

Schlussbericht vom 15.10.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21595 N

Thema

Thema

Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen mittels Maschinellem Lernverfahren

Berichtszeitraum

01.01.2021 - 30.06.2023

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

RIF Institut für Forschung und Transfer e.V.

Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20

44227 Dortmund

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Einleitung | 4 |
| 1.1 | Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung | 4 |
| 1.2 | Arbeitshypothese, Zielstellung und Forschungsschwerpunkt..... | 6 |
| 2. | Stand der Technik und Wissenschaft | 8 |
| 2.1 | Produktionssystem..... | 8 |
| 2.1.1 | Definition eines Produktionssystems | 8 |
| 2.1.2 | Charakteristika eines Produktionssystems | 9 |
| 2.1.3 | Produktivität im Produktionssystem..... | 17 |
| 2.2 | Engpassmanagement | 23 |
| 2.2.1 | Flexibilität, Komplexität und Variabilität im Produktionssystem..... | 23 |
| 2.2.2 | Engpassdefinition über die Engpasstheorie..... | 24 |
| 2.2.3 | Differenzierung verschiedener Engpassarten | 26 |
| 2.2.4 | Methoden des Engpassmanagements | 26 |
| 2.3 | Maschinelles Lernen | 30 |
| 2.3.1 | Datenanalytische Anforderungen | 31 |
| 2.3.2 | Modelle zur Bewertung der Datenqualität..... | 33 |
| 2.3.3 | Vorgehensmodelle für Data Mining-Projekte | 35 |
| 2.3.4 | Evaluationsmaße für Prognose- und Klassifikationsprobleme | 38 |
| 3. | Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen..... | 40 |
| 3.1 | AP 1: Erfassung von Anwenderanforderungen und Festlegung eines Identifikationsverfahrens | 42 |
| 3.2 | AP 2: Definition des Datenbedarfs und Beschaffung der Produktionsdaten aus dem PA 48 | |
| 3.3 | AP 3: Entwicklung und Generalisierung eines Verfahrens zur Prädiktion dynamischer Engpässe..... | 54 |
| 3.4 | AP 4: Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zum Umgang mit prognostizierten Engpässen..... | 59 |
| 3.5 | AP 5: Einführung und Optimierung der Engpassprognose in realen Materialflusssystemen | 62 |

1. Einleitung

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.6 | AP 6: Überführung der Methodik in ein IT-Werkzeug und vorhabenbegleitende Optimierung | 75 |
| 3.7 | AP 7: Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit, Dokumentation und Ergebnistransfer | 83 |
| 4. | Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick | 85 |
| 5. | Ergebnistransfer in die Wirtschaft..... | 90 |
| 5.1 | Transfermaßnahmen nach Laufzeitende | 93 |
| 5.2 | Bewertung des Ergebnistransfers in die Wirtschaft..... | 94 |
| 6. | Abbildungsverzeichnis..... | 96 |
| 7. | Literaturverzeichnis | 98 |
| 8. | Anlagen..... | 143 |

Abkürzungen

| Abkürzung | Beschreibung |
|------------------|--|
| I4.0 | Industrie 4.0 |
| ML | Machinelles Lernen |
| KMU | kleine und mittlere Unternehmen |
| AH | Arbeitshypothesem |
| KEP | Kundenentkopplungspunkt |
| AP | Arbeitspaket(e) |
| CRISP-DM | Cross-Industry Standard Process for Data Mining |
| BDE | Betriebsdatenerfassung |
| MES | Manufacturing Execution System |
| TAP | Teilarbeitspaket(e) |
| NWA | Nutzwertanalyse |
| BNW | Bottleneck Walk |
| APM | Active Period Method |
| ITV | Interdeparture Time Variance |
| PA | Projektbegleitender Ausschuss |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| SPS | Speicherprogrammierbaren Steuerung |
| FFS | Flexibles Fertigungssystem |
| LSTM | Long Short-Term Memory Modell |
| ARIMA | Auto-Regressive Integrated Moving Average-Modell |
| MAPE | Mean Absolute Percentage Error |
| MTO | Mensch-Technik-Organisation |
| IIoT | Industrial Internet of Things |

1. Einleitung

Schwankende Auftragseingänge, ein breites Produktportfolio und eine komplexe, mehrstufige Produktion: das alles sind Rahmenbedingungen, mit denen sich viele produzierende Unternehmen speziell in Deutschland nicht erst seit einigen Jahren konfrontiert sehen. Statische und leicht zu beherrschende Engpässe gehören damit in vielen Produktionsumfeldern der Vergangenheit an. Die Identifikation und Vorhersage dynamischer Engpässe wird zu einer Schlüsselkompetenz in der Verbesserung von Produktionseffizienz und –stabilität. Das Forschungsprojekt „Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen mittels Maschinellem Lernverfahren (kurz: PrEPFlow)“ setzt genau hier an und möchte speziell für kleine und mittlere Unternehmen Lösungen für das dynamische Engpassmanagement entwickeln. Im wissenschaftlichen Fokus der Entwicklungen steht hierbei die praxistaugliche Prognose von Engpässen, die erstmalig auch auf realen Daten produzierender Unternehmen erprobt werden soll.

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Zur Sicherstellung einer langfristigen Wettbewerbsfähigkeit müssen sich produzierende Unternehmen an volatile Märkte anpassen, Kundenanforderungen durch individuell hergestellte Produkte erfüllen und gleichzeitig langfristige Produktivitätsziele sicherstellen (Spath et al. 2013, S. 21). Um eine nachhaltige Produktionseffizienz zu gewährleisten, muss sowohl eine hohe Flexibilität hinsichtlich Variantenvielfalt, Absatzschwankungen und Produktanläufen erreicht, als auch die steigende Komplexität der Produktionsplanung und -steuerung beherrscht werden (Deuse et al. 2016, S. 11ff.). Mit der Engpasstheorie wurde ein Ansatz zur Beherrschung von Flexibilität und Komplexität in Produktionssystemen entwickelt (Goldratt und Cox 1984). Gemäß dieser Theorie wird die Leistungsfähigkeit eines Materialfluss- bzw. eines Produktionssystems durch stets einen Engpass begrenzt, welcher häufig mit dem schwächsten Glied einer Kette verglichen wird (Becker 2008, S. 53f.). Die Konzentration von Verbesserungsmaßnahmen auf diese Kettenglieder stellt den effizientesten Ansatz zur Steigerung der Leistungsfähigkeit eines Gesamtsystems dar (Gupta et al. 2010, S. 2089). Während Optimierungen von Nicht-Engpässen keine Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben, führen Verbesserungen des Engpasses zu einer Aufwertung des gesamten Systems. Trotz der gängigen Verwendung des Begriffs Engpass im allgemeinen Sprachgebrauch, existiert im wissenschaftlichen Diskurs keine gemeinhin anerkannte Engpassdefinition (Lawrence und Buss 1995, S. 342). Für das vorliegende Forschungsprojekt wird der Prozess oder die Ressource, bspw. eine Maschine oder ein Werkzeug, als Engpass bezeichnet, durch den bzw. die während eines gewählten Betrachtungszeitraums die

1. Einleitung

Systemkapazität und dadurch die Systemausbringung begrenzt wird (Klenner et al. 2016, S. 541).

Anstelle unveränderlicher Engpässe treten in industriellen Wertströmen aufgrund von Variabilitätseinflüssen herbeigeführte räumlich veränderliche, dynamische Engpässe auf (Wang et al. 2005, S. 349). Aufgrund variabilitätsbedingter Veränderungen der Einflussfaktoren in einem Produktionssystem wandern diese Engpässe im zeitlichen Verlauf zwischen den Arbeitsstationen (Lawrence und Buss 1994, S. 21). Statt einzelner Momentaufnahmen mit haptischen Methoden erfordert dieses Verhalten eine kontinuierliche Zustandserfassung und -bewertung, um zielgerichtete Optimierungen zu veranlassen (Roser et al. 2003, S. 1079). In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen auf der Entwicklung von Verfahren zur zielgerichteten und echtzeitfähigen Identifikation der Auftrittsorte von Engpässen. Mit den derzeit verfügbaren Analyseverfahren ist es möglich, bei einer gegebenen Datenverfügbarkeit, echtzeitnah Engpassstationen in Materialflusssystemen zu identifizieren. Da jedoch zum Bestimmungszeitpunkt schon eine Einschränkung des Wertstroms auftritt, können Kapazitätsverluste nicht mehr verhindert werden. Durchzuführende Ausgleichs- oder Verbesserungsmaßnahmen besitzen so stets eine reaktive Natur, weshalb sie bei dynamischen Engpässen zu spät bzw. nur mit abgeschwächter Wirksamkeit veranlasst werden können.

Ausgelöst durch die unter dem Oberbegriff Industrie 4.0 (I4.0) zusammengefassten Technologien eröffnen sich in Materialflusssystemen neue Möglichkeiten zur Prädiktion von Engpässen vor ihrer Entstehung. Durch die zunehmende Vernetzung mittels Informations- und Kommunikationstechnik und den fortschreitenden Einsatz von Informationssystemen zur Produktionssteuerung wird eine echtzeitfähige Darstellung von Anlagenzuständen mittels Sensordaten möglich (Kagermann et al. 2013, S 28). Bisher nicht kontinuierlich beschreibbare Zusammenhänge in Wertströmen können maschinell erfasst und ausgewertet werden. Datenbasierte Prognose- bzw. Prädiktionsverfahren (weiterführend synonym verwendet) und der Einsatz Maschinellen Lernens (ML) bauen auf dieser Datenbasis auf und ermöglichen erstmals eine datengetriebene Prädiktion von Engpässen. Vergleichbar mit frühen Entwicklungsstadien der Prädiktiven Instandhaltung (Lee et al. 2017, S. 51f.), werden im wissenschaftlichen Diskurs bisher lediglich experimentelle Vorgehensweisen für eine datengetriebene Prognose von Engpässen diskutiert. Mit deren Hilfe sollen Kapazitäts- bzw. Verfügbarkeitsverluste durch Engpasssituationen echtzeitnah vorhergesagt werden. Erst mit diesen Kenntnissen über zukünftig entstehende Engpässe können logistische oder produktionstechnische Maßnahmen veranlasst werden, um der Entstehung eines Engpasses planerisch vorzubeugen. Mögliche Beispiele für derartige Maßnahmen können der vorausschauende Aufbau von Puffer- bzw. Materialbeständen, der zielgerichtete Einsatz von Mitarbeitenden ohne fest zugeordnete Arbeitsplätze (sog. Springer) oder die Verschiebung von geplanten Wartungsintervallen sein.

1. Einleitung

Zusammenfassend befindet sich die Entwicklung von Engpassprognosen noch in einem frühen Entwicklungsstadium und bisher wurden keine Lösungen zur Anwendung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) entwickelt. Mithilfe existierende Verfahren zur Engpassidentifikation, durch die neuentstandene Datenverfügbarkeit im Zuge der Digitalisierung und durch die erfolgreiche Verbreitung vielseitiger ML-Verfahren zur Prädiktion ist die Ausgangssituation als vielversprechend einzustufen. Bei einer Entwicklung eines geeigneten Prädiktionsverfahrens ist ein vergleichbarer Nutzen- und Interessenszuwachs an den Möglichkeiten der Engpassprognose wahrscheinlich, wie ihn die Prädiktive Instandhaltung seit Beginn der 2010er Jahre erfahren hat (IoT Analytics 2017, S. 15). Die Zielsetzung des Forschungsprojekts stellt deshalb die Entwicklung einer ganzheitlichen Methodik zur Prädiktion dynamischer Engpässe dar. Ausgehend von der Datenerfassung und -verarbeitung, über die Modellierung und Prognose, hin zur praktischen Umsetzung, sollen so Produktivitätsverluste aufgrund von dynamischem Engpassverhalten prädiktiv verhindert werden. Die Methodik wird zur Anwendung in gerichteten Materialflusssystemen und in enger Abstimmung mit KMU entwickelt, um die dort auftretende Variabilität zu bewältigen. Das Vorhaben konzentriert sich insbesondere auf den Umgang mit wertschöpfender Variabilität, die einen direkten oder indirekten Mehrwert bzw. Kundennutzen bietet (Klenner et al. 2016, S. 542). Die Entwicklung einer Methodik zur datengetriebenen Prädiktion von dynamischen Engpässen stellt die zentrale Problemstellung des vorliegenden Forschungsprojekts dar.

1.2 Arbeitshypothese, Zielstellung und Forschungsschwerpunkt

Aus dem Stand der Technik und Wissenschaft und aus den Erkenntnissen der Vorarbeiten des Antragsstellers werden fünf Arbeitshypothesen (AH) formuliert. Die Bestätigung bzw. Falsifizierung der AH strukturiert den systemischen Lösungsweg und trägt damit potenziell zu einer Erweiterung des Wissensstandes bei. Das Forschungsziel ist die Entwicklung einer datenbasierten Methodik zur Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen. Die Beobachtung, dass existierende Verfahren unterschiedlich gut zur Identifikation von Engpässen geeignet sind, führt zur ersten Arbeitshypothese.

AH1: Ein geeignetes Verfahren zur Engpassidentifikation kann als Basis für die Engpassprädiktion bestimmt werden.

Durch die zunehmende Vernetzung durch Informations- und Kommunikationstechnik und die Umsetzung von (teil-)automatischen Produktionssteuerungen sind die zur Prognose benötigten Daten in KMU entweder bereits verfügbar oder können mit geringem Aufwand beschafft werden. Auf diese technologische Entwicklung stützt sich die zweite AH.

AH2: Durch eine Spezifikation des Datenbedarfs wird ein wertschöpfender Einsatz verfügbarer Daten ermöglicht.

1. Einleitung

Im Zentrum des Vorhabens steht die Adaption erfolgreicher ML-Verfahren für eine echtzeitfähige Engpassprognose. Doch mit den bisher eingesetzten Durchschnittswertverfahren ist keine Prognose dynamischer Engpässe in Echtzeit möglich. Da Verbesserungsmaßnahmen so ausschließlich reaktionär ablaufen, wurde die dritte Hypothese abgeleitet.

AH3: Mithilfe leistungsfähiger ML-Verfahren und unter Verwendung eines geeigneten Zeitpunktverfahrens können dynamische Engpässe in Materialflusssystemen zuverlässig bzgl. Zeitpunkt und Auftrittsort prognostiziert werden.

In gerichteten Materialflusssystemen werden produzierende Unternehmen häufig mit ähnlichen Variabilitätseinflüssen konfrontiert. Während eine Engpassprognose noch keinen unmittelbaren, monetären Mehrwert besitzt, müssen erst geeignete Optimierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Engpässen veranlasst werden. Dies führt zur vierten AH.

AH4: Durch die Kombination von Engpassprognosen mit einem Katalog aus zielgerichteten Anpassungsmaßnahmen können Verfügbarkeitsverluste reduziert bzw. verhindert werden.

Die im Vorhaben zu entwickelnde Methodik wird den industriellen Anwendern in Form eines IT-Werkzeugs noch während der Projektlaufzeit zur Validierung zur Verfügung gestellt. Um sowohl die Wirksamkeit der Methodik zur Engpassprognose als auch die Nutzerfreundlichkeit des IT-Werkzeugs sicherzustellen, erfolgt die Entwicklung und Einführung des Werkzeugs in enger Abstimmung mit den Partnerunternehmen. Die fünfte AH baut auf der Beobachtung auf, dass durch eine umfangreiche Unterstützung die zuvor angesprochenen Einführungsbarrieren bei KMU abgebaut werden können.

AH5: Durch die Umsetzung der Methodik in einem IT-Werkzeug können KMU ML-Verfahren ohne Vorkenntnisse anwenden, wodurch Vorbehalte und Barrieren zu Datengenerierung, -aufbereitung und -verarbeitung abgebaut werden.

Es bleibt festzuhalten, dass die Prognose von Engpässen einen wenig erschlossenen Anwendungsfall darstellt und nur durch das Zusammenspiel aus produktions- und datenwissenschaftlicher Entwicklungsperspektive gelöst werden kann. Die Ergebnisse des Vorhabens eröffnen die Möglichkeit dynamische Engpässe zu prognostizieren und bieten somit die Chance, die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen signifikant zu erhöhen. Aus diesem Grund bedarf es einer wissenschaftlich fundierten Erweiterung und Adaption der im Stand der Technik und Wissenschaft (Kap. 2.) aufgezeigten Verfahren. Die zu erwartenden Forschungsergebnisse können sowohl von den produzierenden Unternehmen zur Reduktion von Verfügbarkeitsverlusten eingesetzt, als auch von Dienstleistern als integrierte Anwendung in kommerziell verfügbaren Fertigungsmanagementsystemen vertrieben werden.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel wird der aktuelle relevante Stand der Technik und Wissenschaft für das Forschungsvorhaben beschrieben. Der Fokus liegt auf den Themenbereichen Produktionssystem, Engpassmanagement und ML.

2.1 Produktionssystem

Zunächst soll der Themenbereich "Produktionssystem" betrachtet werden. Dazu wird zunächst der Begriff des Produktionssystems definiert (Kap 2.1.1), bevor die relevanten Merkmale eines Produktionssystems (Kap 2.1.2) und der Begriff der Produktivität in einem Produktionssystem dargestellt werden (Kap 2.1.3).

2.1.1 Definition eines Produktionssystems

Die Definition eines Produktionssystems kann aus verschiedenen Perspektiven erfolgen. Hier sollen zunächst die wichtigsten existierenden Auffassungen dargestellt werden, um anschließend einen für den Kontext des Forschungsvorhabens geeigneten Ansatz auszuwählen.

Aus systemtheoretischer Sicht stellt ein Produktionssystem ein untergeordnetes Subsystem des übergeordneten Systems Unternehmen dar (Corsten und Gössinger 2016, S. 2f.). Ein System besteht dabei aus einer Menge von Elementen, die durch Beziehungen miteinander verbunden sind. Diese Beziehungen können beispielsweise stofflicher oder informatorischer Natur sein (Haberfellner et al. 2018, S. 28; Patzak 1982, S. 19). Andererseits kann ein Produktionssystem auch als ein Bündel von Prinzipien, Methoden und Werkzeugen oder als eine Philosophie verstanden werden. Seine Zusammensetzung ist dabei unternehmensspezifisch und erfolgsentscheidend (Ankele, Staiger und Koch 2008, S. 20ff.; Kirsch 2009, S. 14ff.).

Produktionsnähere Definitionen lassen sich wiederum in ihrer Granularität unterscheiden (Eversheim 1996, S. 1536f.; Wildemann 1985, S. 24). In sehr weit gefassten Interpretationen wird das Produktionssystem als die Gesamtheit aller im Unternehmen ablaufenden Prozesse, die zur Wertschöpfung beitragen, bezeichnet. Dies wird auch als ganzheitliches Produktionssystem oder holistischer Ansatz bezeichnet (Ankele, Staiger und Koch 2008, S. 20ff.; Stockmann 2021, S. 13). Etwas feinere Definitionen spezifizieren in ihren Auslegungen die dem Produktionssystem zugeordneten Funktionen. Dabei werden dem Produktionssystem neben rein produktionstechnischen Funktionen auch Steuerungs- und

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Kontrollfunktionen zugeordnet. (CIRP 2020, S. 11; Krichel, Reichel und Neuhaus 2015, S. 13; Neuhaus 2008, S. 15). Nach einer noch granulareren Auslegung des Begriffs Produktionssystem umfasst dieser ausschließlich die am wertschöpfenden Produktionsprozess beteiligten Elemente, die zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe miteinander verknüpft sind. Hierzu zählen Maschinen, Werkzeuge, Materialien, Menschen und Informationen (Brinzer 2005, S. 18; Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique 2002, S. 22; Gao et al. 2016, S. 619). Genau diese Definition soll im Folgenden aufgrund ihrer besonderen Eignung für den Forschungsschwerpunkt Engpassmanagement verwendet werden.

Darüber hinaus ist in der Literatur eine synonyme Verwendung der Begriffe Produktionssystem und Fertigungssystem in Bezug auf die zuletzt dargestellte Definition festzustellen (Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique 2002, S. 22). Dies soll auch im Rahmen dieses Forschungsprojektes gelten.

Für den Begriff Produktion ist eine weitere Unterteilung in die Bereiche Teilefertigung und Montage möglich (Warnecke 1984, S. 437f.; Wiendahl 2020, S. 41). Die Teilefertigung bezeichnet dabei die Herstellung einzelner Komponenten, die entweder direkt an den Kunden geliefert werden oder im nächsten Schritt in die Montage übergehen (Scholz und Rokitta 1997, S. 195f.; Warnecke 1984, S. 437f.). Die Montage schließt sich in der Wertschöpfungskette an die Teilefertigung an und umfasst Prozesse des Zusammenfügens von Einzelteilen zu Baugruppen oder Endprodukten (Scholz und Rokitta 1997, S. 195f.; Warnecke 1984, S. 437f.). Wenn in diesem Bericht von Fertigung die Rede ist, ist damit die Teilefertigung gemeint.

2.1.2 Charakteristika eines Produktionssystems

In den Möglichkeiten des Eingriffs und der Beherrschung von Engpässen existieren in der praktischen Anwendung eine Vielzahl von Möglichkeiten aber auch Einschränkungen, die in der Mehrzahl der Fälle direkt aus den Charakteristika des betreffenden Produktionssystems abgeleitet werden können. Um die Möglichkeiten der Intervention speziell im Engpassfall nachvollziehen und steuern zu können ist demnach ein Verständnis der grundlegenden Charakteristika unterschiedlicher Produktionssysteme zielführend. Als Grundlage der Kategorisierung von Anwendungsfällen und in der zielgerichteten Auswahl von Engpassmaßnahmen spielen diese eine zentrale Rolle im PrEPFlow-Vorhaben.

