.de

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Docker, Container, Virtualisierung, Orchestrierung, iWACS®

Zusammenfassung

Die Grundlagen zur Virtualisierung mit Containern existieren schon seit Jahrzehnten, doch erst mit der Veröffentlichung von Docker als Open-Source-Projekt 2013 und der darauffolgenden Popularisierung dieser Technologie taucht diese Thematik in immer mehr Firmen auf. Einer Diamanti-Umfrage aus dem Jahre 2018 zufolge, planten zwei Drittel der befragten IT-Führungskräfte die Verlagerung von Workloads von virtuellen Maschinen auf Container. Zwei Fünftel gaben an, virtuelle Maschinen durch Container ersetzen zu wollen.

Die TGW hatte bislang noch keinen Kontakt mit diesen Technologien und möchte in diesem Bereich auf den aktuellen Stand der Technik kommen. Deswegen soll mit dieser Arbeit eine genauere Evaluation der Möglichkeiten erreicht werden. Der Fokus liegt dabei auf drei einzelnen Themen, die im Folgenden erklärt sind.

CI/CD wird bei der TGW mit zwei verschiedenen Tools durchgeführt, je nachdem ob integriert oder ausgeliefert werden soll. Die Unterschiede zwischen diesen Anwendungen sowie die Problematik mit unterschiedlichen Abhängigkeiten pro Projekt führen zu enormem Aufwand beim Support dieses Ablaufs. Zur Lösung dieser Thematik wird ein fester und generischer Ablauf zum Bau eines jeden Projekts definiert. Dieser läuft innerhalb von Container, die alle notwendigen Abhängigkeiten bereits vorinstalliert haben. Dadurch ist es möglich komplett unabhängig von den verwendeten Tools eine kontinuierliche Integration auszuführen und damit die erheblichen Kosten des Supports einzusparen.

Die TGW-eigene Softwareplattform iWACS® ist modular aufgebaut und wird direkt beim Kunden

installiert, um ein Lager zu verwalten. Das eigens entwickelte Tool zur Auslieferung und Installation der Anwendungen ist alt und mittlerweile sehr komplex. Eine Änderung darin ist mit viel Aufwand und Risiko verbunden. Aus diesem Grund soll evaluiert werden, ob das Thema der Softwareverteilung auf Docker umgestellt werden kann. Durch die Entwicklung eines „Proof of Concepts“ konnte zwar festgestellt werden, dass ein Wechsel theoretisch möglich ist. Vor allem die Investitionen zur Schulung der Mitarbeiter ist mit einem halben Tag pro Mitarbeiter und 179 Mitarbeitern in der IT-Abteilung zu hoch. Auch der erhoffte Gewinn zur Verringerung der Komplexität bleibt aus und bewirkt das Gegenteil, indem zwei statt nur einer Option zur Auslieferung unterstützt werden muss. Dies liegt daran, dass Bestandskunden weiterhin über den alten Weg zur Auslieferung unterstützt werden müssen.

Vorteilhaft ist Docker bei der Unterstützung der Entwickler. Stellvertretend für eine Reihe von Vorteilen wird Vorteilhaftigkeit von Docker bei dem gegenseitigen Beeinflussen durch Datenbankschema-Aktualisierungen, falls zwei oder mehr Entwickler die gleiche Datenbank verwenden, genauer erläutert. Eine Datenbank ist speziell auf die Nutzung mit der firmeneigenen Softwareplattform angepasst, weswegen das Aufsetzen einer solchen mit beträchtlichem Aufwand verbunden ist. Innerhalb eines Docker Containers können die benötigte Datenbank und damit verbundene Einstellungen festgelegt werden. Ein Entwickler kann damit innerhalb von wenigen Sekunden eine störungsfreie Datenbank starten. Dies ermöglicht es die Zufriedenheit und Produktivität der Entwickler zu steigern, während Kosten für Wartezeiten und Support eingespart werden.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass TGW durch ihre bisherige individuelle Softwareentwicklung gefangen ist. Dadurch bewirken die vorliegenden Rahmenbedingungen und die weiteren Anforderungen, dass eine Umstellung derzeit nicht wirtschaftlich ist. Es wird versucht werden, die nützlichen Implementierungen von Docker direkt in iWACS® zu integrieren.