Ein Produktionssystem wird durch verschiedene elementare Merkmale charakterisiert (Bochmann 2018, S. 5). Dazu zählen das Organisationsprinzip und die Art der Fertigung, die, wie im Folgenden erläutert wird, je nach Quelle unterschiedliche Bezeichnungen tragen (Bochmann 2018, S. 5ff.; Dangelmaier 2001, S. 314ff.; Wiendahl 2019). Darüber hinaus werden in einigen Quellen auch die Art der Auftragsauslösung und die Variantenanzahl als zentrale Merkmale von Produktionssystemen genannt (Heinrich, Linke und Glöckler 2020,

2. Stand der Technik und Wissenschaft

S. 9ff.; Wiendahl 2019, S. 249ff.). Neben den genannten Merkmalen gibt es weitere Merkmale, nach denen unterschieden werden kann. Im Folgenden werden nur diese vier Merkmale, ihre möglichen Ausprägungen sowie weitere Eigenschaften von Produktionssystemen erläutert.

Art der Auftragsauslösung

Als erstes elementares Merkmal eines Produktionssystems gilt die Art der Auftragsauslösung, die in der bestehenden Literatur auch als Lagerhaltungsstrategie oder Auftragsabwicklungsstrategie bezeichnet wird. Dabei gilt der sogenannte Kundenentkopplungspunkt (KEP) als zentrales Unterscheidungsmerkmal zwischen den verschiedenen Strategien (Wiendahl 2019, S. 249). Als KEP wird der Punkt in der betrieblichen Logistikkette bezeichnet, an dem ein Fertigungsauftrag einem bestimmten Kundenbedarf zugeordnet wird (Hoekstra 1992, S. 6f.; Wiendahl 2019, S. 249). Vor diesem Punkt erfolgt die Abwicklung eines Fertigungsauftrages kundenanonym, während nach dem KEP der Auftrag kundenauftragspezifisch fertiggestellt wird (Wiendahl 2019, S. 249). Dementsprechend basiert die Produktion vor dem KEP auf Prognosen und Berechnungen zukünftiger Bedarfe und nach dem KEP auf tatsächlichen Kundenaufträgen (Hoekstra 1992, S. 6). Die Wahl des KEP erfolgt entsprechend der Strategie des betrachteten Unternehmens in Bezug auf Lieferzeit und Durchlaufzeit (Hoekstra 1992, S. 8; Wiendahl 2019). Grundsätzlich wird zwischen Lagerfertigung, auftragsbezogener Montage, auftragsbezogener Produktion, auftragsbezogene Beschaffung und kundenspezifischer Fertigung unterschieden (Hoekstra 1992, S. 7; Wiendahl 2020, S. 249).

Die Lagerfertigung ist gekennzeichnet durch eine kundenauftragsanonyme Fertigung und Montage, die ausschließlich auf prognostizierten Bedarfen basiert. Die fertigen Produkte werden anschließend in ein zentrales Lager transportiert, aus dem die tatsächlichen Kundenbedarfe direkt bedient werden können. Eine solche Art der Auftragsauslösung ist jedoch aufgrund der Kapitalbindungskosten nur bei einer geringen Variantenanzahl realisierbar (Hoekstra 1992, S. 7; Wiendahl 2019, S. 249f.). Bei der auftragsbezogenen Montage, auch Auftragsmontage genannt, werden Montage- und Fertigungsbereich durch ein Zwischenlager zeitlich entkoppelt. Dabei werden Standardbauteile und Systemelemente wie bei der Lagerfertigung kundenauftragsbezogen in Losen gefertigt. Die Endmontage erfolgt erst nach Eingang eines Kundenauftrages auftragsbezogen (Hoekstra 1992, S. 7; Wiendahl 2019, S. 250). Die auftragsbezogene Produktion folgt einer anderen Logik. Zunächst stellt jeder Kundenauftrag ein eigenes Projekt dar. Lediglich Rohstoffe und Fremdbauteile für zentrale Baugruppen werden entsprechend der Bedarfsprognose, also kundenauftragsanonym, beschafft. Weitere Elemente sind kundenauftragspezifisch (Hoekstra 1992, S. 7; Wiendahl 2019, S. 250). Die auftragsbezogene Beschaffung wird dann gewählt, wenn die Lagerhaltung von Fremdbauteilen aufgrund hoher Kosten oder unregelmäßiger Nachfrage unrentabel ist, wie z.B. bei Guss- oder Schmiedeteilen (Wiendahl 2019, S. 250). Bei der fünften und letzten

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Art der Auftragsauslösung, der kundenspezifischen Fertigung, wird gänzlich auf eine Lagerhaltung von Komponenten verzichtet. Grund hierfür ist, dass jeder Auftrag eine Anpassung oder Neukonstruktion erfordert. Aus diesem Grund wird die Beschaffung erst nach Abschluss der Konstruktion und Teiledimensionierung kundenauftragspezifisch durchgeführt (Hoekstra 1992, S. 7; Wiendahl 2019, S. 250). Die einzelnen Arten der Auftragsauslösung sind in Abbildung 2-1 entsprechend ihrem KEP visualisiert.

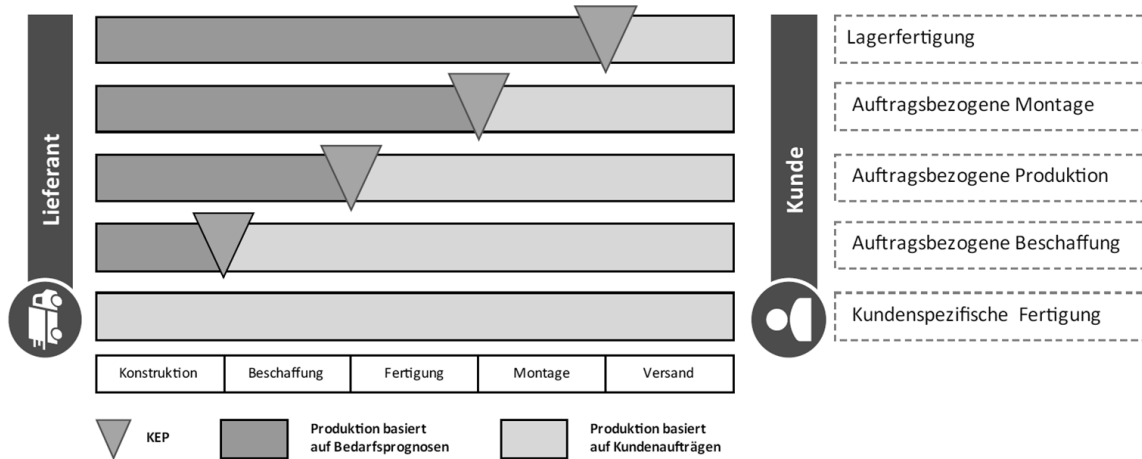


Abbildung 2-1: Arten der Auftragsauslösung in Produktionssystemen (in Anlehnung an Hoekstra 1992, S. 6f.; Wiendahl 2019, S. 249)

In der Praxis ist in der Regel keine dieser Arten der Auftragsauslösung in Reinform zu beobachten, sondern meist eine Kombination verschiedener Lösungen. Eine Modularisierung des Produkts bietet die Möglichkeit, den KEP möglichst nah an den Kunden zu verlagern, um eine schnelle Lieferung zu gewährleisten (Wiendahl 2019, S. 250).

Art des Organisationsprinzips

Neben der Art der Auftragsauslösung kann ein Fertigungssystem auch nach seiner Organisationsstruktur, nach dem Materialfluss, nach dem die Arbeitssysteme während des Fertigungsprozesses durchlaufen werden, sowie nach der räumlichen Anordnung der Arbeitssysteme unterschieden werden. Dies wird als das Organisationsprinzip, das Fertigungsprinzip, die Fertigungsform oder die Ablauforganisation bezeichnet (Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique 2002, S. 30; Dangelmaier 2001, S. 504; Wannewetsch 2010, S. 525; Wiendahl 2019, S. 43). Im Folgenden wird der Begriff Organisationsprinzip verwendet. Als zentrale Frage bei der Wahl des Organisationsprinzips ist zu klären, ob sich das Produktionsobjekt oder die Betriebsmittel bei der Erfüllung der Produktionsaufgabe bewegen (Dangelmaier 2001, S. 315). Daraus ergibt sich auch das wesentliche Differenzierungsmerkmal für die Organisationsprinzipien. Hierbei wird zwischen einer Fertigung nach dem Verrichtungsprinzip und dem Objektprinzip unterschieden (Krycha 1996, S. 1620; Wiendahl 2019, S. 30). Das Verrichtungsprinzip

2. Stand der Technik und Wissenschaft

beschreibt eine räumliche Zusammenfassung funktionsgleicher bzw. technologisch gleicher Fertigungseinrichtungen (Krycha 1996, S. 1620; Steffen 1977, S. 19). Eine Organisation der Fertigungseinrichtungen nach dem Objektprinzip symbolisiert hingegen eine Anordnung der einzelnen Anlagen nach der Bearbeitungsreihenfolge des Produktes (Dangelmaier 2001, S. 318; Habenicht 1993, S. 3386f.; Kletti 2006, S. 13; Liker 2014, S. 149; Louis 2009, S. 75). Unabhängig von diesem Differenzierungsmerkmal lassen sich die existierenden Organisationsprinzipien jedoch auch in standortgebundene und standortunabhängige Organisationsprinzipien unterteilen (Dangelmaier 2001, S. 315; Krycha 1996, S. 1623; Schäfer 1969). Ortsgebunden meint hier die räumliche Konzentration des Transformationsprozesses in Bezug auf das Produkt. Bei der ortsveränderlichen Fertigung hingegen ist der Transformationsprozess auf verschiedene räumliche Positionen verteilt (Dangelmaier 2001, S. 315ff.). Zu den Prinzipien der standortgebundenen Fertigung zählen nach Dangelmaier (2001, S. 315ff.) die Einzelplatzfertigung, die Baustellenfertigung (Baustellenprinzip) und die Wanderfertigung. Die Einzelplatzfertigung wird häufig auch als Werkbankprinzip, Komplettbearbeitung oder arbeitsteilige Organisation bezeichnet (Dangelmaier 2001, S. 315; Warnecke 1995, S. 12). Für dieses im Folgenden beschriebene Organisationsprinzip wird im weiteren Verlauf dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung der Begriff der Werkbankprinzip verwendet. Da die Wanderfertigung dem Baustellenprinzip sehr ähnlich ist, wird sie im Folgenden nicht weiter erläutert. Im Folgenden werden die fünf Organisationsprinzipien: Werkbank-, Baustellen-, Verrichtungs-, Fluss- und Gruppenprinzip erläutert.

Das *Werkbankprinzip* zeichnet sich dadurch aus, dass Produkte vollständig an einem Arbeitsplatz hergestellt werden, wobei die wesentlichen Betriebsmittel ortsgebunden sind und nicht produktbezogen kombiniert werden müssen (Dangelmaier 2001, S. 315; Warnecke 1995, S. 12). Darüber hinaus ist eine Zuordnung zum Verrichtungs- oder Objektprinzip hinfällig, da während des Produktionsprozesses kein Materialfluss zwischen den Arbeitsplätzen stattfindet.

Das *Baustellenprinzip* ist gekennzeichnet durch ortsfeste Werkstücke sowie ortsveränderliche Betriebsmittel und Produktionspersonal, die auftragsbezogen am Ort der Leistungserstellung zusammengeführt werden (Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique 2002, S. 34; Dangelmaier 2001, S. 315; Schäfer 1969, S. 163). Die Arbeitsteilung kann dabei je nach Auftrag nach dem Verrichtungsprinzip oder nach dem Objektprinzip erfolgen. Insbesondere die Größe und das Gewicht des Werkstücks kennzeichnen das Baustellenprinzip (Dangelmaier 2001, S. 315f.; Wiendahl 2019, S. 46).

Das *Verrichtungsprinzip* ist durch eine räumliche Konzentration funktionsgleicher Fertigungseinrichtungen gekennzeichnet. Seine räumlich zusammengefassten, ortsfesten Betriebsmittel werden als Werkstätten bezeichnet. So sind beispielsweise alle Drehmaschinen an einem Ort, der Dreherei, konzentriert (Bauer 2021, S. 1702; Habenicht 1993, S. 3386; Kletti 2006, S. 2006; Krycha 1996, S. 1620; Wiendahl 2019, S. 44). Der Materialfluss erfolgt dabei

2. Stand der Technik und Wissenschaft

produktspezifisch und in Fertigungslosen, so dass der Transport des gesamten Loses zur nächsten Werkstatt erst nach der Bearbeitung des letzten Werkstückes des Loses erfolgt (Dangelmaier 2001, S. 316; Kletti 2006, S. 12; Steffen 1977, S. 19; Wiendahl 2019, S. 44). Der produktspezifische Fluss der Werkstücke durch das Fertigungssystem bietet eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Variabilität der Werkstücke und die Möglichkeit einer guten Auslastung der Betriebsmittel (Habenicht 1993, S. 3386; Kletti 2006, S. 12; Louis 2009, S. 76; Steffen 1977, S. 19; Warnecke 1984, S. 447; Wenzel 2001, S. 157; Wiendahl 2019, S. 44). Dies bedeutet aber auch häufig sich kreuzende und unübersichtliche Materialflüsse. Diese gehen mit einem hohen Koordinationsaufwand insbesondere für die Transport- und Logistikorganisation einher. Zudem führen die variablen Materialflüsse in Verbindung mit den stationären Produktionsanlagen zu Ineffizienzen, so dass lange Durchlaufzeiten und eine hohe Kapitalbindung keine Seltenheit sind (Habenicht 1993, S. 3386; Liker 2014, S. 148f.; Louis 2009, S. 76; Warnecke 1984, S. 448; Wenzel 2001, S. 157; Wiendahl 2019, S. 44).

Das *Flussprinzip* ist gekennzeichnet durch eine Organisation der Fertigungseinrichtungen nach der Arbeitsfolge des Erzeugnisses. Dies wird auch als Organisation nach dem Objektprinzip bezeichnet. Der Produktionsfluss erfolgt dabei immer in eine Richtung, was zu Verschlechterungen in der Flexibilität der Durchlaufreihenfolge der einzelnen Arbeitssysteme führt (Louis 2009, S. 73f.; Steffen 1977, S. 19; Warnecke 1984, S. 447; Wiendahl 2019, S. 46). Durch den geradlinigen Materialfluss bietet das Flussprinzip neben kurzen Durchlaufzeiten und geringen Beständen im Gegensatz zum Verrichtungsprinzip auch die Möglichkeit, gleichartige Fertigungseinrichtungen an verschiedenen Stellen im Wertstrom einzusetzen (Steffen 1977, S. 19; Warnecke 1984, S. 1995; Wiendahl 2019, S. 46). Allerdings bringt diese Form des Materialflusses auch einige Nachteile mit sich. Zum einen ist die Auslastung der einzelnen Arbeitssysteme unterschiedlich, zum anderen sind diese häufig auf ein bestimmtes Produkt spezialisiert oder nur mit großem Aufwand umrüstbar, so dass die produzierbare Produktpalette eingeschränkt ist (Habenicht 1993, S. 3387). Ein wirtschaftlicher Betrieb im Rahmen des Flussprinzips ist daher nur bei hohen Stückzahlen des gleichen Produktes über einen längeren Zeitraum möglich (Kletti 2006, S. 13; Louis 2009, S. 75; Steffen 1977, S. 20). Uneinigkeit besteht in der Literatur darüber, ob der Begriff der Reihenfertigung synonym mit dem der Fließfertigung verwendet werden kann. Habenicht (1993, S. 3386f.) sieht diese Synonymität als gegeben an, während Warnecke (1984, S. 446f.) eine Differenzierung der beiden Organisationsprinzipien anhand der zeitlichen Abhängigkeit zwischen den einzelnen Arbeitssystemen vornimmt. Bei der Reihenfertigung besteht keine zeitliche Abhängigkeit, wobei die dadurch möglichen unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der einzelnen Fertigungseinrichtungen durch unterschiedliche Kapazitätsauslastungen und Puffer ausgeglichen werden können (Warnecke 1984, S. 447). Bei der Fließfertigung liegt nach Warnecke (1984, S. 447) jedoch eine solche zeitliche Abhängigkeit vor, so dass die Bearbeitungszeiten genau aufeinander abgestimmt sind und keine Wartezeiten zwischen den Arbeitssystemen entstehen. Dies kann auch als Taktung bezeichnet werden (Dangelmaier

2. Stand der Technik und Wissenschaft

2001, S. 318; Kletti 2006, S. 13). Allerdings geht damit auch eine höhere Störanfälligkeit des Produktionssystems einher (Kletti 2006, S. 13; Warnecke 1984, S. 447). Andere Autoren wie Wiendahl (2019, S. 46) oder Dangelmaier (2001, S. 318) trennen nicht zwischen diesen Eigenschaften und lassen die Möglichkeit einer weitestgehenden Taktung mit der Möglichkeit des Einsatzes von Zwischenpuffern offen und fassen dies unter dem Prinzip der Fließfertigung zusammen. Genau dieser integrative Ansatz soll auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verfolgt werden.

Hinsichtlich ihrer Organisationsstruktur wird das *Gruppenprinzip* als Kombination des Objekt- und des Verrichtungsprinzips verstanden und vereint Qualitäten des Baustellen- und des Flussprinzips (Krycha 1996, S. 1621; Louis 2009, S. 76; Wannewetsch 2010, S. 527). Dazu zählen die Kosten- und Produktivitätsvorteile des Flussprinzips sowie die Flexibilität der Fertigung nach dem Baustellenprinzip (Habenicht 1993, S. 3387; Kletti 2006, S. 13; Louis 2009, S. 76f.). Im Rahmen des Gruppenprinzips werden Betriebsmittel, die für die wiederkehrende Produktion bestimmter Teilefamilien oder Baugruppen benötigt werden, räumlich konzentriert. Innerhalb dieser Baugruppe werden die einzelnen Betriebsmittel dann nach dem Flussprinzip angeordnet (Dangelmaier 2001, S. 318; Habenicht 1993, S. 3387; Wannewetsch 2010, S. 527). In der Literatur herrscht Uneinigkeit darüber, ob es sich bei der sogenannten Inselfertigung um eine Sonderform des Gruppenprinzips oder um ein Synonym zum Gruppenprinzip handelt (CIRP 2020, S. 30f.; Habenicht 1993, S. 3387; Wannewetsch 2010, S. 527; Wenzel 2001, S. 157; Wiendahl 2019, S. 44). Das Prinzip der Inselfertigung wird in den genannten Quellen jedoch weitgehend synonym verwendet, weshalb die Inselfertigung als Unterglied des Gruppenprinzips angesehen und dies auch im Folgenden als gegeben angenommen wird. Im Kontext des Forschungsvorhabens wird der Begriff des Gruppenprinzips verwendet.

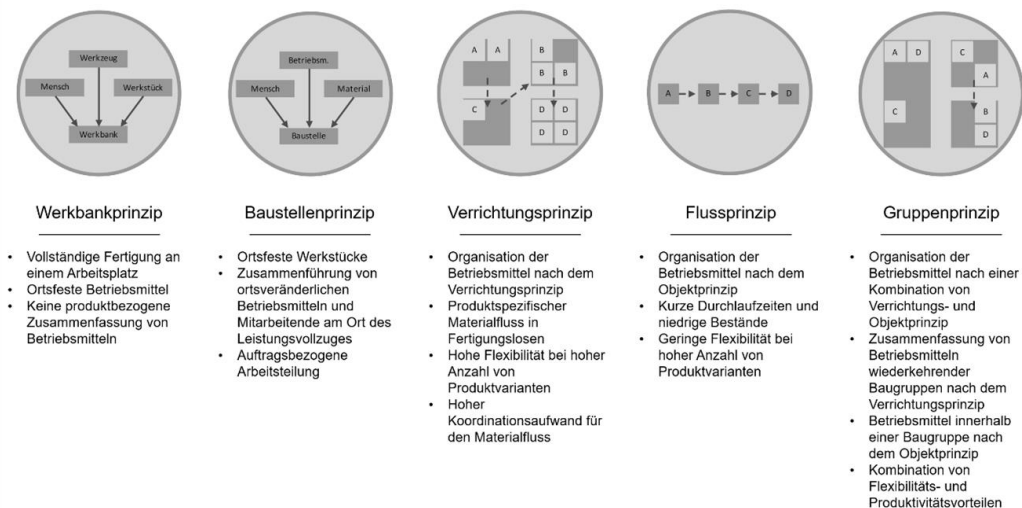


Abbildung 2-2: Organisationsprinzipien in Produktionssystemen (Habenicht 1993, S. 3387; Kletti 2006, S. 13; Louis 2009, S. 76f.; Wannewetsch 2010, S. 527; Wiendahl 2019, S. 44)

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Zum besseren Verständnis sind die für dieses Forschungsvorhaben relevanten Organisationsprinzipien mit ihren zentralen Eigenschaften in

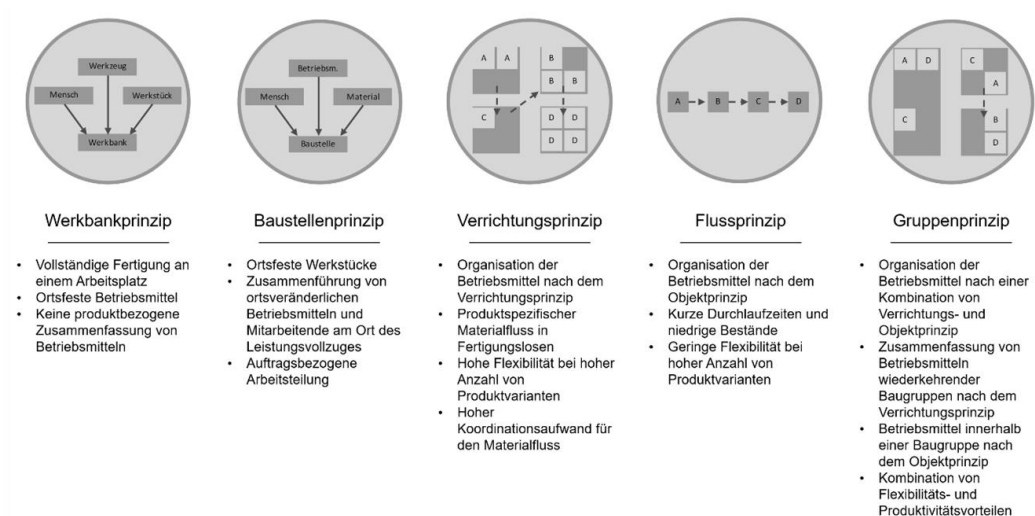


Abbildung 2-2 visualisiert.