Teilautomatisierung von Prozessschritten in einem mittelständischen ITK-Unternehmen mithilfe der ERP-Lösung Microsoft Dynamics NAV (am Beispiel der Branchenlösung SITE)

Danial Sarfraz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Informationstechnik,
Elektrotechnik und Mechatronik
Wilhelm-Leuschner-Straße 13
61169 Friedberg
danial.sarfraz@iem.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
harald.ritz@mni.thm.de

Prof. Dr. Stephan Euler

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Datenverarbeitung
Wilhelm-Leuschner-Straße 13
61169 Friedberg
stephan.euler@mnd.thm.de

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Automatisierung, Prozessoptimierung, SITE, digitale Transformation, C/AL, Digitalisierung, Enterprise Resource Planning, Microsoft Dynamics NAV, Software

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist im Umfeld der MVC Mobile VideoCommunication GmbH entstanden und thematisiert die Strategieentwicklung zur Automatisierung einzelner Geschäftsprozesse mithilfe des ERP-Systems Microsoft Dynamics NAV und einer darauf aufsetzenden Branchenlösung (SITE).

Das Unternehmen steht derzeit durch die Marktsituation der Anforderung gegenüber, die internen Geschäftsprozesse zu automatisieren und damit effizienter zu gestalten, um die Produktivität der Mitarbeiter zu steigern.

Innerhalb dieser Arbeit wurden die zu betrachtenden Geschäftsprozesse zunächst fundiert ausgewählt, auf Automatisierungspotentiale analysiert und auf Stärken und Schwächen untersucht.

Schließlich wurde mithilfe bestehender Standard-Funktionalitäten und/oder Anpassungen an der Branchenlösung SITE (basierend auf dem ERP-System Microsoft Dynamics NAV) ein prototypischer Entwurf dieser Automatisierungen umgesetzt.

Für die Auswahl der potentialreichsten Prozessschritte hat sich die Verfahrensmethode des Activity Samplings als nützlich erwiesen, durch die mithilfe stichprobenartiger Erfassung der jeweiligen Arbeitsschritte, zu zufällig ausgewählten Zeitpunkten, die Tätigkeitsverteilung ermittelt werden kann.

Die dabei am stärksten auftretenden Prozessabläufe wurden daraufhin detaillierter untersucht, durch die Anforderungen an die Automatisierungspotentiale formuliert werden konnten.

Anschließend wurden diese Anforderungen technisch konzeptioniert und in der Programmiersprache C/AL über verschiedene Lösungen entwickelt.

Um die Zukunftssicherheit der realisierten Lösung sicherzustellen, empfiehlt sich eine perspektivische Migration auf die Extension-Technologie, die das Ziel verfolgt, den bisher aufwändigen Update-Prozess wesentlich zu verschlanken.

Prognose von Aktienkursen mit maschinellen Lernverfahren

Maximilian Schepp

Technische Hochschule Mittelhessen

Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und
Datenverarbeitung
Wilhelm-Leuschner-Str. 13
61169 Friedberg (Hessen)
maximilian.schepp@mnd.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule Mittelhessen

Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
harald.ritz@mni.thm.de

Kategorie

Masterarbeit

Schlüsselwörter

Machine Learning, maschinelles Lernen, Neuronale Netze, Text Mining, Sentimentanalyse, technische Analyse, Web Scraping, Python

Zusammenfassung

Im Zuge der Digitalisierung und im Zeitalter von Industrie 4.0 werden immer mehr Daten generiert. Beispielsweise sorgen mit Sensoren ausgestattete Fertigungsanlagen für eine große Anzahl an Daten, die wichtige Erkenntnisse für die Optimierung und Automatisierung des Fertigungsprozesses in produzierenden Unternehmen liefern. Generell bieten Kunden-, Log- und Sensordaten enormes Informations- und Wissenspotential, das jedoch erst durch die richtigen Vorhersagemodelle ausgeschöpft werden kann. In diesem Zusammenhang eröffnen Algorithmen und Modelle aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz sowohl Unternehmen als auch Privatpersonen völlig neue Möglichkeiten und Chancen, um aus den großen Datenmengen gewinnbringende Informationen für komplexe Sachverhalte zu extrahieren.