Fertigungsart

Neben der Art der Auftragsauslösung und der Art des Organisationsprinzips wird ein Produktionssystem weiterhin durch die Art der Leistungswiederholung definiert. Diese wird in Form der Fertigungsart ausgedrückt (Schäfer 1969, S. 59ff; Wiendahl 2019, S. 43). Im Folgenden werden nun alle existierenden Fertigungstypen anhand ihrer Merkmale dargestellt. Als zentrale Merkmale, die eine Differenzierung der einzelnen Fertigungsarten ermöglichen, sind die Auflagenhöhe, die Unterbrechungsdauer sowie die Anzahl der sukzessiv produzierten Produkte anzusehen (Louis 2009, S. 77).

Die *Einmalfertigung* zeichnet sich durch eine geringe Auflage aus, d.h. es wird nur eine kleine Stückzahl produziert. Außerdem wird das Produkt nicht wiederholt (Wiederholhäufigkeit = 0). Die Einmalfertigung ist i. d. R. mit den Organisationsprinzipien Baustellen- oder Verrichtungsprinzips verbunden (Lödding 2016, S. 126).

Bei der *Einzel- und Kleinserienfertigung* wird ein Produkt oder eine geringe Anzahl von Produkten hergestellt, so dass über einen Fertigungsauftrag hinaus keine Leistungswiederholung stattfindet (Dangelmaier 2001, S. 314; Glaser et al. 1992, S. 385). I. d. R. handelt es sich um kundenindividuelle, auftragsbezogene Produkte besonderer Art, wie z. B. Schiffe oder Flugzeuge. Häufig wird daher im gleichen Zusammenhang auch von Maß- oder Sonderanfertigung gesprochen (Dolezalek und Warnecke 1981; Schäfer 1969, S. 71; Warnecke 1984, S. 440; Wenzel 2001, S. 155). Die Einzelfertigung zeichnet sich daher durch einen hohen Improvisationsgrad und einen hohen monetären und zeitlichen Aufwand für Konstruktion und Planung aus (Bauer 2021, S. 1702; Warnecke 1984, S. 440). Sollen jedoch

2. Stand der Technik und Wissenschaft

wiederkehrend gleiche Produkte hergestellt werden, ist eine andere Art der Fertigung erforderlich, die eine sogenannte Mehrfachfertigung ermöglicht (Wiendahl 2019, S. 43).

Bei der seriellen Fertigung eines heterogenen Produktspektrums in Losen mit begrenzter Stückzahl spricht man stattdessen von *Serienfertigung* (Bauer 2021, S. 1702; Dolezalek und Warnecke 1981; Habenicht 1993, S. 3386; Louis 2009, S. 79; Warnecke 1984, S. 440). Die Serienfertigung wird häufig mit hohen Stückzahlen in Verbindung gebracht. Sie kann jedoch auch mit kleineren Stückzahlen erfolgen. Es kann zwischen Klein-, Mittel- und Großserienfertigung unterschieden werden (Schäfer 1969, S. 69; Warnecke 1984, S. 440; Wiendahl 2019, S. 43). Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zur Einzel- und Massenfertigung ist die Komplexität der Produkte, die bei der Serienfertigung höher als bei der Massenfertigung, aber geringer als bei der Einzelfertigung ist (Kautz 1996, S. 64). Darüber hinaus ermöglicht die Serienfertigung trotz der Heterogenität des Produktionsprogramms die Nutzung von Kostendegressionseffekten. Dies kann als ein grundsätzlicher Vorteil der Serienfertigung angesehen werden (Habenicht 1993, S. 3386).

Eine Fertigungsart, die eine so genannte Mehrfachfertigung ermöglicht, stellt die *Massenfertigung* dar. Hierbei werden gleichartige Produkte in hoher Stückzahl und über einen längeren Zeitraum hergestellt (Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique 2002, S. 20; Schomburg 1980, S. 22; Warnecke 1984, S. 440; Wiendahl 2019, S. 43). Dabei kommen meist spezialisierte Fertigungseinrichtungen zum Einsatz, die in der Regel zu Linien verkettet sind und von den Werkstücken in der gleichen Reihenfolge durchlaufen werden (Bauer 2021, S. 1702; Dolezalek und Warnecke 1981; Kletti 2006, S. 18). Eine Kompensation der damit verbundenen Kosten ergibt sich aus den hohen Stückzahlen und dem damit verbundenen Fixkostendegressionseffekt. Zudem kann der Erfahrungskurveneffekt genutzt werden (Habenicht 1993, S. 3386). Zentraler Nachteil der Massenfertigung ist die geringe Flexibilität in der Auftragssteuerung, so dass Aufträge kaum oder nur mit erheblichem Aufwand zwischen den Produktionsressourcen verschoben werden können (Kletti 2006, S. 18).

Eine Zusammenfassung der für dieses Forschungsvorhaben relevanten Fertigungsarten ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

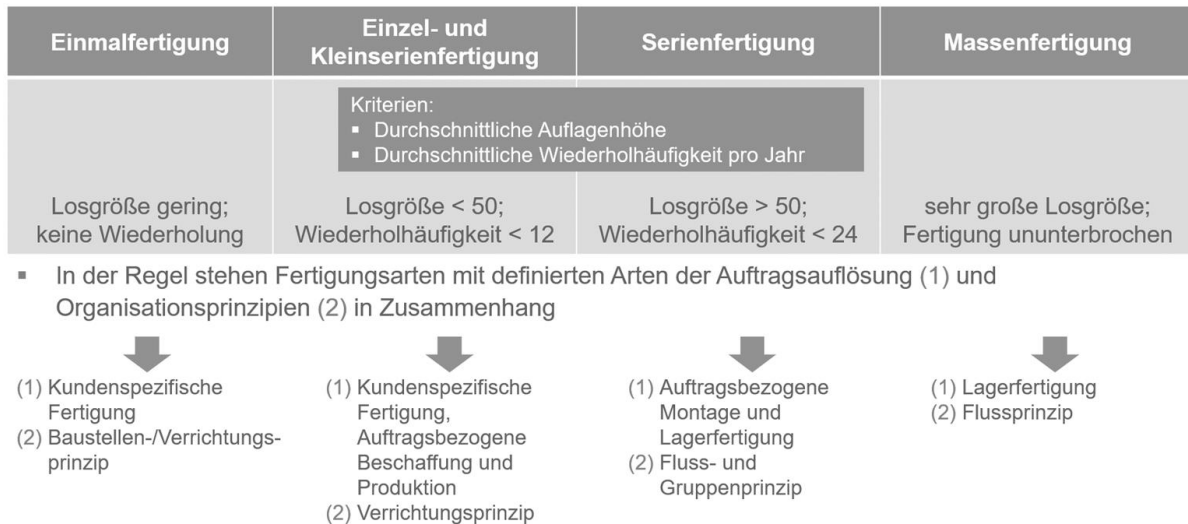


Abbildung 2-3: Klassifikation von Fertigungsarten in Produktionssystemen (i. A. a. Lödding 2016, S. 126)

Varietanzahl

Auch die Variantenanzahl einem Produktionssystem ist im Kontext dieses Forschungsvorhabens ein wichtiges Charakteristikum. Je höher die Variantenanzahl, desto komplexer wird i. d. R. ein Materialflusssystem (Lödding 2016, S. 132). Ziel ist es, die Anzahl der Varianten innerhalb eines Produktionssystems insgesamt gering zu halten und diese zudem zu einem möglichst späten Zeitpunkt zu bilden. Hierbei helfen unter anderem Baukastensysteme, Plattformkonzepte und Gleichteilestrategien (Wiendahl et al. 2004; Röhrig 2002). Im Rahmen dieses Projektes wird eine Unterteilung in Variantenklassen vorgenommen: Keine, Gering, Mittel und Hoch. Abbildung 2-4 zeigt, wie sich die Klassen unterscheiden.



Abbildung 2-4: Unterteilung der Variantenanzahl in einem Produktionssystem

2.1.3 Produktivität im Produktionssystem

Als zentrales Ziel eines Produktionsprozesses gilt es die Vorleistungen von Lieferanten so zu kombinieren und zu transformieren, dass ein Mehrwert geschaffen wird, der vom Kunden nachgefragt und vergütet wird. Dies wird als Wertschöpfung bezeichnet (vgl. Haller 1997, S. 30 ff.; Hoekstra 1992, S. 6; Nebel 2002, S. 5; Reim 2022, S. 9). Bei genauer Betrachtung realer

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Produktionsprozesse fällt auf, dass nicht alle durchgeführten Aktivitäten tatsächlich zur Wertschöpfung beitragen und somit den Wert des produzierten Erzeugnisses nicht erhöhen (vgl. Klevers 2009, S. 15). Deshalb wird zwischen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten differenziert. Grundsätzlich gilt, dass ein Unternehmen einen möglichst hohen Anteil wertschöpfender Tätigkeiten durchführen sollte. In der Praxis ist das Verhältnis von wertschöpfenden zu nicht wertschöpfenden Tätigkeiten jedoch meist gering (vgl. Elsner und Pelousek 1996, S. 141). Eine Kategorisierung in wertschöpfende und nicht wertschöpfende Aktivitäten lässt sich unter Zuhilfenahme der Frage, ob ein potenzieller Kunde diese monetär entlohnen würde, vollziehen (vgl. Bergmann und Lacker 2009, S. 161; Elsner und Pelousek 1996, S. 143). Nicht wertschöpfende Tätigkeiten werden in bestehenden wissenschaftlichen Ausarbeitungen auch als Verschwendung bezeichnet, womit eben jener nicht wertschöpfender Verbrauch von Ressourcen, Rohwaren oder Informationen gemeint ist (vgl. Bergmann und Lacker 2009, S. 161; Klevers 2009, S. 15; Schröder und Tomanek 2015, S. 17). Als Beispiel dafür kann der Transport von Bauteilen zum Montageort bezeichnet werden (vgl. Bergmann und Lacker 2009, S. 161). Nach Ohno (2013, S. 46 f.) existieren die folgenden sieben Verschwendungsarten in produzierenden Unternehmen: Verschwendung durch Überproduktion, Verschwendung durch Wartezeit, Verschwendung durch Transport, Verschwendung durch mangelhafte Organisation des Arbeitsprozesses, Verschwendung durch Lager und Puffer, Verschwendung durch Bewegung und Verschwendung durch Teile von mangelhafter Qualität.

Zur Steigerung des Verhältnisses zwischen wertschöpfenden und nicht wertschöpfenden Tätigkeiten zielt die Wertschöpfungsoptimierung auf eine weitest gehende Eliminierung der nicht wertschöpfenden Tätigkeiten ab (vgl. Bergmann und Lacker 2009, S. 161; Elsner und Pelousek 1996, S. 143 f.; Schröder und Tomanek 2015, S. 7). Dabei wirkt sich die Wechselbeziehung zwischen Verschwendung und Wertschöpfung neben ihrer pekuniären Wirkung auch auf die Durchlaufzeit des Produktionssystems aus. Diese gilt als weitere zentrale Kennzahl im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems (vgl. Schröder und Tomanek 2012, S. 8; Wöhe, Döring und Brösel 2016, S. 337 f.). Die Durchlaufzeit berechnet sich aus der Summe aller Bearbeitungszeiten der Fertigungseinrichtungen des Produktionssystems und aller Übergangszeiten. Übergangszeiten sind dabei die Zeitperioden zwischen zwei Bearbeitungszeiten. Sie setzen sich als Summe aus Transport-, Rüst-, Kontroll- und Lagerzeiten zusammen und gelten als Verschwendung (vgl. Schröder und Tomanek 2015, S. 16; Wöhe, Döring und Brösel 2016, S. 337 f.).

Dennoch gilt die Produktivität als wichtigste betriebswirtschaftliche Kennzahl zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit und des langfristigen Erfolgs eines Unternehmens (vgl. Elsner und Pelousek 1996, S. 141; Huang et al. 2003, S. 513; Laqua 2005, S. 648; Wildemann 2018, S. 41). Bezogen auf einen Produktionsprozess gilt die Produktivität als Verhältnis zwischen Prozessinput, sprich den eingebrachten Faktoren, und Prozessoutput, also der erbrachten

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Leistung des Prozesses (vgl. Kahle 2018, S. 8; Nebl 2002, S. 3; Ortmann 1995, S. 98; Weber, Jeske und Lennings 2018b, S. 426b; Wildemann 2018, S. 69). Um jene Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten, gilt es für Unternehmen die Produktivität ihres Produktionssystems zu steigern, um dadurch einerseits Stückkosten zu verringern und andererseits existierende Verschwendung zu senken (vgl. Fleischer, Weismann und Niggeschmidt 2006, S. 675 ff.; Subramanian et al. 2021, S. 734; Wildemann 2018, S. 41). Natürlich bedarf es durch den daraus entstehenden weltweiten Drang nach Produktivitätsverbesserungen geeigneter Indikatoren um die Produktivität zu messen (vgl. Muchiri und Pintelon 2008, S. 3517; de Ron und Rooda 2005, S. 190). Als Unterscheidungsmerkmal zwischen Produktivitätskennzahlen gilt dabei, ob als Outputgröße ein monetärer Kennwert, wie der Umsatz, oder ein mengenbezogener Kennwert, wie Stückzahlen, herangezogen werden (vgl. Weidemann und Sender 2014, S. 113). In der Realität ist es nicht unüblich, dass Verflechtungen von mengenbezogenen und monetären Kennzahlen zu beobachten sind, was zu einer Abnahme der Transparenz und in der Folge zu erschwerten Produktivitätsanalysen führt (vgl. Dikow 2006, S. 19 ff.). Deshalb wurde in Dikow (2006, S. 19) und Nebl (2002, S. 3) ein Produktivitätskonzept entwickelt, das zwischen Gesamtproduktivität und Teilproduktivität bezogen auf einen der entsprechenden Elementarfaktoren nach Gutenberg (1972, S. 3), das heißt Betriebsmittel, Arbeitskraft und Material, unterscheidet. Grundlegender Unterschied zwischen Gesamt- und Teilproduktivitäten ist, dass in der Gesamtproduktivität alle Inputfaktoren zum Output des Produktionsprozesses ins Verhältnis gesetzt werden und in den Teilproduktivitäten stattdessen jeweils einer der Elementarfaktoren (vgl. Lasshof 2006, S. 28). Dabei haben ausschließlich Betriebsmittel und Arbeitskräfte einen signifikanten Einfluss auf den Produktionsprozess (vgl. Weidemann und Sender 2014, S. 114). Zudem ist der Automatisierungsgrad des Produktionssystems ausschlaggebend dafür, welche der beiden Faktoren in einem größeren Maße auf den Leistungserstellungsprozess einwirkt. Bei hoher Automatisierung steht die Produktivität der Betriebsmittel im Vordergrund, bei rein manuellen Prozessen jedoch eher die der Arbeitskräfte (vgl. Weidemann und Sender 2014, S. 114). Im Rahmen der Industrie 4.0 wird als grundlegendes Ziel eine weitest gehende Automatisierung oder Autonomisierung des Produktionssystems angestrebt (vgl. Lu 2017, S. 10; Pereira und Romero 2017, S. 1208; Siepmann und Graef 2016, S. 32). Die vorgelegte Definition eines Produktionssystems betont insbesondere die Bedeutung der Betriebsmittel. Daher lag der Schwerpunkt dieses Projektes auf den Betriebsmitteln, während die Produktivität der Arbeitskräfte weitestgehend nicht berücksichtigt wurde.

Im Rahmen der Produktivitätsrechnung kann die Produktivität der Betriebsmittel mit der Maschinenproduktivität angegeben werden (vgl. Kahle 2018, S. 8). Klassische Kennzahlen dafür sind der Durchsatz oder der Nutzungsgrad. Der Durchsatz ergibt sich aus dem Verhältnis von der Anzahl produzierter Einheiten und der Zeitperiode in der die Produktion erfolgte (vgl. Burggräf et al. 2021, S. 398; Gutenschwager et al. 2017, S. 39; Ljungberg 1998, S. 496). Der Nutzungsgrad hingegen berechnet sich als Verhältnis aus Nutzungszeit der Maschinen und

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Dauer einer Periode, wobei von der Nutzungszeit die Zeiten für Rüstvorgänge abgezogen werden (vgl. Lehmann 1968, S. 9; Schwarz 1991, S. 629). Als entscheidendes Problem dieser klassischen Kennzahlen gilt jedoch, dass lediglich ein Teil der Gesamtleistung der Fertigungsanlagen berücksichtigt wird. Somit sind sie als eher unbrauchbar für die Identifizierung möglicher Schwachstellen zur Produktivitätssteigerung anzusehen (vgl. Huang et al. 2003, S. 513). Angesichts dessen nutzen viele Unternehmen im produzierenden Gewerbe die sogenannte OEE zur Messung und Steuerung ihrer Maschinenproduktivität, sowie zur Etablierung eines funktionierenden Shopfloormanagements. Hierbei stellt die unzureichende Erfassung von Produktionsdaten häufig ein Problem dar (vgl. Kletti et al. 2015, S. 4). Die OEE ist eine im Zuge des 1988 vom japanischen Wissenschaftler Seiichi Nakjima entwickelten Instandhaltungssystems namens Total Productive Maintenance (deutsch: vollständige Aufrechterhaltung der Produktivität) kreierte Kennzahl (vgl. Ljungberg 1998, S. 496; May und Koch 2008, S. 245; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518). In diesem Zusammenhang wurde sie speziell zur unkomplizierten Ermittlung von Verlusten einer Fertigungseinrichtung oder eines ganzen Produktionssystems, die dessen Effektivität im negativen Sinne beeinflussen, geschaffen (vgl. Hedman, Subramaniyan und Almström 2016, S. 76 f.; Ljungberg 1998, S. 496; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 f.). Zur Berechnung der OEE stehen drei Möglichkeiten zur Verfügung. Erstens kann die Anzahl produzierter Bauteile, welche den Qualitätsansprüchen entsprechen, mit der maximal möglichen Anzahl an Bauteilen im gleichen Zeitraum ins Verhältnis gesetzt werden (Focke und Steinbeck 2018, S. 7). Zweitens besteht die Möglichkeit das Produkt aus den drei Faktoren Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad zu bilden (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 8; Kletti et al. 2015, S. 4 f.). Drittens können ausgehend von der maximal zur Verfügung stehenden Betriebszeit in Form einer Kaskade alle aufgetretenen Verluste nacheinander subtrahiert werden. Daraus ergibt sich die wertschöpfende Betriebszeit. Diese wird dann ins Verhältnis mit der Planbelegungszeit, welche sich aus der maximal verfügbaren Produktionszeit abzüglich geplanter Instandhaltung und geplanter Stillstände ergibt, gesetzt (vgl. Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 ff.).

$$OEE = \frac{\text{Anzahl produzierter Gutteile in Zeitraum}}{\text{Anzahl maximal produzierbarer Bauteile in Zeitraum}} \quad (1)$$

$$OEE = \text{Verfügbarkeitsgrad} \times \text{Leistungsgrad} \times \text{Qualitätsgrad} \quad (2)$$

$$OEE = \frac{\text{Wertschöpfende Betriebszeit}}{\text{Planbelegungszeit}} \times 100\% \quad (3)$$

Formel (1) stellt zwar eine gute Basis zur Kontrolle der Effektivität des betrachteten Produktionssystems dar, ist allerdings ungeeignet, um Verluste genauer zu klassifizieren (Focke und Steinbeck 2018, S. 7). Infolgedessen sollen im Rahmen dieser Arbeit die Formeln (2) und (3) als Fundament dienen, welche jeweils eine Differenzierung zwischen den Verlusten vornehmen. Das Ergebnis ist dabei das Gleiche (Focke und Steinbeck 2018, S. 8 ff; May und

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Koch 2008, S. 247; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 ff). Beide Wege sind in Abbildung 3-4 verdeutlicht.