Ein komplexes Themengebiet, das außerdem eine große Menge an Daten für Auswertungs- und Analyse Zwecke aufweist, ist die Prognose von zukünftigen Aktienkursen. Bislang ist wenig darüber bekannt, welche Ergebnisse ein Modell erzielt, das zusätzlich zu ausgewerteten Twitter- und Börsennachrichten andere Faktoren klassischer Bewertungstechniken für Aktienkurse einbezieht, um die Anzahl möglicher Einflussfaktoren zu erhöhen. Ein Beispiel für solche klassischen Bewertungstechniken stellen Indikatoren der technischen Analyse der Finanzmärkte dar, die aus den Zeitreihen der Aktienkursdaten berechnet werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll daher beantwortet werden, ob ausgewählte Indikatoren der technischen Analyse mit den Ergebnissen einer Sentimentanalyse von Twitter- und Börsennachrichten kombiniert werden können, um ein Modell des maschinellen Lernens zu

erstellen, mit dem Gewinne am Aktienmarkt erzielt werden können.

Für die Erstellung des Modells wurden Twitter- und Börsennachrichten, sowie historische Aktienkursdaten zu den Unternehmen des Nasdaq 100-Index gesammelt. Die Twitter- und Börsennachrichten wurden für jedes Unternehmen gruppiert und einer Sentimentanalyse unterzogen, wodurch für jeden Tag des Untersuchungszeitraums vom 28.10.2019 bis zum 31.01.2020 jeweils ein Sentiment für die Twitter- und Börsennachrichten pro Unternehmen vorlag. Die gesammelten Daten wurden anschließend in eine einheitliche Struktur zusammengeführt. Durch die Datenzusammenführung konnten die Daten im weiteren Verlauf untersucht werden, um erste Informationen bezüglich der Verteilung und Korrelation der einzelnen Features zu gewinnen. Die im Rahmen der Datenuntersuchung gewonnenen Erkenntnisse wurden im nächsten Schritt für die Vorbereitung der Daten eingesetzt, um den Trainingsprozess des Modells zu optimieren. Die vorbereiteten Daten wurden schließlich für das Training eines vorwärtsgerichteten neuronalen Netzes verwendet, das darauf trainiert wurde, geeignete Kauf- und Verkaufspunkte für ausgewählte Aktien zu identifizieren.

Auf Basis der vorliegenden Testdaten erzielt das erstellte Modell bei einem Startkapital von \$19.000 in einem Zeitraum von 3 Monaten einen Gewinn von \$1.155,83, was einer Rendite von 6,08% entspricht. Die zentrale Erkenntnis ist, dass das erstellte Modell Ergebnisse liefert, mit denen sich vereinzelte, jedoch keine garantierten Gewinne am Aktienmarkt erzielen lassen. Weiterhin werden in der Arbeit Punkte genannt, mit denen sich die Prognosen des Modells weiter verbessern lassen. Die Ergebnisse einer Sentimentanalyse von Twitter- und Börsennachrichten, in Kombination mit den gewählten Indikatoren der technischen Analyse der Finanzmärkte, stellen daher eine solide Datenbasis für die Identifizierung von geeigneten Kauf- und Verkaufspunkten für Aktien dar.

Optimierung eines Prozesses zur Erfolgsmessung von Geschäftsanforderungsprojekten für SAP-Systeme

Tra My Do
Hochschule Pforzheim
Master Information Systems
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
E-Mail: tramy.do@live.de

Prof. Dr. Frank Morelli
Hochschule Pforzheim
Fakultät Wirtschaft und Recht
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
E-Mail: frank.morelli@hs-pforzheim.de

Schlüsselwörter

Geschäftsprozessoptimierung, Geschäftsanforderung, Business-Analyse, Reifegradmodell, CMMI

Zusammenfassung

Der Nutzen ist neben Kosten, Zeit, Qualität und Kundenzufriedenheit ein zentraler Erfolgsfaktor von Projekten. Dieser gilt erst als gesichert, sobald ein Mehrwert im Tagesgeschäft nachgewiesen werden kann. In der Unternehmenspraxis wird häufig jedoch nicht der resultierende Nutzen bewertet, da eine Feststellung erst nach dem Projektabschluss möglich ist. Wird gemäß dem Grundsatz von Planung und Kontrolle die Bewertung des Nutzens nicht durchgeführt, lassen sich keine weiteren Erkenntnisse für die Zukunft daraus ableiten. Dies gilt sowohl für den Abschluss eines Gesamtprojekts als auch für einzelne Anforderungen. Eine Erfolgsmessung erweist sich aber als relevant, da i.d.R. die Vielzahl an Anforderungen, aufgrund begrenzter Kapazitäten, nicht vollständig umgesetzt werden kann. Zugehörige Priorisierungen sollten entsprechend auf einer fundierten Basis erfolgen. Anforderungen, die keinen oder nur einen geringen Mehrwert für das jeweilige Unternehmen liefern, müssen frühzeitig identifiziert und ausgesondert werden um den Nutzen zu maximieren. Denn es tritt häufig der Fall auf, dass umzusetzende Anforderungen mitten im Prozess verworfen oder aufgrund niedriger Priorität immer weiter hinausgezögert werden.

Die Masterarbeit befasst sich mit der Prozessoptimierung zur Erfolgsmessung von Geschäftsanforderungen am Beispiel von ERP-System-Projekten. Folgende Forschungsfragen sollen dabei geklärt werden:

- Wann gilt eine Anforderung als erfolgreich umgesetzt?
 - Wie ist der derzeitige Prozess zu beurteilen und zu verbessern?
 - Wie und wann lassen sich die Erfolgsfaktoren am besten messen?
 - Wie kann sichergestellt werden, dass tatsächlich ein Erfolg bzw. Nutzen für das Unternehmen erzielt wurde?
- Für die Ist-Analyse erfolgt zunächst eine Bestandsaufnahme des Prozesses. Hierfür werden Experten- und User-Interviews durchgeführt, die mittels qualitativer Inhaltsanalyse (nach Mayring) zur Informationsgewinnung beitragen sollen. Anschließend wird der Prozess evaluiert, um die zentralen Handlungsfelder zu identifizieren. Als Bewertungsmethode wird das Capability Maturity Model

Integration (CMMI) Reifegradmodell herangezogen. Dabei werden spezifisch die Fähigkeitsgrade der Prozessgebiete aus der Kategorie „Entwicklung“ zur Beurteilung verwendet. Dies erfolgt aufgrund der gegebenen Situation, dass nur ein konkreter Geschäftsprozess im Unternehmen analysiert wird. Als Ergebnis lässt sich ableiten, dass die Bereiche Anforderungsmanagement, Validierung und Bewertung der Lösung die wesentlichen Handlungsfelder im vorliegenden Unternehmens sind.

Das darauf aufsetzende Business-Analyse-Konzept verfolgt das Ziel, den Ist-Geschäftsprozess zur Erfolgsmessung und insbesondere die Entscheidungsbasis für die Auswahl von Anforderungen zu optimieren. Durch eine Gegenüberstellung mit anderen Business-Analyse Prozessen und der Bewertung durch Reifegradmodell-Kriterien werden Verbesserungspotenziale konzeptionell herausgearbeitet. Als Entscheidungsgrundlage zur Auswahl von Geschäftsanforderungen erfolgt die Festlegung relevanter Kriterien und deren Messung mithilfe eines Fragenkatalogs durch die Prozessbeteiligten. Als wesentliche Kriterien erweisen sich dabei Ziel, Zweck, Messbarkeit der Anforderung (Umfang, Nutzen, Kosten, Auswirkung, Wiederverwendbarkeit), Zuordnung zu einem strategischen Ziel, Priorisierung anhand der Dringlichkeit/Notwendigkeit und die Abhängigkeiten zu anderen Anforderungen oder Prozessen.