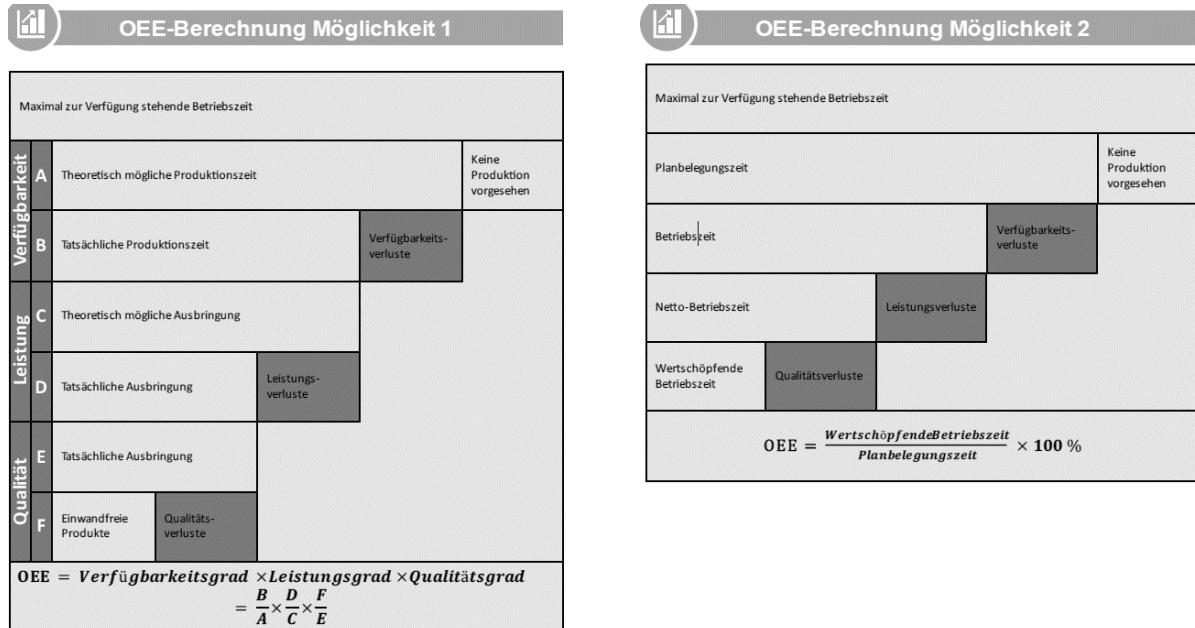


Abbildung 2-5: Vorgehensweisen zur Kalkulation der OEE (in Anlehnung an Focke und Steinbeck 2018, S. 8 ff.; May und Koch 2008, S. 247; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 ff.)

Die möglichen Verluste eines Produktionssystems können in drei, mit den jeweiligen Faktoren der OEE korrespondierenden, Verlustarten kategorisiert werden. Entsprechend werden sie als Verfügbarkeitsverluste, Leistungsverluste und Qualitätsverluste bezeichnet (vgl. May und Koch 2008, S. 245 f.; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 f.). Sie dienen als Basis für die Fehlerursachenanalyse und Verbesserungsmaßnahmen (vgl. Muchiri und Pintelon 2008, S. 3519). Verfügbarkeitsverluste summieren sich als Menge aller Zeiträume, in denen eigentlich Produktion hätte stattfinden sollen, dies jedoch nicht der Fall war (vgl. May und Koch 2008, S. 246; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3519). Dabei ist eine Differenzierung zwischen geplanten und ungeplanten Verlusten möglich. Zu den geplanten Verlusten gehören Wartung, Rüsten und Inspektion, zu den ungeplanten hingegen technische Störungen, fehlendes Personal oder fehlende Logistik, sprich fehlendes Material, fehlende Ladungsträger oder Stau durch fehlenden Materialabtransport (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 12 f.; May und Koch 2008, S. 246). Ausgeschlossen bleiben dabei sogenannte Kurzstillstände. Diese entsprechen eigentlich der Definition der Verfügbarkeitsverluste, werden jedoch aufgrund ihrer kurzen Dauer im Sekunden- oder einstelligen Minutenbereich als Geschwindigkeitsverluste den im Folgenden erklärten Leistungsverlusten zugeordnet (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 16). Leistungsverluste sind eben solche Verluste, welche sich daraus ergeben, dass das Produktionssystem nicht mit maximal möglicher Geschwindigkeit betrieben wird. Dabei können zwei mögliche Ursachen unterschieden werden. Zum einen treten Kurzstillstände auf, welche in vielen Fällen durch kleine Störungen, etwa durch blockierte Sensoren, entstehen

2. Stand der Technik und Wissenschaft

und zum anderen kann reduzierte Betriebsgeschwindigkeit ursächlich sein (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 15 f.; May und Koch 2008, S. 246; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3519). Grund für die Drosselung der Maschinengeschwindigkeit kann sein, dass andernfalls gewünschte Qualitätsstandards für das Erzeugnis nicht erreicht werden können (vgl. May und Koch 2008, S. 246).

Als letzte Kategorie der Verlustarten gelten Qualitätsverluste, welche alle produzierten Produkte, die nicht den geforderten Qualitätsstandards entsprechen, inkludieren. Dabei können Ausschuss und Nacharbeiten unterschieden werden, wenngleich für Nacharbeiten die Möglichkeit zur Nachbesserung hin zu den gewünschten Standards besteht (vgl. May und Koch 2008, S. 246 f.; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3520).

Nach Formel (2) und Abbildung 2-5 existiert zur Berechnung der OEE auch die Möglichkeit die einzelnen Faktoren Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad jeweils gesondert zu berechnen und die jeweiligen Ergebnisse zu multiplizieren. Deshalb sollen die entsprechenden Berechnungen nachkommend kurz erklärt werden. Der Verfügbarkeitsgrad ergibt sich als Anteil der tatsächlichen Produktionszeit an der möglichen Produktionszeit. Die tatsächliche Produktionszeit resultiert aus der Subtraktion der Verfügbarkeitsverluste von der möglichen Produktionszeit (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 9).

$$\text{Verfügbarkeitssgrad} = \frac{\text{Tatsächliche Produktionszeit in h}}{\text{Theoretisch mögliche Produktionszeit in h}} \quad (4)$$

Der Leistungsgrad hingegen gibt das Verhältnis der tatsächlichen Ausbringung und der möglichen Ausbringung, jeweils innerhalb der tatsächlichen Produktionszeit, an. Als mögliche Ausbringung kann dabei die Taktung des Produktionssystems herangezogen werden. Davon werden dann alle Leistungsverluste zur Berechnung der tatsächlichen Produktionszeit abgezogen (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 9 f.; May und Koch 2008, S. 247 f.).

$$\text{Leistungsgrad} = \frac{\text{Tatsächliche Ausbringung in Stück}}{\text{Theoretisch mögliche Ausbringung in Stück}} \quad (5)$$

Zuletzt wird der Qualitätsgrad als Quotient einwandfrei ausgebrachter Produkte und der tatsächlichen Ausbringungsmenge bemessen. Die Qualitätsverluste bilden dabei die Differenz zwischen tatsächlicher Ausbringungsmenge und einwandfrei ausgebrachten Produkten (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 10 f.; May und Koch 2008, S. 247 f.).

$$\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Ausbringung einwandfreier Produkte in Stück}}{\text{Tatsächliche Ausbringung in Stück}} \quad (6)$$

Nachdem die Berechnungsgrundlage für die OEE ausführlich dargelegt wurde, soll nun grob die methodische Vorgehensweise zur Nutzung der OEE auf dem Shopfloor erläutert werden. Maschinenbediener sollten im Zuge dessen selbst die benötigten Daten zur Berechnung zusammentragen und diese anschließend in interpretier- und zweckdienliche Informationen

2. Stand der Technik und Wissenschaft

umwandeln. Hierbei bilden aus der erfassten Datenlage erstellte Diagramme eine solide Basis, um im Rahmen eines Shopfloor-Managements Verbesserungsmaßnahmen vorzunehmen. Allerdings gibt die OEE keine Auskunft über die Ursachen von Verlusten (vgl. May und Koch 2008, S. 245). Zudem gilt anzumerken, dass die händische Erfassung der Datenlage durch die Produktionsmitarbeitenden zeitliche Kapazitäten in Anspruch nimmt und nach Definition der Wertschöpfung als nicht wertschöpfend einzustufen ist.

Grundsätzlich wäre eine OEE von 100 Prozent wünschenswert, jedoch ist dieser Wert in realen Produktionsbetrieben nicht zu erreichen, da immer unvorhergesehene Verluste eintreten. In bestehender Literatur ist strittig, welcher Wert als gut, akzeptabel oder schlecht anzusehen ist (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 32; Nakajima 1995, S. 48). Focke und Steinbeck (2018, S. 32) behaupten gar, dass eine allgemeingültige Referenz-OEE nicht existiert und ein zufriedenstellender Wert abhängig von Faktoren wie dem Automatisierungsgrad des Produktionssystems ist. Dennoch definieren sie Werte zwischen 30 und 50 Prozent als mittelmäßig und unter 30 Prozent als schlecht (vgl. Focke und Steinbeck 2018, S. 32). Der Schöpfer der OEE Seiichi Nakajima (1995, S. 48 f.) denkt, dass viele Betriebe in der Realität eine OEE von unter 50 Prozent aufweisen. Zudem hält er eine OEE von 85 Prozent für ideal.

2.2 Engpassmanagement

Nachdem relevante Produktionssystemcharakteristika, ihre möglichen Ausprägungen sowie eine in Unternehmen des produzierenden Gewerbes häufig verwendete Produktivitätskennzahl ermittelt wurden, werden nun die Grundlagen des Themengebietes Engpassmanagement dargestellt. Im Folgenden wird zunächst über die Definition der Begriffe Flexibilität, Komplexität und Variabilität in die Problematik von Engpässen in einem Produktionssystem eingeleitet. Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Engpässen differenziert. Zudem werden Engpassmanagementmethoden vorgestellt.

2.2.1 Flexibilität, Komplexität und Variabilität im Produktionssystem

Insbesondere der schnelle technologische Wandel und massive Veränderung der Marktnachfrage haben den Bedarf nach flexiblen Produktionssystemen erhöht (vgl. Faust 2009, S. 157; Gustavsson 1984, S. 801; Schreyögg 2009, S. 213; Schuh et al. 2017, S. 83; Wildemann 2012, S. 39, 2018, S. 70). Dabei ist zudem ein steigender Grad an Komplexität und Variantenvielfalt der Produkte zu beobachten (vgl. Gustavsson 1984, S. 801). Ein zentraler Treiber dieser Entwicklung ist das anwachsende Verlangen des Marktes nach kundenindividuellen und innovativen Produkten (vgl. Faust 2009, S. 157; Schreyögg 2009, S. 213). Die daraus resultierende wachsende Vielfalt an Produktvarianten und maßgeschneiderten Produkten ist Konsequenz eben jener Marktentwicklung (vgl. Liu und Tu

2. Stand der Technik und Wissenschaft

2008, S. 5781). Deshalb gilt für produzierende Unternehmen als zentrales Ziel das nötige Maß an Flexibilität für ihr Produktionssystem zu erreichen, um die Anforderungen des Marktes zu erfüllen und eine wirtschaftliche Rentabilität zu gewährleisten. Im heutigen Kontext werden solche Fertigungssysteme als flexible Fertigungssysteme bezeichnet (vgl. Deuse et al. 2016, S. 11; Gustavsson 1984, S. 801 f.; West, Syberg und Deuse 2022, S. 612). Im industriellen Kontext meint Flexibilität Anpassungsfähigkeit (vgl. Gustavsson 1984, S. 802). Problematisch an der steigenden Flexibilität von Produktionssystemen hinsichtlich breiter Produktpaletten, Absatzschwankungen und Produktanläufen ist jedoch die damit einhergehende zunehmende Systemkomplexität (vgl. Groß 2010, S. 7; Klenner et al. 2016, S. 541; West, Syberg und Deuse 2022, S. 612). Komplexität meint beispielsweise die Varianz des Materialflusses, die Anzahl der für alle Produktvarianten benötigten Materialien, sowie Beschaffungs-, Dispositions-, Fertigungs- und Montageprozesse (vgl. Groß 2010, S. 7; Klenner et al. 2016, S. 540 f.). Komplexität in einem Produktionssystem korreliert mit einer Intransparenz auf hohem Niveau (Deuse et al. 2016, S. 12). Die negative Wirkung eines hohen Maßes an Komplexität des Produktionssystems spiegelt sich in mangelhaften Zielwerten hinsichtlich Systemverfügbarkeit sowie Betriebsstabilität und folglich geringer Produktivität wider (vgl. Brecher und Weck 2019, S. 355). Auch wenn ein gesteigertes Maß an Komplexität durch die zunehmende Individualisierung der Produkte zur Erhöhung der sogenannten Variabilität führt, wäre eine schlichte Eliminierung dieser nicht zielführend, da dies auch einen wertvernichtenden Effekt haben kann (vgl. Groß 2010, S. 15 ff.; West, Syberg und Deuse 2022, S. 612; Wolf, Deuse und Richter 2019, S. 730). Anstelle dessen gilt es die vorhandene Variabilität zu identifizieren, zu nutzen und Strategien zur Beherrschung dieser zu entwickeln.

Variabilität gilt im Kontext von Produktionssystemen als der stochastische Effekt von Maschinen (vgl. Hopp und Spearman 2008, S. 271 ff.; Wu, Zhou und Zhao 2016, S. 364). Dabei kann zwischen geplanter kontrollierbarer Variabilität, denn diese kann auch wertschöpfend sein, und zufälliger Variabilität differenziert werden (vgl. Hopp und Spearman 2008, S. 265; Klenner et al. 2016, S. 542). Geplante und kontrollierbare Variabilität im Produktionssystem liegt zum Beispiel mit der aktiven Entscheidung eines Unternehmens verschiedene Produkte zu fertigen und am Markt anzubieten vor (vgl. Hopp und Spearman 2008, S. 265). Zufällige Variabilität hingegen resultiert aus zufälligen Ereignissen, die außerhalb der Kontrolle des Unternehmens liegen. Dies können ungeplante Stopps und Rüstvorgänge oder Schwankungen der Bearbeitungszeiten sein (vgl. Hopp und Spearman 2008, S. 265; Subramaniyan et al. 2021, S. 735; Wu, Zhou und Zhao 2016, S. 364 f.). Dadurch, dass Variabilität auch von wertschöpfender Natur sein kann, ist zudem eine Differenzierung zwischen wertschöpfender und nicht wertschöpfender Variabilität möglich (vgl. Deuse et al. 2016, S. 13; Klenner et al. 2016, S. 542). Als wertschöpfende Variabilität ist jene Variabilität zu bezeichnen, welche mit einem direkten Kundennutzen verbunden ist. Diese gilt als wünschenswert und ist deshalb zu beherrschen. Exemplarisch kann hier ein kundenindividueller Liefertermin genannt werden (vgl. Deuse et al. 2016, S. 14; Klenner et al.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

2016, S. 542). Auf der anderen Seite ist nicht wertschöpfende Variabilität dadurch charakterisiert, dass durch ihre Gegenwart kein Kundennutzen erzeugt wird. Sie gilt deshalb auch als Verschwendung und sollte auf ein Minimum reduziert werden. Als Beispiel können hier Prozesszeitschwankungen durch Störungen genannt werden (vgl. Deuse et al. 2016, S. 12 ff.; Klenner et al. 2016, S. 542). In der Praxis wird die vorhandene Variabilität anhand von fünf verschiedenen Kategorien bestimmt und differenziert.

Die Quantifizierung und das Verständnis, der im Produktionssystem vorhandenen Variabilität ist insbesondere im Hinblick auf eine wirksame Produktionssteuerung entscheidend. (vgl. Wu, Zhou und Zhao 2016, S. 364)

2.2.2 Engpassdefinition über die Engpasstheorie

Da Variabilität als eine Konsequenz aus Flexibilität und Komplexität entsteht, besteht der Bedarf jene Faktoren zu beherrschen (vgl. Gustavsson 1984). Ein populärer Ansatz zur Beherrschung von Komplexität und Flexibilität besteht in der sogenannten Engpasstheorie (englisch: Theory of Constraints) (vgl. Goldratt und Cox 2014; Klenner et al. 2016, S. 541). Die Engpasstheorie wurde erstmalig von Goldratt und Cox (1984) zum Produktionsmanagement publiziert. Das Konzept soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Zunächst geht es davon aus, dass jedes Produktionssystem einen Faktor besitzt, welcher beschränkend auf dessen Systemleistung wirkt, da andernfalls gewinnorientierte Unternehmen Gewinne in unbegrenzter Form generieren könnten (vgl. Goldratt 1988, S. 453; Rahman 1998, S. 337). Jener beschränkende Faktor wird mit Priorität und mit dem Ziel der Reduzierung dieser zur Erhöhung der Systemleistung behandelt (vgl. Goldratt und Cox 2014; Rahman 1998, S. 337; Wu, Zheng und Shen 2020, S. 278). Dazu existiert ein korrespondierender Prozess, welcher aus fünf Schritten besteht (vgl. Goldratt 1990, S. 5 ff.; Moss und Wen 1999, S. 53; Rahman 1998, S. 337 f.; Wu, Zheng und Shen 2020, S. 276).

Schritt 1: „Identifiziere den Engpass“ - Zunächst gilt es die entsprechende Systembeschränkung zu identifizieren. Diese kann von physischer, in Form von Materialien oder Maschinen, oder verwaltungstechnischer, in Form von Managementbeschränkungen, Natur sein. (vgl. Goldratt 1990, S. 22 f.; Rahman 1998, S. 337).

Schritt 2: „Laste den Engpass voll aus“ - Es wird darüber entschieden wie die identifizierten Systembeschränkungen ausgenutzt werden können (vgl. Rahman 1998, S. 337).

Schritt 3: „Ordne alles der Auslastungsentscheidung unter“ - Es werden kurzfristige Maßnahmen ergriffen, die zum Ziel haben die Produktion so zu steuern, dass eine Unterstützung der Stelle der Einschränkung erreicht und die Unterbrechung der Produktion vermieden wird (vgl. Wu, Zheng und Shen 2020, S. 276).

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Schritt 4: „Behebe den Engpass“ – dieser Schritt vier widmet sich der Prüfung der bestehenden Beschränkungen. Sofern diese immer noch die kritischste im Produktionssystem hinsichtlich der Systemleistung darstellt, werden Maßnahmen zur Verbesserung deren Leistung angestrebt, um eine Steigerung der Gesamtleistung des Produktionssystems zu erreichen (vgl. Rahman 1998, S. 338).

Schritt 5: „Bei Schritt 1 erneut beginnen“ - wird nun die Leistung der Beschränkung in einem solchen Maße erhöht, dass sie nicht mehr den beschränkenden Faktor der Gesamtsystemleistung darstellt, sollte zu Schritt eins zurückgekehrt werden. So ist eine fortlaufende Verbesserung des Systems realisierbar (vgl. Rahman 1998, S. 338; Wu, Zheng und Shen 2020, S. 276).

Im Rahmen der Fertigung werden die beschriebenen einschränkenden Faktoren oft als Engpässe bezeichnet, deren Stabilisierung das größte Potenzial zur Erhöhung der Produktivität bietet (vgl. Deuse et al. 2016, S. 13; Lai et al. 2021, S. 663). Als Engpass gelten gemäß der Engpasstheorie somit Ressourcen, welche den größten Einfluss auf die Gesamtleistung des Produktionssystems haben (vgl. Roser, Lorentzen und Deuse 2014, S. 64; Roser, Nakano und Tanaka 2002, S. 1079; Su et al. 2022, S. 4195 f.; West, Syberg und Deuse 2022, S. 613).

2.2.3 Differenzierung verschiedener Engpassarten

Dabei gilt es zwischen verschiedenen Arten von Engpässen, die verschieden Einfluss auf das Produktionssystem nehmen können, zu unterscheiden. Engpässe können neben der Maschinenkapazität exemplarisch in Form von fehlendem Material, einer unzureichenden Anzahl an Arbeitskräften oder in Form eines Mangels an Informationen auftreten (vgl. Hinckeldeyn, Dekkers und Kreutzfeldt 2012, S. 1; Roser, Lorentzen und Deuse 2014, S. 64). Im Weiteren sollen dabei insbesondere jene Engpässe, die die Kapazität des Fertigungssystems einschränken, betrachtet werden.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristika gibt es verschiedene Arten von Engpässen. Diese können statisch, also zeitlich unveränderlich, oder dynamisch, also zeitlich veränderlich, sein. (vgl. Deuse et al. 2016, S. 13; Nyhuis und Pereira Filho 2002, S. 253 ff.; Wang, Zhao und Zheng 2005, S. 349). Statische Engpässe determinieren sich durch ein über eine bestimmte Zeitspanne niedrigeres Kapazitätsangebot als benötigt (vgl. Nyhuis und Pereira Filho 2002, S. 257). Jedoch sind die in der Realität auftretenden Engpässe meist dynamischer Natur (vgl. Roser, Nakano und Tanaka 2002, S. 1079). Grund dafür ist die Möglichkeit statische Engpässe durch Maßnahmen des Kapazitätsmanagements zu eliminieren. Daraus resultiert allerdings auch eine Verschärfung des dynamischen Verhaltens der Engpässe, sodass die beschriebenen Maßnahmen lediglich eine Umwandlung der statischen in dynamische Engpässe bewirken (vgl. Lawrence und Buss 2009, S. 22; West, Syberg und Deuse 2022, S.