Durch vordefinierte Fragen und die gegebene Operationalisierbarkeit der Kriterien sollen das Spektrum der Antwortmöglichkeiten des Anforderungsstellers sinnvoll eingegrenzt werden. Als Resultat lässt sich der Nutzen anhand von Hard Benefits (ROI, Kosteneinsparungen) und Soft Benefits (Kundenzufriedenheit) messen. Eine Ergänzung der Kriterien im Lasten- und Pflichtenheft soll eine dauerhafte Überwachung und Berücksichtigung entlang des Bewertungsprozesses gewährleisten. Der Katalog kann anschließend für die Validierung der Lösung und kontinuierlichen Verbesserung herangezogen werden. Dadurch ist ein transparenter und strukturierter Soll-Ist-Vergleich der Erfolgsfaktoren möglich. Dieser hebt Abweichungen unmittelbar hervor und lässt sich für eine Ursachenanalyse nutzen. Voraussetzung dafür ist die Akzeptanz der beteiligten Mitarbeiter für eine korrekte und detaillierte Erfassung der harten und weichen Kennzahlen. Dies erfordert eine systematische Einführung im Sinne eines Change Managements.

Evaluation von Data-Platform-as-a-Service-Lösungen mit Amazon Web Services anhand einer prototypischen Implementierung

Andreas Vatzolas

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik

Wiesenstraße 14
35390 Gießen

andreas.vatzolas@mni.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik

Wiesenstraße 14
35390 Gießen

harald.ritz@mni.thm.de

Timo Krauskopf (M.Sc.)

INFOMOTION
GmbH

Westhafenplatz 1
60327 Frankfurt

timo.krauskopf@infomotion.de

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Business Intelligence, Big Data, Data Warehouse, Data Platform as a Service, Amazon Web Services, Cloud Computing

Zusammenfassung

Durch die fortschreitende Digitalisierung stehen die Unternehmen in einem immer stärkeren Wettbewerb miteinander und müssen sich auf einem globalen Markt behaupten. Auch der Einsatz neuer Technologien zur Gewinnung unternehmensrelevanter Informationen ist zu einem kritischen Erfolgsfaktor geworden. Klassische Business-Intelligence-Methoden stoßen aufgrund unstrukturierter und komplexerer Datenbestände, wie Social Media oder IoT, immer wieder an ihre Grenzen. Die Trends Big Data und Cloud Computing bieten neue Möglichkeiten, diese Daten zu sammeln, zu analysieren und so nützliche Informationen in einem Wettbewerbsumfeld zu erhalten. Unternehmen sind daher gezwungen, ihre IT stark zu verändern, um am Markt bestehen zu können.

Amazon Web Services bietet eine Cloud-basierte Lösung, um klassische Business-Intelligence-Konzepte und große Datenmengen in einem System zu nutzen. Der Umstieg auf die Amazon Cloud ist jedoch ein großer Schritt und erfordert technologisches Know-how. Es stellen sich neue Herausforderungen und Fragen bzgl. der Sicherheitsaspekte, der Funktionalität sowie der Zuverlässigkeit einer Cloudplattform.

Zu diesem Zweck befasst sich diese Arbeit mit der Implementierung von Data-Platform-as-a-Service-Lösungen unter Verwendung des Cloud-Anbieters Amazon Web Services. Sie soll als Werkzeug zur Wissensbildung dienen. Die relevanten Komponenten der Amazon Cloud werden theoretisch beschrieben und in einem Prototyp praktisch dokumentiert. Mit Hilfe

eines selbst entwickelten Kriterienkatalogs kann der gesamte Prozess eingeordnet und kritisch bewertet werden. Damit bietet die vorliegende Arbeit einen ersten Anhaltspunkt zur Wissensbildung und ein mögliches Modellierungs-werkzeug für Unternehmen, die einen Wechsel in die Amazon-Cloud planen.

Konzeption eines Frameworks zur Analyse der Data Literacy

Laura Ruth Weber

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
laura.weber@mni.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
harald.ritz@mni.thm.de

Dr. Sven Liepertz

INFOMOTION GmbH

BI Strategy &
Digital Solutions
Westhafenplatz 1
60327 Frankfurt am Main
Sven.Liepertz@infomotion.de

Kategorie

Bachelorarbeit

Schlüsselwörter

Data Literacy, Datenkompetenz, Process Framework, Rollen- und Skill-Modell, Kompetenzsteigerung

Zusammenfassung

Seit Jahren steigt das Datenwachstum kontinuierlich an. Diese Menge an Daten birgt ein großes Potential für Unternehmen und bietet ihnen die Möglichkeit, dem steigenden Wettbewerbsdruck durch die Globalisierung standzuhalten. Führungskräften und Mitarbeitern fehlt jedoch die Fähigkeit, fundierte Entscheidungen basierend auf Daten zu treffen. Die Problematik besteht darin, dass aufgrund von fehlendem Datenverständnis aus den wertvollen Daten kein Nutzen gezogen wird und somit datengesteuerte Handlungen ausbleiben. Auslöser für diese Defizite sind mangelndes Bewusstsein für die Relevanz des Themas sowie fehlende Werkzeuge, um die Datenkompetenz (engl. *Data Literacy*) analysieren und steigern zu können.

Damit die *Data Literacy* von Mitarbeitern systematisch und effektiv analysiert sowie gesteigert werden kann, sind ein geeigneter Leitfaden und ein individualisierbares Werkzeug notwendig. Als Ziel dieser Arbeit soll ein Framework entwickelt werden, welches Unternehmen in der Data-Literacy-Analyse und deren Steigerung anleitet. Hierfür wird durch die Untersuchung verschiedener Kompetenzmodelle ein Rollen- und Skill-Modell konzipiert. Es beinhaltet spezifische Rollen-Profile, welche in unternehmensnahe Bereiche gegliedert sind. Den verschiedenen Rollen sind individuelle Kompetenzprofile inklusive Skilllevel zugewiesen. Durch die Integration der Matrix im entwickelten Process Framework, können unternehmensspezifische Soll-Rollen abgeleitet bzw. definiert werden.

Der Kern der Arbeit besteht aus dem Process Framework zur Analyse der *Data Literacy*. Das Vorgehensmodell stellt mit seinen sieben Prozessschritten einen Leitfaden für das Data-Literacy-Projekt dar. Es umfasst spezifische Projektdetails von der Erhebung des Unternehmens-Ist-Zustands sowie der aktuellen Rollen und ihrer Skills über die Definition des angestrebten Soll-Zustands und die Maßnahmenplanung bis zur iterativen Erfolgskontrolle. Das Framework bildet alle notwendigen Prozessschritte, deren Details und Prozessergebnisse übersichtlich in einem Modell ab. Durch die Individualisierbarkeit der beiden Werkzeuge ist eine Anwendung unabhängig von Branche und Unternehmensgröße möglich.

Das Process Framework zur Analyse und Steigerung der Datenkompetenz bildet in Verbindung mit dem entwickelten Rollen- und Skill-Modell zur Konzipierung der Soll-Rollen im realen Einsatz eine gute Grundlage. Unternehmen werden mithilfe der Anwendung des Vorgehensmodells sowie der Rollen- und Skill-Matrix im Transformationsprozess zu einer datengetriebenen Organisation mit datenkompetenten Mitarbeitern angeleitet.