2. Stand der Technik und Wissenschaft

613). Dynamische Engpässe sind definiert als Arbeitsplätze, an denen der Kapazitätsbedarf geringer ist als die verfügbare Gesamtkapazität des Produktionssystems, jedoch für eine endliche Zeitperiode eine höhere Belastung als die Kapazität des Arbeitsplatzes auftritt. Dadurch ist der Arbeitsplatz zeitweise überlastet und es entsteht eine Warteschlange von Produktionsaufträgen vor eben jenem betroffenen Arbeitsplatz (vgl. Lawrence und Buss 2009, S. 21; Nyhuis und Pereira Filho 2002, S. 257). Als wichtige Ursache für die Entstehung dynamischer Engpässe gilt Variabilität im Produktionssystem (vgl. Deuse et al. 2016, S. 13; Hintsches 2012, S. 19; Klenner et al. 2016, S. 542; Schwenken et al. 2022, S. 294).

2.2.4 Methoden des Engpassmanagements

Als zentraler Leistungsindikator von Produktionssystemen gilt der zuvor schon vorgestellte Durchsatz. Deshalb sind Möglichkeiten diesen zu steigern weiterhin Teil von Forschungsvorhaben (vgl. Subramaniyan et al. 2016, S. 2; Tang 2019, S. 21; Zhang und Matta 2020, S. 1189). Die Identifikation und Optimierung von Engpässen im Produktionssystem repräsentiert dabei eine der wichtigsten Herausforderungen von Unternehmen um unter anderem den Durchsatz zu steigern. Dieser Identifikations- und Optimierungsprozess wird als Engpassmanagement definiert (vgl. Lai et al. 2021, S. 662; Li et al. 2011, S. 1; Subramaniyan et al. 2021, S. 734; Wang, Zhao und Zheng 2005, S. 347 f.). Das Engpassmanagement basiert auf der Idee der Engpasstheorie, dass in jedem Produktionssystem ein Faktor existiert, welcher die Leistung des Gesamtsystems begrenzt. Deshalb kann eine Durchsatzsteigerung für das Gesamtsystem nur durch die Steigerung des Durchsatzes am begrenzenden Faktor beziehungsweise der begrenzenden Fertigungseinrichtung erreicht werden (vgl. Klepzig 2014, S. 121, 2018, S. 22). Drei Faktoren, die den Durchsatz eines Produktionssystems beeinflussen können, sind die zur Berechnung der OEE verwendeten Faktoren Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad (vgl. Lanke, Hoseinie und Ghodrati 2016, S. 754; Tang 2019, S. 21). Wird nun ein Bezug auf die Erkenntnis von Klepzig (2014, S. 121, 2018, S. 22) hergestellt, so bedeutet dies im Umkehrschluss, dass eine Steigerung der OEE beziehungsweise der drei Faktoren Verfügbarkeitsgrad, Leistungsgrad und Qualitätsgrad mit einer Steigerung des Durchsatzes am Engpass einhergeht. Dadurch kann die OEE zur Prüfung des Erfolgs von Maßnahmen zur Steigerung des Durchsatzes des Engpasses im Rahmen des Engpassmanagements herangezogen werden (Prasetyo und Veroya 2020, S. 348 f.). Sie soll im Kontext dieser wissenschaftlichen Arbeit als zentraler Indikator zur Bewertung des Erfolgs des Engpassmanagements gelten.

Das Ziel des Engpassmanagements besteht darin, eine Flussorientierung des Produktionssystems mit geringen Beständen und einem schnellen Auftragsdurchlauf zu erreichen. Zur Identifikation und Analyse von Engpässen wurden bereits von Forschenden verschiedene Methoden vorgestellt. Dazu zählen das Meerkov-Aggregationsverfahren, die Diskreten Ereignis-Optimierungs-Modelle für Durchsatzverbesserungsprobleme (vgl. Alavian,

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Denno und Meerkov 2017, S. 7276 ff.; Blumenfeld und Li 2005, S. 293 ff.; Gershwin 2018, S. 224 ff.; Li et al. 2009, S. 3827; Zhang und Matta 2020, S. 1192 ff.), sowie modellbasierte Ansätze der diskreten Ereignissimulation (vgl. Law und McComas 1987, S. 631 ff.; Li 2018, S. 43 ff.; Pehrsson, Ng und Bernedixen 2016, S. 39 ff.). Entscheidende Schwäche dieser Methoden ist, dass sie einerseits auf restriktiven Annahmen, welche in der Realität oftmals nicht wiederzufinden sind, beruhen und andererseits ausschließlich für statische Engpässe geeignet sind (vgl. Colledani et al. 2010, S. 1914). In der Realität stellt sich die Beseitigung von Engpässen aufgrund der Komplexität von Fabriken als schwierig dar (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 734). Zudem sind Engpässe meist dynamischer Natur und unterliegen einer zeitabhängigen Verlagerung im Produktionssystem (vgl. Lawrence und Buss 2009, S. 21 f.; Shen und Chen 2010, S. 2010; Subramaniyan et al. 2021, S. 736; Thüerer und Stevenson 2018, S. 278). Angesichts des Einflusses von Engpässen auf die Produktivität ist es elementar für den Erfolg eines Unternehmens ein effektives Engpassmanagement für das Produktionssystem im Unternehmen zu etablieren (vgl. Schwenken et al. 2022, S. 294). Vorhandenen Methodiken fehlt es vielfach im Hinblick auf dynamische Engpässe an Präzision und Praktikabilität (vgl. Roser, Lorentzen und Deuse 2014, S. 63). Die Marktreife verschiedener Lösungen basierend auf der Technologie der künstlichen Intelligenz ermöglicht es, diese zur präzisen Identifikation und Beseitigung von dynamischen Engpässen zu nutzen (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 734). Dazu wurde von West et al. (2022, S. 615) sowie von Subramaniyan et al. (2021, S. 734) jeweils ein Modell entwickelt, welche den Engpassmanagementprozess in ein Vier-Phasenmodell, namentlich Identifikation, Diagnose, Analyse und Präskription, unterteilt. Dieser Ansatz kann aufgrund seiner Eignung zur Optimierung dynamischer Engpässe auch als dynamisches Engpassmanagement bezeichnet werden. Im Folgenden sollen die Essenzen der Modelle aufgeteilt nach ihren Phasen näher erläutert werden.

In der ersten Phase, der Identifikation, besteht das Ziel in der eindeutigen Bestimmung des derzeitigen Engpasses (vgl. West, Syberg und Deuse 2022, S. 616). Dabei können die dazu angewendeten Verfahren im Grundsatz in Durchschnitts- und Zeitpunktverfahren unterteilt werden (vgl. Schwenken et al. 2022, S. 294; Wiegand et al. 2014, S. 14). Zeitpunktverfahren analysieren einzelne Zeitpunkte, um den aktuellen Engpass identifizieren zu können. Methoden, die auf diesem Prinzip basieren sind der Bottleneck Walk oder die Active-Period-Method (vgl. Deuse et al. 2016, S. 15; Schwenken et al. 2022, S. 294). Durchschnittswertverfahren dienen stattdessen Durchschnittswerte zentraler Kennwerte als Grundlage für die Engpassidentifikation. Diese sind allerdings bei vermehrtem Vorkommen dynamischer Engpässe als ungeeignet einzustufen (vgl. Schwenken et al. 2022, S. 294; Wiegand et al. 2014, S. 15) Der Bottleneck Walk, die Active Period Method und die Interdeparture Time Variance Methode werden als gängigste Verfahren detaillierter erörtert. (West et al. 2023):

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Bottleneck Walk (BNW): Dieser Ansatz beinhaltet eine physische Inspektion und Analyse des Produktionsprozesses oder des Betriebsablaufs. Hierbei wird durch einen gezielten Rundgang und die direkte Beobachtung der verschiedenen Prozessstufen Engpässe oder Verzögerungen direkt identifiziert. (C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, "Shifting Bottleneck Detection," Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, no. 1, pp. 1079–1086, 2002, doi: 10.1109/WSC.2002.1166360.)

Active Period Method (APM): Ein Engpass ist die Station im Wertstrom, die am längsten ohne Unterbrechungen gearbeitet hat. Diese Dauer wird dann als *aktive Periode* der Station bezeichnet. Eine Station gilt als aktiv, wenn sie Produkte entsprechend dem Produktionsprogramm bearbeitet oder gerüstet wird. Sie wird als *inaktiv* betrachtet, wenn sie aufgrund von Puffer-bedingtem Stillstand wartet oder blockiert ist. (C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, "Detecting Shifting Bottlenecks," International Symposium on Scheduling, no. 1, pp. 1–4, 2002.)

Interdeparture Time Variance (ITV): Die ITV-Methode sagt aus, dass der Engpass eines Produktionssystems die geringste Varianz in der Prozesszeit aller Stationen aufweist. Eine hohe Varianz kann auf Engpässe hinweisen, da sie oft zeigt, dass der Prozessablauf unregelmäßig ist und somit ineffizient sein kann. Diese Überlegung gründet auf der Annahme, dass Engpassstationen durch eine hohe Auslastung gekennzeichnet sind, was zu größeren Puffern vor und kleineren Puffern nach der Station führt (siehe BNW). Diese Bestandlage sorgt dafür, dass die Engpassstation kontinuierlich mit Material versorgt wird (d.h. minimale Stillstandszeiten) und nur selten durch nachfolgende Prozesse blockiert wird. Beide Faktoren tragen positiv zur Stabilität der Prozesszeit am Engpass bei. Im Gegenzug lässt dies für Nicht-Engpassstationen den Schluss zu, dass sie häufiger Blockierungen oder Stillständen ausgesetzt sind, was jeweils negative Auswirkungen auf die Stabilität ihrer Prozesszeiten hat. (N. West, J. Schwenken, and J. Deuse, "Comparative Study of Methods for the Real-Time Detection of Dynamic Bottlenecks in Serial Production Lines," in Advances and Trends in Artificial Intelligence: Theory and Practices in Artificial Intelligence, H. Fujita, Fournier-Viger, Philippe, M. Ali, and Y. Wang, Eds., Cham, CH: Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 3–14.; Schwenken, Jörn, Schallow, Julian, Sollik, Damian, Richter, Ralph and Deuse, Jochen. "Identifikation und Prognose dynamischer Engpässe: Konzeption und Anwenderanforderungen für eine praxistaugliche Verfahrensauswahl und -weiterentwicklung" Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 117, no. 5, 2022, pp. 294-299. <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1052>.)

Anschließend werden in der zweiten Phase, der Diagnose, die Ursachen für die zuvor erkannten Engpässe gesucht, um fortführend eine zielgerechte Planung von Beseitigungsmaßnahmen zu ermöglichen (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 742; West, Syberg und Deuse 2022, S. 616). Gegebenenfalls erweist sich die Zuordnung von Engpass

2. Stand der Technik und Wissenschaft

zu Ursache aufgrund der Vielzahl potenzieller Ursachen als schwierig (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 742).

Der dritte Schritt, die Prognose, befasst sich mit der Vorhersage zukünftiger Engpässe im Produktionssystem. Dazu ist es jedoch zwingend ein System erforderlich, das in der Lage ist Engpässe in Echtzeit zu identifizieren, zu integrieren (vgl. Schwenken et al. 2022, S. 295; Subramaniyan et al. 2021, S. 738; West, Syberg und Deuse 2022, S. 617). Dazu können historische Daten mithilfe eines Tools basierend auf der Technologie der künstlichen Intelligenz analysiert werden, um mögliche Muster von Engpässen zu erkennen, eine Prognose hinsichtlich zukünftiger Muster anzustreben und so zukünftige Engpässe vorherzusagen (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 743).

Im finalen Schritt des Vier-Phasenmodells, Präskription, werden die Erkenntnisse der vorherigen Schritte kombiniert, um eine präskriptive Vermeidung von Engpässen zu erreichen (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 743; West, Syberg und Deuse 2022, S. 617). Dazu wird nach Subramaniyan (2021, S. 738 ff.) auf Basis historischer Engpässe ein Maßnahmenkatalog entwickelt, welcher für zukünftige Engpässe eingesetzt werden soll. Das Modell ist zum vereinfachten Verständnis in Abbildung 2-6.



Abbildung 2-6: Vier-Phasenmodell zum Managen dynamischer Engpässe (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 742 f.; West, Syberg und Deuse 2022, S. 616 f.)

Auch in der industriellen Praxis hat sich das Vier-Phasenmodell beim Engpassmanagement auf dem Shopfloor bewährt. So können im Rahmen der Phasen Identifikation und Diagnose bereits aufgetretene Engpässe analysiert werden, sodass anschließend die Formulierung von Maßnahmen zum Managen zukünftiger Engpässe möglich ist. Diese sollen dann zur

2. Stand der Technik und Wissenschaft

Beseitigung zukünftiger Engpässe dienen (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 739). Insofern ist im weiteren Verlauf, wenn von Engpassmanagement die Rede ist, damit stets das in Abbildung 2-6 dargestellte Vier-Phasenmodell nach Subramaniyan et al. (2021, S. 741 ff.) und West, Syberg und Deuse (2022, S. 616 f.) gemeint.

2.3 Maschinelles Lernen

Ausgelöst durch die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung in modernen Produktionssystemen ist eine zunehmende Verfügbarkeit großer Datenmengen zu verzeichnen (Kletti und Schumacher, 2014, S. 144). Gründe hierfür liegen in einer Vielzahl kontinuierlich erzeugter Daten z. B. in eingebetteten Sensoren (Thomas et al., 2018, S. 129) oder Manufacturing Execution Systems (MES) (vgl. Kletti und Schumacher, 2014, S. 144). Neben der steigenden Datenverfügbarkeit ist außerdem ein zunehmendes wissenschaftliches und wirtschaftliches Interesse an der Prognose der Produktion zu verzeichnen (Winkowski, 2019, S. 27). Einerseits wird durch die zunehmende Datenverfügbarkeit eine effiziente Analyse komplexer nichtlinearer Zusammenhänge in den Daten ermöglicht (vgl. Wang et al., 2018, S. 144). Andererseits ist hierzu jedoch der Einsatz geeigneter Technologien notwendig (vgl. Witten, 2011, S. 5).

Bei der Extraktion von Informationen aus großen Datenmengen spielt der Ansatz des Data Mining eine tragende Rolle (vgl. Hand, 2003, S. 8). Data Mining beschreibt dabei den (semi-) automatischen Prozess der Entdeckung von Mustern in Daten (Witten, 2011, S. 5). Die entdeckten Muster sollten dabei statistisch valide, neuartig, potenziell nützlich und verständlich sein, damit aus ihnen ein Mehrwert generiert werden kann (Fayyad, Piatetsky-Shapiro und Smyth, 1996, S. 41).

Ein zum Data Mining verwandtes Konzept stellt ML dar (vgl. Witten, 2011, S. 8 f.). ML beschreibt ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz (Kusiak, 2020, S. 1596). Laut Döbel et al. (2018, S. 8) definiert sich ML als die „Generierung von Wissen aus Erfahrung, indem Lernalgorithmen aus Beispielen ein komplexes Modell entwickeln.“. Das Training der Algorithmen verfolgt dabei das Ziel die Muster in den Daten aufzudecken und zu erlernen (vgl. Fayyad, Piatetsky-Shapiro und Smyth, 1996, S. 39). In der realen Anwendung kann das Modell danach auf neue, unbekannte Daten derselben Art übertragen werden. Die entwickelten Modelle können ohne explizit definierte Regelwerke oder Berechnungen z. B. zur Prognose und Entscheidungsunterstützung genutzt werden. Modelle des ML können kontinuierlich an neue Daten angepasst werden und eignen sich insbesondere zur Analyse von Echtzeitdaten (vgl. Döbel et al., 2018, S. 8).

2.3.1 Datenanalytische Anforderungen

Der erfolgreiche Einsatz von ML hängt wesentlich von der vorliegenden Datenreife (Datenqualität und -quantität) ab. Ein Modell zur Analyse der Datenreife stellt das Datenreifegradmodell nach Eickelmann et al. (2019) dar. Dieses kann zur Evaluierung der Erfolgchancen industrieller Datenanalyseprojekte herangezogen werden und liefert Hinweise auf erforderliche Schritte zur Verbesserung der Datenreife. Hierzu werden zehn Kriterien vorgeschlagen anhand derer eine Beurteilung der Eignung von Daten zur Analyse durch ML erfolgt. Nachfolgend werden die Kriterien kurz erläutert. (vgl. Eickelmann et al., 2019)

Das Kriterium der *Datenerfassung* beschreibt die Art und Form, in der Daten erhoben werden und wird anhand des Automatisierungsgrades von manuell bis online-basiert bewertet. Bei semi-automatischer Erfassung wird der automatische Vorgang, der ein statisches Datenbild kreiert, manuell initiiert. Die weitgehend automatisierte und onlinegestützte Erfassung leitet den Wechsel zu einer dynamischen, gänzlich automatisierten Datenaufnahme in Echtzeit ein. Das Kriterium der *Vollständigkeit* bewertet, ob die Datenbasis geeignet ist, um den Zustand des beobachteten Systems angemessen darzustellen. Dabei wird untersucht, inwieweit das System durch die aufgenommenen Daten erklärt werden kann. Bei der Betrachtung des *Stichprobenumfangs* muss die Datenmenge in Relation zum jeweiligen Anwendungsfall bewertet werden. Dabei wird neben der reinen Stichprobengröße die Problemstellung ungleichverteilter Daten durch die Dominanz einer oder mehrerer Klassen berücksichtigt. Bei dem Kriterium der *Datenhaltung* ist die Komplexität des Datenzugriffs und die Transformation der Daten in eine relationale Struktur zu beurteilen. Dabei wird der Aufwand zur Vernetzung und Aufbereitung der Daten für die Überführung in eine formale Standarddatenmatrix berücksichtigt. Hierbei wird das Kriterium von Papieraufzeichnungen über dezentrale und zentrale Datenhaltung bis hin zu einem übergreifenden Data Warehouse bewertet. Das *Datenformat* ist von großer Relevanz für die Speicherung und den Austausch von Daten. Hierbei ist der Aufwand zur Nutzbarkeit der Datenbasis durch Überführung der Datenformate maßgeblich, damit diese ausgelesen oder analysiert werden können. Eine effiziente Nutzung ist bei standardisierten und direkt bearbeitbaren Formaten gegeben. Bewertet wird das Kriterium von schwer überführbare Formate bis übergreifendes Standardformat.

Im Hinblick auf die *Datenstruktur* wird die Komplexität der Datenvorbereitung zur Bereitstellung der Daten für die Datenanalyse analysiert. Beurteilt werden der Grad der Strukturiertheit und die Skalenniveaus der Daten. Dabei sind strukturierte, metrisch skalierte Daten unstrukturierten und gemischt skalierten Daten vorzuziehen. Bei dem Kriterium der *Merkmalsausprägung* wird die Aggregation von Daten hinsichtlich einer zuverlässigen Abbildung des Systemverhaltens bewertet. Je kurzzyklischer die Datenerfassung erfolgt, desto unwahrscheinlicher ist die Verzerrung oder Eliminierung relevanter Informationen über die Systemdynamik in den Daten. Hinsichtlich der *Bezugsebene* wird die Referenzebene von Merkmalsausprägungen z. B. auf Gesamtprodukt, Baugruppen oder Einzelelemente

2. Stand der Technik und Wissenschaft

betrachtet. Damit beschreibt die Bezugsebene die Granularität, in der die Daten einen Untersuchungsgegenstand beschreiben. Das Kriterium der *Konsistenz* befasst sich mit der Korrektheit und Widerspruchsfreiheit der Daten. Inkonsistenzen oder vermehrte logische Widersprüche können dabei die Aussagekraft von Daten für Analysezwecke einschränken. Mit der *Rückverfolgbarkeit* findet die Möglichkeit zur Verfolgung von Produkten entlang der Wertschöpfungskette Berücksichtigung. Dabei ist eine Referenz der Daten über einen eindeutigen Identifikator und Zeitstempel zu analysieren. Alle Kriterien des Bewertungsmodells sind in vier Ausprägungs- bzw. Reifegradstufen unterteilt. Eine zusammenfassende Darstellung des Modells einschließlich der Kriterien und Reifegradstufen kann Abbildung 2-7 entnommen werden.

| Kriterien | Reifegradstufen | | | |
|--------------------|---|--|--|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Datenerfassung | Manuell | Semi-automatisch | Weitestgehend automatisch | Online-basiert |
| Vollständigkeit | Einseitige und unvollständige Erfassung von Merkmalen | Erfassung wesentlicher Merkmale | Erfassung der als relevant geltenden Merkmale | Erfassung aller relevanten und (un-) beeinflussbaren Merkmale |
| Stichprobenumfang | Keine historischen Daten | Kleine Stichprobe je Objektgruppe | Große Stichprobe je Objektgruppe bei ungleichverteilt. Klassen | Große Stichprobe je Objektgruppe und Klasse |
| Datenhaltung | Papieraufzeichnungen | Dezentrale Datenhaltung mit einfacher Software | Datenmanagementsysteme mit zentraler Datenhaltung | Übergreifendes Data Warehouse |
| Datenformat | Schwer überführbare Formate | Eingeschränkt überführbare Formate | Unterschiedliche, direkt überführbare Formate | Übergreifendes Standardformat |
| Datenstruktur | Unstrukturierter Text oder Bilder | Semi-strukturierte Daten | Strukturierte, gemischt-skalierte Daten | Strukt., metrisch skalierte Daten und standardisierte Codes |
| Merkmalsausprägung | Ausschließlich Sollwerte | Hoch aggregierte Istwerte | Aggregierte Istwerte oder Rohdaten mit geringer Abstrakte | Rohdaten in Echtzeit |
| Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf oberster Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf oberer Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf nächst höherer Ebene | Ausprägung der Werte auf Einzelementebene |
| Konsistenz | Keine Konsistenz bzw. Integrität | Vermehrt logische Widersprüche | Wenige logische Widersprüche | Durchgehende Konsistenz bzw. Integrität |
| Rückverfolgbarkeit | Keine ID oder Zeitstempel | Unterschiedliche ID oder Zeitstempel vorhanden | Übergreifende ID oder Zeitstempel vorhanden | Übergreif. ID oder Zeitstempel für dieselbe Bezugsebene |

Abbildung 2-7: Modell zur Bewertung der Datenreife (Eickelmann et al., 2019, S. 30)

2.3.2 Modelle zur Bewertung der Datenqualität

Damit ML-Ansätze in ihrer Anwendung auch einen tatsächlichen Mehrwert generieren, muss eine ausreichende Datenqualität sichergestellt sein (vgl. Subramaniyan et al., 2021, S. 745). Einen übersichtlichen Ansatz zur Bewertung der Datenqualität stellen die sechs Kerndimensionen für Datenqualitätsbewertung nach Askham et al. (2013) dar. Dieses Datenqualitätsmodell liefert durch Best Practice Definitionen generischer Datenqualitätsdimensionen eine zusammenfassende Betrachtung der wichtigsten Aspekte der Datenqualität und zeichnet sich durch seine Praktikabilität aus (West et al., 2021, S. 132). Bei der Anwendung des Datenqualitätsmodells nach Askham et al. (2013) erfolgt zuerst die Auswahl relevanter Datenqualitätsdimensionen und zugehöriger Schwellenwerte z. B. in Abhängigkeit des Anwendungsfalls und des Risikoniveaus. Weiterhin sind Gewichtungen für die Dimensionen vorzunehmen, mit denen diese in ein übergeordnetes Maß für die Datenqualität überführt werden können. Für jede Datenqualitätsdimension können außerdem zulässige Wertebereiche für eine hinreichend gute Datenqualität definiert werden (vgl. Askham

2. Stand der Technik und Wissenschaft

et al., 2013, S. 5). Nachfolgend werden die Datenqualitätskriterien des Modells kurz vorgestellt.