Digitalisierung des Berichtswesens im Bereich Operative Locomotives and Budget Planning: Methoden aus dem Bereich Business Intelligence der DB Cargo AG

Patrick Wehner

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Datenverarbeitung
Wilhelm-Leuschner-Straße 13
61169 Friedberg
patrick.wehner@mnd.thm.de

Prof. Dr. Harald Ritz

Technische Hochschule
Mittelhessen

Fachbereich Mathematik,
Naturwissenschaften und
Informatik
Wiesenstraße 14
35390 Gießen
harald.ritz@mni.thm.de

Dr.-Ing. Christoph Anger

DB Cargo AG

Asset Intelligence Center
Edmund-Rumpler-Str. 3
60549 Frankfurt a. Main
christoph.anger@deutschebahn.com

Kategorie

Masterarbeit

Schlüsselwörter

Digitalisierung (Automatisierung und Visualisierung),
Business Intelligence, Tableau, Scrum

Zusammenfassung

Die Masterarbeit ist in Zusammenarbeit mit der DB Cargo AG entstanden. DB Cargo ist ein führender globaler Logistikdienstleister und der größte Anbieter im Schienengüterverkehr in Europa. Die Gesellschaft gehört zu 100 % der Deutschen Bahn AG. Die DB Cargo beschäftigte im Jahr 2018 28.842 Mitarbeiter und beförderte 255 Millionen Tonnen Güter.

Die beteiligten Abteilungen sind das Asset Intelligence Center (u.a. zuständig für Digitalisierungsprojekte) und Operative Locomotives and Budget Planning. Sie sind beispielsweise für die Instandhaltungs- und Triebfahrzeugbedarfs-Planung verantwortlich.

Aktuell sind die Zeitaufwände, die für die Erstellung des Berichtswesens benötigt werden, sehr hoch. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass viele manuelle Tätigkeiten anfallen.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, durch die Digitalisierung eines Teils des Berichtswesens die Zeitaufwände signifikant zu verringern. Weiterhin wurden mit der Software Tableau Visualisierungen bereitgestellt, die einen Self-Service-Business-Intelligence-Ansatz unterstützen.

Durch den Einsatz von Scrum konnten die Anforderungen der Stakeholder agil aufgenommen und gemanagt werden. Zudem sind durch den Einsatz des KDD-Prozesses sowie CRISP-DM die Visualisierungen realisiert worden. Der KDD-Prozess wurde bei festgelegten Visualisierungen eingesetzt. Hingegen

wurde CRISP-DM bei Analysen, die eine erweiterte Sicht auf eventuelle Ergebnisansätze ermöglichen, verwendet. Dieses Vorgehen ermöglichte die Rückmeldungen und Anmerkungen der Stakeholder direkt einzubeziehen.

Mit verschiedenen Python-Skripten und dem Zusammenführen von Datenquellen wurde eine Teilautomatisierung realisiert. Dadurch sind viele manuelle Tätigkeiten automatisiert worden. Das Aktualisieren der Datenquellen und Starten der Skripte muss allerdings noch manuell erfolgen.

Die anschließenden Datenintegrationen in Tableau sind hingegen automatisiert. Durch den Tableau Server werden die durch die Teilautomatisierung bereitgestellten Datenquellen an jedem Werktag aktualisiert.

In Tableau wurde eine größere Anzahl von Dashboards mit Visualisierungen (Kennzahlen und Analysen) bereitgestellt. Darunter fallen zum Beispiel Plan-Ist-Vergleiche und Ausreißeranalysen. Die Dashboards besitzen ein identisches Layout im Corporate Design der DB. Es sind die Filtermöglichkeiten und verschiedene Buttons vorhanden, welche die Betrachtung weiterer Dashboards oder der Hilfefunktionalität ermöglichen.

Um die Zielsetzung qualitativ zu überprüfen, wurde eine interne Evaluierung anhand der NutzerInnen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Evaluierung ist, dass eine geschätzte Zeitersparnis von einer bis drei Stunden pro Woche bei der Erstellung des Berichtswesens und wiederkehrenden Fragen vorzufinden ist.

Insgesamt wird der DB Cargo mit diesem Projekt eine teilautomatisierte Lösung bereitgestellt, die einen Zeitgewinn sowie einen erweiterten Blick auf die Daten im Bereich Self-Service BI ermöglicht.

Buchbesprechung :

Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik - Strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen

Christian Czarnecki
Wirtschaftsinformatik

Hochschule Hamm-Lippstadt
Marker Allee 76-78
59063 Hamm
Email: christian.czarnecki@hshl.de

Mit diesem Lehrbuch liegt ein umfangreiches Standardwerk zur anwendungsorientierten Wirtschaftsinformatik vor, das sich vor allem durch seine anschaulichen Fallbeispiele, fundierte Darstellung und hohe Aktualität auszeichnet. Mit seinem intensiven Praxisbezug eignet es sich gleichermaßen für Studierende, Dozenten und Wissenschaftler aus verschiedenen Bereichen der Wirtschaftsinformatik sowie Praktiker aus Fach- und IT-Abteilungen.

Die erste Auflage dieses Lehrbuchs erschien 1998 und hat mich persönlich durch das Studium der Wirtschaftsinformatik begleitet. Die vorliegende 9. Auflage verbindet die bewährten, anwendungsorientierten Grundlagen mit aktuellen Themen wie Digitale Transformation, Industrie 4.0, Big Data und agile Softwareentwicklung. Das Buch ist in vier Teile und insgesamt 15 Kapitel gegliedert. Der erste Teil widmet sich Informationssystemen in Unternehmen. Bereits in diesem Teil schaffen die Autoren eine gute Balance zwischen grundlegenden Konzepten zur Planung, Steuerung und Organisation von Informationssystemen sowie aktuellen Themen der Digitalen Transformation. Die Gestaltung der Digitalisierung wird im zweiten Teil ausführlich entlang der Ebenen Strategie, Organisation und Informationssysteme behandelt. Im dritten Teil werden konkrete Anwendungen in Bezug auf ERP, Entscheidungsunterstützung und Vernetzung mit Kunden sowie Lieferanten erläutert. Durch aktuelle Systembeispiele wie SAP HANA und Microsoft Power BI verdeutlichen die Autoren stets den Praxisbezug der vorgestellten Konzepte. Die unterschiedlichen Aspekte der Softwareentwicklung werden umfassend im vierten Teil beleuchtet. Neben einer fundierten Darstellung der Grundlagen werden auch agile Vorgehensmodelle und DevOps behandelt. Die Autoren schließen mit einem Fazit zu den Berufsbildern der Wirtschaftsinformatik.

Das Buch ist bestens als Lehrbuch für Grundlagenveranstaltungen der Wirtschaftsinformatik in Bachelor- und

Masterstudiengängen geeignet. Es zeichnet sich durch eine gelungene Verbindung von Anwendungsorientierung, aktuellen Trends der Digitalisierung und fundierten Methoden des Informationsmanagements aus. Als umfangreiches Nachschlagewerk deckt es eine Vielzahl an Inhalten von den Grundbegriffen der Informations- und Kommunikationstechnologie bis zur strategischen Planung, Nutzung und Entwicklung von Informationssystemen ab. Durch den hohen Praxisbezug sowie die Verbindung von strategischen, organisatorischen und technischen Gestaltungsaspekten ist es für Praktiker aus Fach- und IT-Abteilungen gleichermaßen geeignet. Insgesamt ist das Buch durchweg empfehlenswert und wird von mir seit Jahren in der Lehre an Fachhochschulen eingesetzt.



Abbildung 1: Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik (Buchcover)

LITERATUR

Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik: Strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen, von Alpar, Paul; Alt, Rainer; Bensberg, Frank; Weimann, Peter, 9. Auflage, Springer Vieweg, 516 Seiten, Deutsch, ISBN 978-3-658-25580-0.