Vollständigkeit beschreibt den Anteil der gespeicherten Daten im Vergleich zu einem lückenlosen Datenbestand. Quantifiziert wird diese Kerndimension als prozentuales Maß für das Nichtvorhandensein von Leerwerten (null oder leere Zeichenkette) bzw. als Maß für das Vorhandensein von Nicht-Leerwerten. Dabei liegt die Vollständigkeit im Bereich von 0 bis 100% der zu messenden kritischen Daten in einem beliebigen Datenelement, Datensatz oder einer Datenbank (Askham et al., 2013, S. 8). Die Vollständigkeit von Attributen kann konkret durch Bestimmung der Anzahl der Beobachtungen des interessierenden Attributs ohne Leerwerte n_{int} bezogen auf die Anzahl aller Beobachtungen im Datensatz $n_{ges,DS}$ berechnet werden (Askham et al., 2013, S. 8). Gemäß Formel (7) kann die Vollständigkeit eines Attributes DQ_{VK} wie folgt ermittelt werden:

$$(7) DQ_{VK} = \frac{n_{int}}{n_{ges,DS}}$$

Mit dem Kriterium der *Einzigartigkeit* wird die redundante Erfassung ein und desselben Datenelements untersucht. Eine Analyse der Einzigartigkeit erfolgt durch Erfassung des prozentualen Verhältnisses der Anzahl der Elemente, wie sie in der realen Welt bewertet werden zur Anzahl der Datenelemente im Datensatz. Die Einzigartigkeit wird über alle Einträge innerhalb eines Datensatzes gemessen. Eine Untersuchung der Einzigartigkeit wird vorgenommen, indem die Anzahl der Elemente in der realen Welt n_{real} in Relation zu der Anzahl aller Beobachtungen im Datensatz $n_{ges,DS}$ gesetzt wird (Askham et al., 2013, S. 9). Die Einzigartigkeit DQ_E kann damit nach Formel (8) berechnet werden:

$$(8) DQ_{VK} = \frac{n_{real}}{n_{ges,DS}}$$

Aktualität beschreibt den Grad, in dem die betrachteten Daten die Realität zum gewünschten Zeitpunkt wiedergeben. Eine Messung der Aktualität in Zeiteinheiten erfolgt über die Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt der Dateneingabe und dem Zeitpunkt, zu dem das aufgezeichnete Ereignis in der realen Welt eingetreten ist. Die Aktualität kann auf Datenelemente, Datensätze oder Datenbanken bezogen werden (Askham et al., 2013, S. 10).

Hinsichtlich der *Validität* sind die realen Daten unter Berücksichtigung des definierten Datenformats-, -typs und -bereichs auf ihre Gültigkeit hin zu prüfen. Dabei kann das Format u. a. über die Länge und Anzahl an Ziffern bei der Erfassung eines Attributs definiert werden. Der Datentyp eines Attributs wird z. B. als Zeichenkette, Ganzzahl oder Gleitkommazahl angegeben. Der zulässige Datenbereich eines Attributs kann über die Beschränkung auf ein Minimum und Maximum festgelegt werden. Gemessen werden kann die Validität als Prozentsatz der als gültig eingestufteten Datenelemente durch Vergleich zwischen den Daten

2. Stand der Technik und Wissenschaft

und den Metadaten oder der Dokumentation für das Datenelement (Askham et al., 2013, S. 11). Berechnet werden kann die Validität DQ_{VD} unter Zuhilfenahme der Anzahl gültiger Beobachtungen und der Anzahl aller Beobachtungen im Datensatz $n_{ges,DS}$ gemäß Formel (9):

$$(9) DQ_{VD} = \frac{n_{gül}}{n_{ges,DS}}$$

Die Korrektheit beschreibt den Grad, in dem die betrachteten Daten das beschriebene Objekt oder Ereignis in der realen Welt korrekt beschreiben. Als Maß für die Korrektheit wird der Prozentsatz der Dateneinträge ermittelt, die die Regeln für Datengenauigkeit erfüllen. Eine konkrete Ermittlung der Wahrheit in der realen Welt kann durch Primärforschung oder vertrauenswürdige Referenzdaten erfolgen. Die Korrektheit kann auf jedes Objekt der realen Welt bezogen werden, das durch Daten in Datenelementen, Datensätzen oder Datenbanken charakterisiert oder beschrieben werden kann. Zur Beurteilung der Korrektheit kann die Relation der Anzahl akkurater Beobachtungen n_{akk} zu der Anzahl aller Beobachtungen im Datensatz $n_{ges,DS}$ bestimmt werden (Askham et al., 2013, S. 12). Gemäß Formel (10) lässt sich dieser Zusammenhang für die Korrektheit DQ_{KR} wie folgt darstellen:

$$(10) DQ_{KR} = \frac{n_{akk}}{n_{ges,DS}}$$

Die *Konsistenz* bezieht sich auf die Widerspruchsfreiheit der Daten, also auf das Fehlen von Unterschieden, wenn zwei oder mehr Darstellungen eines Sachverhalts mit einer Definition verglichen werden. Für die Analyse der Konsistenz kann die relative Häufigkeit der Widersprüche herangezogen werden (Askham et al., 2013, S. 13). Nach Formel (11) kann die Konsistenz DQ_{KN} durch das Verhältnis zwischen der Anzahl konsistenter Beobachtungen n_{kon} und der Anzahl aller Beobachtungen im Datensatz $n_{ges,DS}$ bestimmt werden:

$$(11) DQ_{KN} = \frac{n_{kon}}{n_{ges,DS}}$$

Neben den sechs Kerndimensionen können anwendungsspezifisch weitere Kriterien für die Datenqualität relevant sein und in die Datenqualitätsbewertung einbezogen werden. Diese können bspw. die Verwendbarkeit der Daten, zeitliche Aspekte der Daten, Flexibilität, Vertrauen in die Daten oder den Wert der Daten darstellen (Askham et al., 2013, S. 13 f.).

2.3.3 Vorgehensmodelle für Data Mining-Projekte

In der Unternehmenspraxis sind Vorgehensmodelle zur strukturierten Durchführung von Data Mining-Projekten etabliert (vgl. Bachmann, Kemper und Gerzer, 2014, S. 168). Während sich Modelle wie Knowledge Discovery in Databases (KDD) und das verfeinerte Knowledge Discovery in Industrial Databases (KDID) von der Struktur der Daten in Richtung Wissen

2. Stand der Technik und Wissenschaft

orientieren, existieren auch Modelle, die näher auf die logische Transformation in Richtung Lernprobleme eingehen. Die verbreitete *Sample, Explore, Modify, Model and Access*-Methodik des SAS Instituts konzentriert sich bspw. stärker auf diesen Ausschnitt der Vorgehensweise. In seinem Ablauf am intuitivsten – speziell in der Diskussion mit produktionsnahen Mitarbeitenden – ist die Vorgehensweise des *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM).

Dieser ist das verbreitetste und praxisnächste Vorgehensmodell für industrielle Datenanalyse, das basierend auf Data Mining Projekten entwickelt wurde (Weskamp et al., 2014, S. 31). Im CRISP-DM werden sechs Phasen nacheinander durchlaufen, wobei zwischen den einzelnen Phasen auch Iterationen möglich sind. Konkret handelt es sich bei den Phasen um *Geschäftsverständnis, Datenverständnis, Datenvorbereitung, Modellierung, Evaluation* und *Einführung* (Chapman et al., 2000, S. 10 f.).

Im Rahmen der ersten CRISP-DM Phase, dem *Geschäftsverständnis*, sind insbesondere die Projektzielsetzung sowie die Analyse und Bewertung der Ist-Situation vorzunehmen. Darüber hinaus ist auch die weitere Vorgehensweise des Projekts festzulegen (Chapman et al., 2000, S. 14 ff.).

Nachdem das Geschäftsverständnis erzeugt wurde, kann die Phase des *Datenverständnisses* eingeleitet werden. Diese umfasst die Datensammlung, eine deskriptive und explorative Datenanalyse sowie die Bewertung der Datenqualität. Bei der Datensammlung werden Daten erfasst und zweckgebunden gespeichert. Im Falle mehrerer Datenquellen ist ggf. eine Zusammenführung zu einem einzigen Datensatz vorzunehmen. Im Zuge der Datenbeschreibung sind grobe Datencharakteristika wie das Datenformat und die Datenmenge zu untersuchen. Außerdem ist zu prüfen, ob die Daten die Anforderungen erfüllen. Während der explorativen Datenanalyse wird die Verteilung von Schlüsselattributen der Vorhersageaufgabe, die Beziehungen zwischen Attributen und die Ergebnisse einfacher Aggregationen analysiert sowie statistische Analysen durchgeführt. Außerdem werden Grafiken und Diagramme zum Aufzeigen von Attributen zur Visualisierung von Datenmustern und Besonderheiten in den Daten erstellt. Eine Bewertung der Datenqualität erfolgt durch Überprüfung der Vollständigkeit und Korrektheit. Zudem können bereits Lösungen für Probleme mit der Datenqualität vorgeschlagen werden, was den Übergang zu der nächsten CRISP-DM Phase darstellt (Chapman et al., 2000, S. 17 ff.).

Die Phase *Datenvorbereitung* verfolgt das Ziel, einen finalen Datensatz für die Modellierung zu konstruieren. Hierzu zählen die Datenauswahl, -bereinigung, -konstruktion, -integration und -formatierung. Bei der Datenauswahl werden anhand von Projektzielen, Datenqualität und Einschränkungen Daten für die Modellierung festgelegt. Eine Datenbereinigung stellt die notwendige Datenqualität entsprechend potenzieller ML-Verfahren her. Dabei kann eine Auswahl von Teilmengen, das Ersetzen oder Entfernen fehlender oder fehlerhafter Werte

2. Stand der Technik und Wissenschaft

notwendig sein. Allgemein sind Maßnahmen einzuleiten, um die Probleme hinsichtlich der Datenqualität zu lösen, die in der Phase des Datenverständnisses erkannt wurden. Im Zuge der Datenkonstruktion werden konkrete Operationen zur Datenaufbereitung durchgeführt. Es erfolgt eine Erstellung abgeleiteter Attribute, neuer Datensätze oder transformierter Attributwerte. Durch die Datenintegration wird ein zusammengeführter Datensatz erstellt, der sämtliche als relevant erachteten Attribute in aufbereiteter Form enthält. Bei der Datenformatierung werden ggf. Formatierungstransformationen für das Modellierungswerkzeug durchgeführt (Chapman et al., 2000, S. 20 ff.).

Die vierte Phase des CRISP-DM, die *Modellierung*, befasst sich v. a. mit der Auswahl und dem Vergleich von ML-Verfahren und Algorithmen. Im Zuge der Modellerstellung wird dabei zunächst eine Aufteilung des Datensatzes in Trainings- und Testdaten vorgenommen. Für die gewählten Verfahren werden geeignete Parametereinstellungen festgelegt. Modellerstellung und -training erfolgen im Allgemeinen auf Basis der Trainingsdaten. Die Bewertung der Modellgüte erfolgt dagegen anhand eines oder mehrerer gewählter Evaluationsmaße bei Anwendung auf den Testdaten sowie unter Berücksichtigung von domänenspezifischem Wissen. Bei Erstellung mehrerer Modelle kann außerdem eine Rangfolge der Modelle gebildet werden (Chapman et al., 2000, S. 23 ff.).

In der *Evaluation* wird eine Ergebnisauswertung vorgenommen, in der eine Bewertung der Modelle bezüglich der Zielerreichung durchgeführt wird. Durch den Abgleich mit der Aufgabenstellung aus dem Geschäftsverständnis wird der iterative Charakter des CRISP-DM ersichtlich (siehe Abb. 2-8). Dabei ist eine Ursachenanalyse für nicht erfüllte Ziele durchzuführen. Außerdem sind gesammelte Erkenntnisse zu dokumentieren. Die Ergebnisse werden hinsichtlich des Erfolgs für den gesamten Anwendungsfall bewertet (Chapman et al., 2000, S. 26 f.).

Die letzte Phase des CRISP-DM, die *Einführung*, beschreibt die strategische Einführung durch Integration der Modelle und die IT-Umsetzung. Dabei werden Aspekte der Pilotierung, des laufenden Betriebs durch Überwachung und Anpassung der Modelle sowie des Projektabschlusses berücksichtigt (Chapman et al., 2000, S. 28 f.).

2. Stand der Technik und Wissenschaft

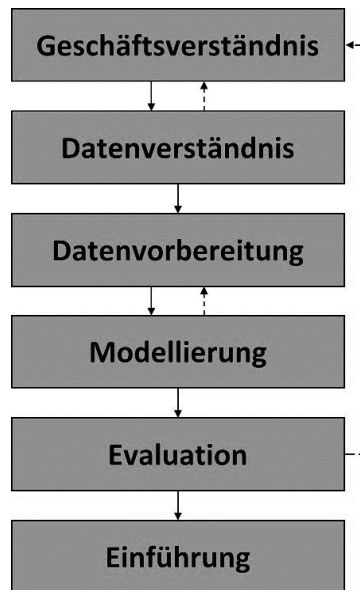


Abbildung 2-8: CRISP-DM Vorgehensmodell (Chapman et al., 2000, S. 10)

2.3.4 Evaluationsmaße für Prognose- und Klassifikationsprobleme

Da es sich bei der Engpassprognose um eine Kombination aus Prognose und Klassifikation handelt (siehe Kapitel 2.1.3), sind für beide Problemstellungen geeignete Evaluationsmaße zu berücksichtigen.

Zur empirischen Bewertung von Prognosen werden zunächst die prognostizierten Werte mit den tatsächlich eingetretenen Werten verglichen (Davydenko, Sai und Shcherbakov, 2021, S. 80). Das für diesen Vergleich gewählte Evaluationsmaß zur Bewertung der Prognosegenauigkeit muss dabei über ausreichende Robustheit und Interpretierbarkeit verfügen (vgl. Fildes, 1992, S. 97). Dabei sind etablierte absolute Fehlermaße wie *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Deviation* (MAD), *Sum of Squared Error* (SSE), *Mean Squared Error* (MSE) und *Root Mean Squared Error* (RMSE) prinzipiell für einen Vergleich der Prognose verschiedener Zeitreihen ungeeignet (Zhang, Eddy Patuwo und Y. Hu, 1998, S. 51 f.). Dies ist darauf zurückzuführen, dass absolute Fehlermaße skalenabhängig sind (Davydenko und Fildes, 2016, S. 3).

Demgegenüber stellen relative bzw. skalenunabhängige Evaluationsmaße eine entsprechende Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Zeitreihen und Prognoseverfahren sicher. In der praktischen Anwendung ist der *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) das verbreitetste relative Evaluationsmaß für Prognosen (vgl. Armstrong, 2001a, S. 460) und weist eine hohe Eignung zur Bewertung der Prognoseleistung auf (Sagheer und Kotb, 2019, S. 209). *MAPE* wird dabei unter Verwendung der tatsächlichen Beobachtungswerte Y_i , der Prognosewerte F_i sowie der Anzahl der Beobachtungen der Testdaten n_{test} gemäß Formel (12)

2. Stand der Technik und Wissenschaft

berechnet und gibt den Prognosefehler in Prozent an (Makridakis, Wheelwright und Hyndman, 1998, S. 44):

$$(12) \text{MAPE} = \frac{1}{n_{\text{test}}} \sum_i^{n_{\text{test}}} \left| \frac{Y_i - F_i}{Y_i} \right| \times 100$$

Interpretiert werden kann *MAPE* bspw. über einen Vergleich zwischen verschiedenen Prognoseverfahren und einem naiven Referenzverfahren (Küsters, 2005, S. 378).

Eine weit verbreitete Metrik zur Bewertung der Genauigkeit bei einer Klassifikation stellt die der *Konfusionsmatrix* dar (Subramaniyan et al., 2018, S. 535). Bei einer Klassifikation können die Anzahl korrekt und inkorrekt durchgeführter Klassifikationen in einer Konfusionsmatrix dargestellt werden. Eine Konfusionsmatrix zeigt dabei die Unterschiede zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Klasse auf. Die inneren Zellen der Konfusionsmatrix enthalten dabei die Anzahlen der als *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP) und *False Negative* (FN) erkannten Beobachtungen (siehe Tab. 1). Dabei entspricht *TP* der Anzahl der Beobachtungen, die korrekterweise als positiv und *TN* der Anzahl der Beobachtungen, die korrekterweise als negativ klassifiziert wurden. Im Gegensatz dazu stellen *FP* und *FN* die Anzahl der Beobachtungen dar, die fälschlicherweise als positiv bzw. negativ klassifiziert wurden. Aus einer Konfusionsmatrix können verschiedene etablierte Evaluationsmaße für die Klassifikation wie bspw. *Accuracy*, *Precision* und *Recall* berechnet werden (vgl. Bradley, 1997, S. 1145 f.).

| | | Prognoseergebnis | |
|------------------------|---------|---------------------|--------------------|
| | | Positiv | Negativ |
| Tatsächliches Ergebnis | Positiv | True Positive (TP) | False Negativ (FN) |
| | Negativ | False Positive (FP) | True Negativ (TN) |

Tabelle 1: Konfusionsmatrix (in Anlehnung an Bradley, 1997, S. 1146)

Accuracy beschreibt den Anteil korrekt durchgeführter Klassifikationen (*TP+TN*) bezogen auf die Anzahl aller Klassifikationsfälle (*TP+TN+FP+FN*). Dagegen wird mit *Precision* die Anzahl der korrekt als positiv klassifizierter Beobachtungen (*TP*) bezogen auf die Gesamtzahl der als positiv klassifizierten Beobachtungen (*TP+FP*) dargestellt. *Recall* ist ein Evaluationsmaß, dass die Anzahl korrekt als positiv klassifizierter Beobachtungen (*TP*) in ein Verhältnis gegenüber allen tatsächlich positiven Beobachtungen setzt (*TP+FN*). Die Formelzusammenhänge zur Berechnung von *Precision*, *Accuracy* und *Recall* sind durch die Formeln (13), (14) und (15) dargestellt (Bradley, 1997, S. 1146):

$$(13) \text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100$$

$$(14) \text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100$$

2. Stand der Technik und Wissenschaft

$$(15) \text{ Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100$$

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Die Methodik zur Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen mittels ML-Verfahren wurde in sechs Arbeitspakete (AP) entwickelt. Die Vorgehensweise bei der Bearbeitung wurde dabei an das praxisorientierte Vorgehensmodell CRISP-DM (Chapman et al. 1999) angelehnt und verortet die AP und AH (Abschnitt 1.2) entsprechend.

In AP 1 wurden die Verfahren zur Engpassidentifikation mit den technischen Rahmenbedingungen und den praxisbezogenen Anwenderinteressen zusammengeführt. Während die Prognose dynamischer Engpässe als datenanalytische Problemstellung bereits zu Beginn des Projektes feststand, entsprechen die weiteren Schritte in AP 1 dem ersten Schritt des CRISP-DM, dem *Geschäftsverständnis*. Neben dem Analysebedarf im PA wurden die Rahmenbedingungen für die Datenanalyse und das Verfahren zur Engpassidentifikation spezifiziert. Zunächst wurden industrielle Anwendungsfälle charakterisiert, Anforderungen an eine Engpassidentifikation und -prognose ermittelt und daraus eine Bewertungssystematik für Identifikationsverfahren abgeleitet. Danach erfolgte die Bewertung potenziell geeigneter Verfahren anhand der festgelegten Bewertungssystematik und die Auswahl von Identifikationsverfahren für die Engpassprognose.

Ausgangspunkt des verfolgten Ansatzes zur Definition des Datenbedarfs und zur Beschaffung der Produktionsdaten aus dem PA war der Abgleich der in AP 1 erarbeiteten Verfahren zur Engpassidentifikation und ihren Anforderungen an die Daten mit den, bei den Anwenderunternehmen verfügbaren Daten und deren Datenreife. Dieser Abgleich erfolgte in einer Kombination aus digitalen Workshops im Rahmen der PA-Sitzungen und detaillierten Analysen der verfügbaren Daten in Interviews mit Wissensträgern aus den Unternehmen. Der Arbeitsaufwand in AP 2 bestand in der Identifikation und Strukturierung der erforderlichen Informationen, um den erforderlichen Reifegrad der Daten für die Engpassidentifikation zu bestimmen. Gleichzeitig wurde der Aufwand für den Abgleich mit den jeweiligen Anwendersituationen anhand eines Reifegradmodells durchgeführt. Die Arbeiten umfassten weiterhin die Identifikation potenzieller Datenquellen, die Akquise von Produktionsdaten der PA-Unternehmen, die Bestätigung ihrer Eignung durch eine explorative Vorstudie sowie die Auswahl eines Datensatzes für die folgenden AP. AP 2 stellte das *Datenverständnis* in der CRISP-DM Vorgehensweise dar.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen AP wird mit der *Datenvorverarbeitung, der Modellierung und der Evaluation* in AP 3 fortgesetzt. Hier wurde zunächst die Engpassprognose für einen Anwendungsfall vorbereitet, modelliert und evaluiert. Darüber hinaus wurden Anforderungen an die Datenqualität definiert. Anschließend wurden die erforderlichen Schritte zur Datenvorverarbeitung durchgeführt. In Abhängigkeit der gewählten

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Identifikationsmethoden wurde ein Modell zur Engpassprognose systematisch aufgebaut. Gemäß datenwissenschaftlicher Standards wurden verschiedene Modellierungsverfahren miteinander verglichen. Darüber hinaus wurden zwei Referenzmodelle erstellt und in die Bewertung der Engpassprognose einbezogen. Anschließend wurden die Analyseschritte verallgemeinert und zu einer Vorgehensweise zusammengefasst, so dass die Methodik auf weitere Anwendungsfälle übertragen werden kann. Zur Erprobung wurden zwei weitere Anwendungsfälle herangezogen.

Das AP 4 hat keinen direkten Bezug zu einem der Schritte des CRISP-DM. Im AP wurden die Prognoseergebnisse aufbereitet und größtenteils an die Unternehmen weitergegeben. Ebenso wurden unternehmensindividuelle Maßnahmen zur Vermeidung der prognostizierten Engpässe entwickelt und im Projektverlauf validiert. Die Maßnahmen wurden anschließend zu domänenunabhängigen Maßnahmen zusammengefasst und in einem Katalog verallgemeinert.

AP 5 bildete das Pendant zum sechsten Schritt des CRISP-DM, der *Einführung*. Bei den Pilotanwendern Fa. Albrecht Jung GmbH, Fa. Robert Bosch GmbH und Fa. BMW Group AG wurde die Einführung der Methodik unterstützt und an die Umgebung des Produktionssystems angepasst. Zusätzlich konnte bei einem dieser Pilotanwender eine technische Infrastruktur für die Methodik geschaffen werden. Zuletzt wurde in diesem AP die Untersuchung und Bewertung der Einführung hinsichtlich der Zielerreichung durchgeführt.

Zuletzt wurde im sechsten AP des Forschungsvorhabens ein IT-Werkzeug zur benutzerfreundlichen Anwendung der Engpassprognose für den PA entwickelt. Die Entwicklung, Nutzung und Implementierung des Werkzeugs wurde dokumentiert. Auf der Homepage des Forschungsvorhabens wurde das IT-Werkzeug weiteren interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Während der gesamten Projektlaufzeit führte das Forschungsinstitut verschiedene Aktivitäten zum Projektmanagement, zur Öffentlichkeitsarbeit und Dokumentation sowie zum Ergebnistransfer durch. AP 7 war somit ein begleitendes AP, in dem Projekttreffen, Veröffentlichungen und die Projektdokumentation gemanagt wurden.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

3.1 AP 1: Erfassung von Anwenderanforderungen und Festlegung eines Identifikationsverfahrens

TAP 1.1: Erfassung von Anforderungen und Übertragung in eine Bewertungssystematik

Zielsetzung:

Mit TAP 1.1 wurde der Einstieg in das Forschungsprojekt geleistet. Ziel des TAP war es mit der Unterstützung des PA Anforderungen an Engpassidentifikations- und -prognoseverfahren zu erfassen und diese in eine Bewertungssystematik zu übertragen. Dabei wurde ebenfalls angestrebt ein möglichst einheitliches Verständnis des dynamischen Engpassmanagements innerhalb des PA zu entwickeln.

Durchgeführte Arbeiten:

Zur Klassifizierung potenzieller Engpassszenarien wurden industrielle Anwendungsfälle anhand zuvor definierter Kategorien charakterisiert. Diese wurden im Rahmen des ersten PA-Treffens interaktiv mit den teilnehmenden Unternehmen in Kleingruppen skizziert. Durch eine Aufbereitung der Ergebnisse und Einzelgespräche mit Unternehmensvertretern wurden die Ergebnisse des Workshops um fehlende Informationen ergänzt. Insgesamt entstanden auf diese Weise acht übersichtliche Steckbriefe, die die potenziellen Anwendungsfälle hinsichtlich verschiedener Kategorien (z. B. Engpassproblemstellungen, zentrale Akteure und Anwender, Potenziale des Engpassszenarios, Risiken und Hemmnisse) charakterisieren.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen


| Albrecht JUNG GmbH & Co. KG | |
|---|---|
|  | |
| Branche: | Gebäudesystemtechnik |
| Tätigkeitsbereiche: | Insbesondere Montagetätigkeiten, ergänzt durch Beschriftung, Prüftätigkeiten, Verpackung, u.a. |
| Wertstrom: | <u>Automatisierte Steckdosenfertigung und manuelle Unterstützungsprozesse:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fertigung von Steckdoseneinsätzen • Parallel-Fertigung von Abdeckungen • „Verheiratung“ von Einsatz und Abdeckung zur komplettierten Steckdose • Verpackung und Palettierung |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Manuelle, außerplanmäßige Umpriorisierungen („Feuerwehreinsätze“) • Keine Erfüllung der geforderten Stückzahlen • Mehrarbeit • Stress und ggf. Mitarbeiterunzufriedenheit |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Teilnehmer der Shopfloorrunde für den Bereich der Steckdosenfertigung: direkte Mitarbeiter, Schicht- und Produktionsleitung, IE, technischer Service • Kernanwender i. e. S. nicht vorhanden, da Durchführung des Engpassmanagements eher unregelmäßig und bei Bedarf |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsauftragsinformationen (Produkte, Materialien, Stückzahl, Fertigungsschritte) • Detailliertere Störinformationen • (bis dato) keine Erhebung von Zeitstempeln für die einzelnen Arbeitsstationen innerhalb der Anlage • Im aktuellem System kaum Möglichkeiten zum Aufbau von Zwischenpuffern |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Harmonisierung der Produktion • Verbesserte Planbarkeit • Transparenz • Erreichung der Planstückzahlen ohne Überlastung • Reduktion von Störungen • Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für die zukünftige dritte Anlage |

Abbildung 3-1: Steckbrief eines PrEPFlow-Anwendungsfalls (Beispiel Fa. Jung)

Anschließend wurden Anforderungen an eine Engpassidentifikation und -prognose abgeleitet. Auf Basis einer Literaturrecherche und einer Expertendiskussion konnten in Summe acht Anforderungskriterien erhärtet werden, die in ihrer Relevanz von beiden Gruppen bestätigt wurden. Diese sind zusammenfassend in Tabelle 3.1 dargestellt.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Tabelle 3.1: Wesentliche Anforderungskriterien an die Verfahren zur Engpassidentifikation und -prognose

| Kriterium | Beschreibung | Literatur |
|---------------------------------|--|--|
| Ressourcenbedarf | <ul style="list-style-type: none"> effiziente Analyse mit einem möglichst geringen Ressourcenbedarf erforderliche Bindung von Anlagen- und Personalressourcen inklusive der vorausgesetzten Engpassexpertise | (Hofmann et al. 2019, S. 151) |
| Datenverfügbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> hohe Datenverfügbarkeit und geringer Datenbeschaffungsaufwand aktuelle Datenversorgung einfache und häufig bereits vorhandene Datenquellen, z. B. Betriebsdatenerfassung (BDE) oder Manufacturing Execution System (MES) | (Gehr und Hellingrath 2007; S. 11; Küsters 2005, S. 396) |
| Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> schnelle Erkennung von Engpässen erforderlich, da moderne Produktionsszenarien eine kurzfristige Prozesssteuerung und eine schnelle Entscheidungsfindung benötigen | (Li et al. 2009, S. 5019; Mayer et al. 2020, S. 238) |
| Vorhersagehorizont | <ul style="list-style-type: none"> rechtzeitige Vorhersage von Engpassverschiebungen, um reaktive und proaktive Gegenmaßnahmen (z. B. Wartungsstrategien für Engpassmaschinen) einzuleiten und den Durchsatz des Produktionssystems zu maximieren | (Subramaniyan et al. 2018, S. 534) |
| Transparenz | <ul style="list-style-type: none"> Verfahren sollten möglichst nachvollziehbar und ohne Expertenwissen einsetzbar sein Nachvollziehbarkeit des Verfahrens, der Ergebnisse und ihrer Darstellung | (Roser et al. 2014, S. 68) |
| Maßnahmenabbildung | <ul style="list-style-type: none"> Vorschlag von Handlungsempfehlungen und Verbesserungsmaßnahmen gegen die Engpasssituation anstreben einer automatischen Ausgabe von anwendungsspezifischen Empfehlungen | (Subramaniyan et al. 2018, S. 534) |
| Übertragbarkeit | <ul style="list-style-type: none"> möglichst breite Anwendung integrierbar in bestehende Tool-Umgebungen wertstromübergreifende Anwendung | (Subramaniyan et al. 2018, S. 533-534) |
| Zuverlässigkeit/ Genauigkeit | <ul style="list-style-type: none"> Evaluationsmaß zur Bewertung von Verfahren zur Identifikation und Prognose von Engpässen erhöht die Akzeptanz und Nutzbarkeit eines Verfahrens | (Roser et al. 2014, S. 63; Subramaniyan et al. 2018, S. 534-535) |

Diese Kriterien konnten im Rahmen eines Anforderungsworkshops in der ersten Sitzung des PA zusätzliche praktisch bestätigt werden. Anschließend wurden die Anforderungskriterien im direkten Austausch mit den Teilnehmenden des PA diskutiert und um konkrete Aspekte aus der betrieblichen Praxis ergänzt (siehe Abbildung 3-2). Diese betreffen sowohl Anforderungen an ein Identifikationsverfahren als auch Erwartungen an die zu entwickelnde Prognosemethodik. Auf diese Weise konnten insbesondere die praxisorientierten Anforderungen der PA-Anwenderunternehmen berücksichtigt und frühzeitig im Vorhaben eingebracht werden.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen



Abbildung 3-2: Anforderungen an die Engpassidentifikation und -prognose aus der Praxis (Ergebnisdarstellung der ersten PA-Sitzung)

Die Anforderungen an die Engpassidentifikation und -prognose sind vielfältig und fokussieren auf Aspekte, die für eine erfolgreiche Anwendung berücksichtigt werden müssen.

Um eine objektive und quantitative Bewertung potenziell geeigneter Identifikationsverfahren in TAP 1.2 zu ermöglichen, wurden die gesammelten Anforderungskriterien (vgl. Abbildung 3-2) in eine Bewertungssystematik im Stil einer Nutzwertanalyse (NWA) überführt. Dazu wurden die Anforderungskriterien zunächst in einem paarweisen Vergleich gewichtet. Ein Expertenteam, bestehend aus Mitarbeitenden des RIF e. V., verglich die Kriterien miteinander und bewertete sie mit 0 (weniger wichtig als), 1 (gleich wichtig wie) oder 2 (wichtiger als). Die größte Bedeutung wurde den Kriterien *Datenverfügbarkeit* (25%), *Zuverlässigkeit* und *Genauigkeit* (20%) und *Transparenz* (20%) beigemessen. Die Anforderungen an die *Datenverfügbarkeit* und die *Zuverlässigkeit* und *Genauigkeit* wurden als Muss-Kriterien definiert. Muss-Kriterien stellen sicher, dass die bewerteten Verfahren wichtige Kriterien mindestens erfüllen. Wird ein Muss-Kriterium nicht erfüllt, wird das Verfahren von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die Wahl von Muss-Kriterien geht einerseits mit der hohen Gewichtung dieser Anforderungskriterien einher. Zum anderen erscheint ein Verfahren, das höchste Anforderungen an die *Datenverfügbarkeit* stellt, in der breiten industriellen Praxis von vornherein nicht umsetzbar. Ebenso ist ein Verfahren, das eine vorgegebene Fehlertoleranz hinsichtlich der *Zuverlässigkeit* und *Genauigkeit* des Engpassnachweises nicht einhält, als unbrauchbar einzustufen bzw. wird keine Anwenderakzeptanz finden. Dieses Vorgehen sollte sicherstellen, dass die ausgewählten Identifikationsverfahren sowohl den spezifischen

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Rahmenbedingungen von KMU gerecht werden, als auch die erforderlichen analytischen Zusammenhänge für eine anschließende Engpassprognose zuverlässig abbilden.

Ergebnisse:

Als finales Ergebnis von TAP 1.1 und zur Vorbereitung von TAP 2.1 kann die Strukturierung der NWA zur Auswahl eines Engpassidentifikationsverfahrens angesehen werden. Die wesentlichen Schritte auf dem Weg dorthin und von ebenfalls großer Relevanz in der Kommunikation und Einbeziehung des PA sind die Definition und Verfeinerung der Use Cases in den Anwenderunternehmen (exemplarisches Ergebnis: Use Case Steckbriefe), die Definition und Bewertung von Anforderungskriterien (siehe Auswahl der relevanten Kriterien) und ihre praktische Bewertung und Erweiterung in gemeinsamer Arbeit mit dem PA. Nur in der Kombination beider Bewertungsrichtungen (wissenschaftlich: RIF und industriell: PA) konnte eine zielgerichtete Anforderungsdefinition für die folgenden AP und insbesondere die Verfahrensauswahl in TAP 1.2 erfolgen.

TAP 1.2: Bewertung und Auswahl verfügbarer Identifikationsverfahren im Projektkontext

Zielsetzung:

Das TAP 1.2 setzte auf den Ergebnissen des TAP 1.1 auf und bereitete diese weiter für die Arbeit im Projekt auf. Ziel des TAP war es mittels Unterstützung wissenschaftlicher Methoden und praktischer Einschätzungen für den Projektverlauf geeignete Engpassidentifikations- und -prognoseverfahren zu bewerten und auszuwählen. Dabei wurde ebenfalls angestrebt einen vereinfachten Zugang von Anwendern zu den ausgewählten Verfahren herzustellen.

Durchgeführte Arbeiten:

Die Bewertung und Auswahl potenziell geeigneter Identifikationsverfahren anhand der entwickelten Bewertungssystematik erfolgte in TAP 1.2. Im Vorfeld war eine sinnvolle Vorauswahl von Identifikationsverfahren zielführend, um den Aufwand bei der Bewertung in Grenzen zu halten. Hierbei wurden Verfahren, die ähnliche Indikatoren zur Engpassidentifikation verwenden, zusammengefasst. Insgesamt wurden drei Verfahren für die Bewertung mittels NWA vorausgewählt. Der Fokus lag dabei auf Zeitpunktverfahren, da Durchschnittswertverfahren für die zeitpunktbezogene Ermittlung dynamischer Engpässe eher ungeeignet sind. Hierbei wurde jedoch nicht ausschließend gearbeitet, so dass auch ein Verfahren der Durchschnittswertverfahren ausgewählt wurde.

Als Zeitpunktverfahren, das auf der Bewertung von Pufferbeständen basiert, fiel die Wahl auf den Bottleneck Walk (BNW). Dieses Verfahren wird bereits in der industriellen Praxis eingesetzt (Roser et al. 2014). Als zweites zeitpunktbasiertes Verfahren wurde die Active Period Method (APM) ausgewählt. Sie basiert auf der Auswertung von Maschinenzuständen (Roser et al. 2001). Als drittes Verfahren wurde – wie beschrieben – ein Vertreter der Durchschnittswertverfahren gewählt. Die Interdeparture Time Variance (ITV) Methode basiert auf der Auswertung von Prozesszeitvarianzen (Betterton und Silver 2012). Da es sich bei der

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

ITV nicht um ein Zeitpunktverfahren handelt, wird das Verfahren durch ein gleitendes Fenster mit definierter Länge angepasst, so dass eine echtzeitnahe Engpassidentifikation möglich ist. Wesentlich in der Zusammenstellung der Gesamtauswahl ist, dass alle drei ausgewählten Verfahren auf unterschiedlichen Indikatoren zur Engpassidentifikation basieren.

Anhand der zuvor erstellten Bewertungssystematik wurden die in die engere Wahl gezogenen Identifikationsverfahren abschließend durch das Expertenteam bewertet. Die Ergebnisse der NWA (Abbildung 3-3) zeigen, dass alle drei Verfahren mit Gesamtnutzwerten zwischen 5,45 und 6,79 auf einer Skala von 0 bis 10 eine grundsätzliche Eignung für die Engpassidentifikation und -prognose besitzen und sich die Gesamtnutzwerte nur geringfügig unterscheiden. Zudem erfüllen alle Verfahren die Muss-Kriterien, so dass hieraus kein Ausschluss eines Verfahrens abzuleiten ist. Wie bereits dargestellt, verwenden die Verfahren jeweils unterschiedliche Engpassindikatoren, weshalb ein direkter Vergleich nicht sinnvoll erscheint. Aus den genannten Gründen wurde entgegen der im Forschungsantrag beschriebenen Vorgehensweise keine Fokussierung auf ein einzelnes Verfahren vorgenommen. Stattdessen wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine Weiterentwicklung der Verfahren und ggf. eine Kombination der Verfahren notwendig sind, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Daher wurden als Ergebnis von TAP 1.2 alle vorausgewählten Identifikationsverfahren für eine detaillierte Betrachtung und als Grundlage für die Entwicklung eines Verfahrens zur Engpassprognose in AP 3 ausgewählt.

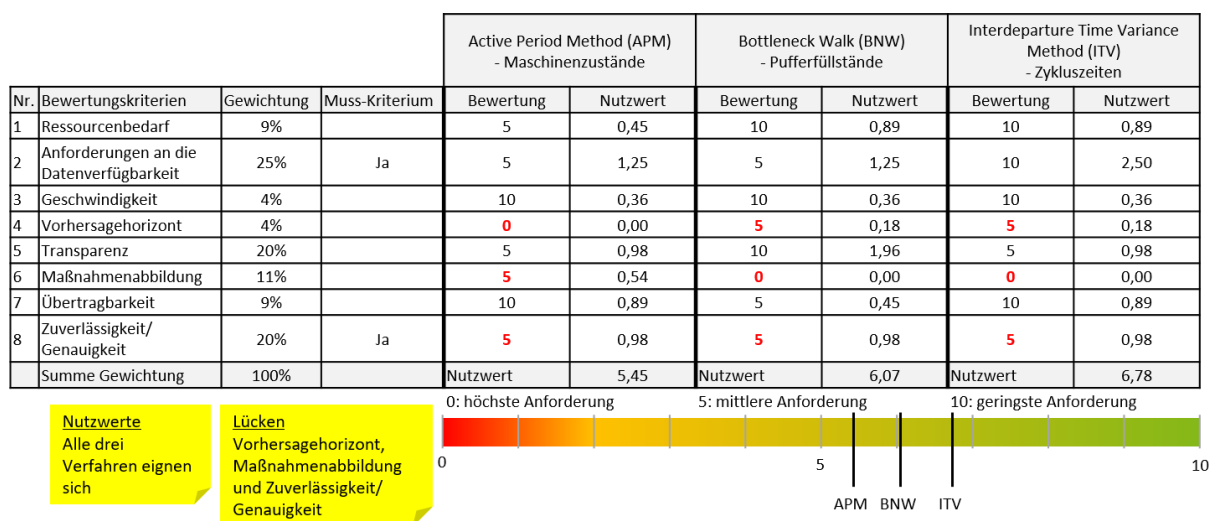


Abbildung 3-3: Bewertung der Engpassidentifikationsverfahren im Rahmen einer NWA

Als verfahrensbedingte Schwachstellen wurden im Rahmen der NWA die Anforderungskriterien *Vorhersagehorizont*, *Maßnahmenabbildung* und *Zuverlässigkeit und Genauigkeit* identifiziert. Die Verfahren stellen hohe Anforderungen an die genannten Kriterien. Bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Engpässen sind diese Schwachstellen entsprechend zu berücksichtigen.

Ergebnisse:

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Als wesentliche Ergebnisse des TAP 1.2 sind die drei ausgewählten Verfahren BNW, APM und ITV-Methode zu erwähnen. Alle drei konnten in ihrer fachlichen und generellen praktischen Eignung bestätigt werden. Zudem wurde in Zusammenarbeit mit den Anwendern eine niederschwellige Information zur Funktionsweise und den Anforderungen an die Eingangsdaten entwickelt. Diese wurden in AP 2 detaillierter betrachtet und später tiefer ausgestaltet.

3.2 AP 2: Definition des Datenbedarfs und Beschaffung der Produktionsdaten aus dem PA

TAP 2.1: Definition von datenanalytischen Anforderungen an zu prognostizierende Produktionsdaten

Zielsetzung:

Das TAP 2.1 setzte auf der getätigten Auswahl des TAP 1.2 auf und arbeitete die Datenbedarfe und erforderlichen Datenbeschaffungsprozesse heraus. Ziel des TAP war es die Datenbedarfe und erforderliche Datenreife zum Methodeneinsatz zu bewerten und eine zielgerichtete Beschaffung der relevanten Daten für ausgewählte Anwendungsfälle im PA zu erreichen. Dabei wurde begleitend versucht, den Zugang von Anwendern zu den Datenwelten zu vereinfachen und eine schnelle Bewertung der Eignung in Use Cases vorzunehmen.

Durchgeführte Arbeiten:

Als Basisinformationen für die Identifikation dynamischer Engpässe dienen Prozesszeiten, Pufferfüllstände und Maschinenzustände. Diese Kennzahlen konnten gemeinsam mit den Anwendern validiert und in ihrer generellen Eignung bestätigt werden. Abbildung 3-4 zeigt die Kennzahlen der drei Identifikationsverfahren.

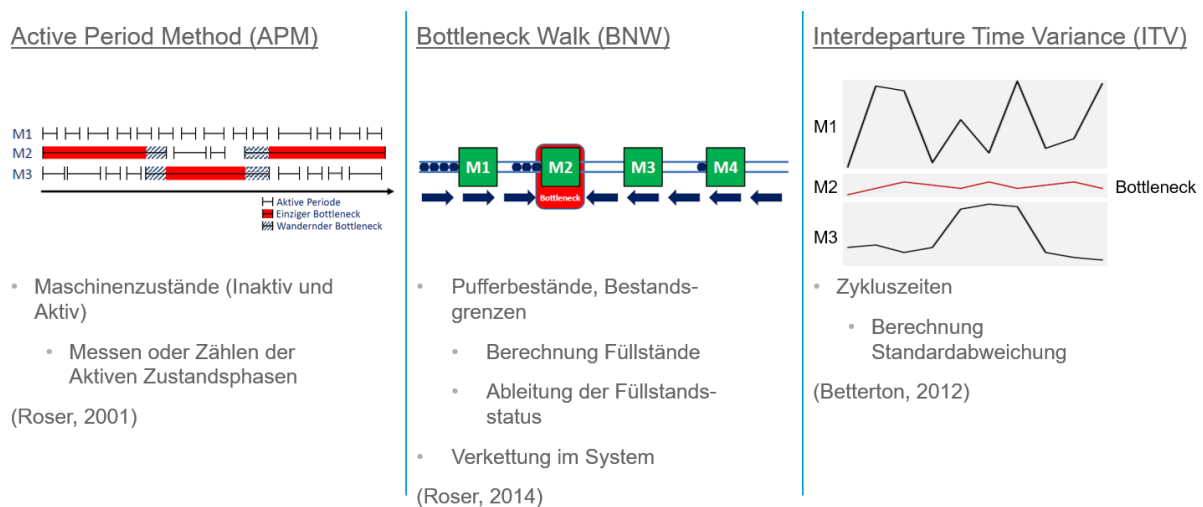


Abbildung 3-4: Definition von Kennzahlen zur Identifikation dynamischer Engpässe

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Um die Daten für eine spätere Engpassprognose verwenden zu können, wurden die Anforderungen an die bereitzustellenden Daten weiter verfeinert.

Hierzu wurden exemplarische Datenschemata aus der industriellen Praxis mit den in wissenschaftlichen Publikationen verwendeten Datenschnittstellen und –populationen verglichen. In der Überlagerung beider Sichten war es Aufgabe der Experten vom RIF eine geeignete standardisierte Schnittstellenbeschreibung (ein Standardformat) zu definieren, in dem die Verfahren die Daten erwarten und das Anwendern gleichzeitig als Schema zur Suche geeigneter Daten in ihren Produktionsumgebungen dient. Wesentliches Ergebnis der Arbeiten ist ein neutrales Datenschema, das in Form einer Excel-Struktur die Anforderungen an die Nutzerdaten für jedes der oben dargestellten Verfahren detailliert. Abbildung 3-5 zeigt beispielhaft das beschriebene Datenschema für die APM. Neben den praktischen Vorteilen der Definition im Excel-Format für die Anwender (Ausfüllbarkeit, exemplarische Datenauszüge können analysiert werden, Verweise auf datenhaltende Systeme können mit dokumentiert werden) sind auch die projektinternen Vorteile für die spätere Definition der Datenschnittstelle in Richtung des Prognosewerkzeugs von Bedeutung (Abschnitt AP 6).

| t | Aktive Periode Station_0 <i>integer</i> Kardinalskala | Aktive Periode Station_1 <i>integer</i> Kardinalskala | Aktive Periode Station_2 <i>integer</i> Kardinalskala | ... | Aktive Periode Station_X <i>integer</i> Kardinalskala |
|---|--|--|--|-----|--|
| 0 | | | | ... | |
| 1 | | | | ... | |
| 2 | | | | ... | |
| 3 | | | | ... | |

Abbildung 3-5: Definition des Datenschemas für das Identifikationsverfahren APM

In den Interviews mit den Anwenderunternehmen zur Bereitstellung belastbarer Daten für das Forschungsprojekt wurde neben der grundsätzlichen Verfügbarkeit, die anhand des Datenschemas geprüft wurde, ein besonderer Fokus auf die Bewertung des Datenreifegrads gelegt. Nach den Erfahrungen des RIF e.V. mit der Bewertung des Datenreifegrads, insbesondere in Industrial Data Science-Projekten, ist die Verwendung von Reifegradmodellen ein probates Mittel, um schnelle Bewertungen vorzunehmen und die entsprechenden Reifegradkriterien für die Anwenderunternehmen transparent zu machen.

Im Fall der Bewertung des Reifegrads von Daten für die Prognose dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen wurde eine bestehende Systematik zur Reifegradbewertung (Eickelmann et al. 2019) an die Anforderungen des Anwendungsfalls angepasst und für den Einsatz im Projekt weiterentwickelt. Die Anpassungen (vgl. Abbildung 3-6) umfassten eine Eingrenzung der Bewertungskriterien, die Definition von

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Anforderungsgrenzen (dunkelgrün) und die Auswahl von Kernkriterien (hellblau) zur vertieften Diskussion mit den Anwendern.

| Kriterien | Reifegradstufen | | | |
|---------------------------|---|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Datenerfassung | Manuell | Semi-automatisch | Weitestgehend automatisch | Online-basiert |
| Vollständigkeit | Einseitige und unvollständige Erfassung von Merkmalen | Erfassung wesentlicher Merkmale | Erfassung der als relevant geltenden Merkmale | Erfassung aller relevanten und (un-)beeinflussbaren Merkmale |
| Stichprobenumfang | Keine historischen Daten | Kleine Stichprobe je Objektgruppe | Gr. Stichprobe je Objektgruppe bei ungleichverteilt. Klassen | Gr. Stichprobe je Objektgruppe und Klasse |
| Datenhaltung | Papieraufzeichnungen | Dezentrale Datenhaltung mit einfacher Software | Datenmanagementsysteme mit zentraler Datenhaltung | Übergreifendes Data Warehouse |
| Datenformat | Schwer überführbare Formate | Eingeschränkt überführbare Formate | Unterschiedliche, direkt überführbare Formate | Übergreifendes Standardformat |
| Datenstruktur | Unstrukturierter Text oder Bilder | Semi-strukturierte Daten | Strukturierte, gemischt-skalierte Daten | Strukt., metrisch skalierte Daten und standardisierte Codes |
| Merkmalsausprägung | Ausschließlich Sollwerte | Hoch aggregierte Istwerte | Aggregierte Istwerte oder Rohdaten mit geringer Abtaste | Rohdaten in Echtzeit |
| Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf oberster Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf oberer Bezugsebene | Ausprägung der Werte auf nächst höherer Ebene | Ausprägung der Werte auf Einzelementebene |
| Konsistenz | Keine Konsistenz bzw. Integrität | Vermeht logische Widersprüche | Wenige logische Widersprüche | Durchgehende Konsistenz bzw. Integrität |
| Rückverfolgbarkeit | Keine Identifikationsnummer (ID) oder Zeitstempel | Unterschiedliche ID oder Zeitstempel vorhanden | Übergreifende ID oder Zeitstempel vorhanden | Übergreif. ID oder Zeitstempel für dieselbe Bezugsebene |

Abbildung 3-6: Datenreifegradmodell für die dynamische Engpassprognose (i. A. a. Eickelmann et al. (2019))

In der Ergebnisdiskussion im Rahmen der zweiten PA-Sitzung konnte die Struktur und Ausprägung der Anforderungsstufen des entwickelten Reifegradmodells validiert werden. Hinsichtlich der durchzuführenden explorativen Vorstudien wurden die Kriterien *Datenerhebung*, *Stichprobenumfang* und *Merkmalsausprägung* als wesentliche Diskussionspunkte identifiziert und in dezidierten Workshops mit jeweils zwei bis drei Anwenderunternehmen erarbeitet. Ziel der Detailanalyse war es, relevante Muss-Kriterien für die Eignung der Anwenderunternehmen für die explorativen Vorstudien zur Datenlage im weiteren Projektverlauf zu definieren. In den geführten Diskussionen der Teilgruppen und in der Zusammenführung der Ergebnisse für den gesamten PA konnte die durchgängig hohe Anforderung an die Datenreife, insbesondere für KMU, bestätigt werden.

Ergebnisse:

Als wesentliche Ergebnisse des TAP 2.1 sind die drei definierten Standardformate (je ein Format pro ausgewähltem Verfahren aus TAP 1.2) zu erwähnen. Die Formate konnten leichtgewichtig in Excel umgesetzt und um eine Definition des geforderten Datenreifegrades ergänzt werden. Das erarbeitete und auf das Engpassmanagement ausgeprägte Schema des erforderlichen Datenreifegrades dient als zusätzliches Teilergebnis Anwendern in der Orientierung zur Anwendungseignung der Verfahren. Zudem wurde in Zusammenarbeit mit den Anwendern eine wesentliche Übersicht unterschiedlicher in der Praxis vorhandener Systeme und potentieller Datenquellen erarbeitet. Diese diente zur Orientierung in den jeweiligen Anwender Use Cases aber auch darüber hinaus zur Identifikation potentieller Datenquellen und Anpassung von Datenhaltung in den KMU.

TAP 2.2: Akquise von Produktionsdaten im PA und Bestätigung der Eignung durch explorative Vorstudie

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Zielsetzung:

Das TAP 2.2 setzte auf der Vorarbeit des TAP 2.1 auf und arbeitete die Datenstrukturen der Anwenderunternehmen auf. Ziel des TAP war es die akquirierten Daten entlang der Standardformate einer explorativen Vorstudie zu unterziehen. Dabei wurden begleitend weitere Schlüsse hinsichtlich der Datenreife in den Anwenderunternehmen gezogen. Eine gemeinsame Eignungsbewertung auf Basis der Vorstudie war Abschluss dieses TAP.

Durchgeführte Arbeiten:

Mit der erforderlichen Datenreife aus TAP 1.2 und den Vertiefungen in den Diskussionen während der PA-Sitzung konnte festgestellt werden, dass nicht alle Anwenderunternehmen die geforderte Datenreife abbilden können. Als Konsequenz wurde im PA ein modulares Vorgehen bei der Datenerhebung vereinbart, das auch eine unvollständige Datenbasis zulässt (z. B. ein Datenausschnitt eines gesamten Wertstroms oder ein Datenausschnitt für nur eines der vorausgewählten Identifizierungsverfahren). Darüber hinaus wurde in bilateralen Gesprächen der Aufwand für die Erhebung der erforderlichen Daten genauer diskutiert und ein Pilotanwenderunternehmen (Albrecht Jung GmbH & Co. KG) für die Durchführung eines Datenakquisitionsprojektes ausgewählt.

Im Rahmen dieses Datenakquisitionsprojektes konnte mit Unterstützung eines weiteren PA-Mitglieds (IPS Engineers GmbH) die erforderliche Infrastruktur zur Datenerfassung, -verarbeitung und -speicherung projektbegleitend entwickelt und implementiert werden. Die Arbeiten wurden im April 2021 begonnen und konnten im November 2021 abgeschlossen werden. Kern der Entwicklungen war eine flexible Hard- und Softwarearchitektur, die eine zielgerichtete Erfassung der für die Engpassprognose erforderlichen Daten ermöglicht. Abbildung 3-7 skizziert die Architektur basierend auf kostengünstigen Lichtschranken, aktuell gängigen Hardwarekomponenten (bspw. IO-Link Inseln und Siemens SPS) sowie Open Source Tools. Für einen abgegrenzten Wertstrom konnte so eine vollständige und fein aufgelöste Datenbasis für die anschließende Datenexploration gewonnen werden.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

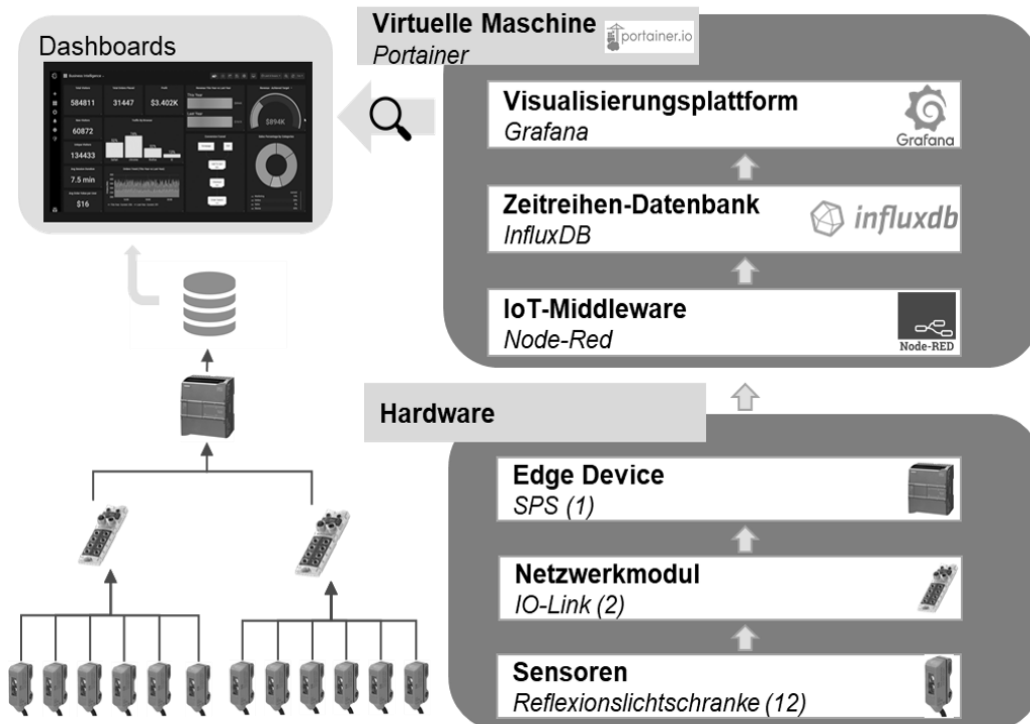


Abbildung 3-7: Datenerfassungsarchitektur zur Prognose dynamischer Engpässe

Im Rahmen der zweiten PA-Sitzung fand ein Workshop zur Identifizierung geeigneter Produktionsdaten statt. In Kleingruppen haben sich die PA-Teilnehmenden zum Thema Datenverfügbarkeit ausgetauscht. Ein Großteil der Unternehmen bezieht seine Produktionsdaten aus ERP-Daten (Enterprise Resource Planning), während einige auch auf Daten aus der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ihrer Maschinen sowie Daten aus Sensorik zurückgreifen. Mit diesen Erkenntnissen konnten insgesamt drei Datensätze aus Produktionsdaten von PA-Unternehmen akquiriert werden. Neben dem Pilotanwender (Albrecht Jung GmbH & Co. KG) haben die beiden größeren Unternehmen BMW und Bosch jeweils Daten zur Verfügung gestellt. Auffällig in den größeren Unternehmen war eine verbesserte Zugänglichkeit der Daten auf BDE und MES Basis und eine breitere Abbildung dieser Ebenen in der Software-Architektur. Abbildung 3-8 gibt einen kleinen Einblick in die explorative Voruntersuchung des Datensatzes, der auch in AP 3 betrachtet wird. Der Datensatz stammt aus einem Flexiblen Fertigungssystem (FFS) eines größeren Unternehmens. Dargestellt ist die explorative Analyse des Pufferverlaufs zwischen zwei Stationen. Unterhalb der Bestandsgrenze von 40 Produkten schwankt der Füllstand regelmäßig. Der Puffer ist im betrachteten Zeitraum sowohl leer als auch gefüllt, was auf ein dynamisches Engpassverhalten im betrachteten Produktionssystem hindeutet (Roser et al. 2014, S. 64).

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

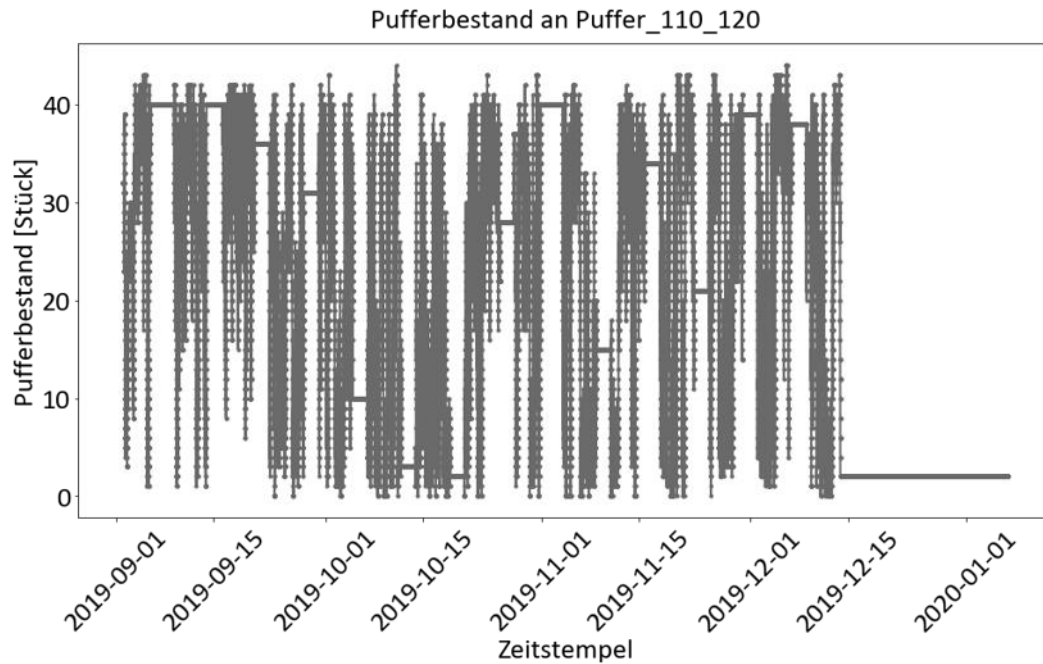


Abbildung 3-8: Explorative Vorstudie des Analyse-Datensatzes

Aufgrund der Variabilität des FFS und der reichhaltigen Daten eignet sich dieser Datensatz für die Vorhersage in AP 3. Die beiden anderen Datensätze wurden ebenfalls explorativ untersucht und auf ihre Eignung geprüft. Sie dienen der Validierung der verallgemeinerten Methodik in AP 5. Zunächst wird in AP 3 die Datenqualität des Datensatzes geprüft.

Ergebnisse:

Als wesentliche Ergebnisse des TAP 2.2 ist die Validierung der Eignung der Datenbestände aus den drei vorausgewählten Anwendungsszenarien der Anwender Jung, Bosch und BMW zu nennen. Durch die angeregten Diskussionen rund um das Thema Datenbeschaffung und -bereitstellung in den PA Sitzungen konnten auch zahlreiche Erkenntnisse über potentielle Quellsysteme, Ausprägung der hier vorhandenen Daten und auch hinsichtlich der Grundprobleme in der Datenreife in Bezug auf die konkreten Formate aus TAP 2.1 erarbeitet werden. Zudem wurden für die Anwenderunternehmen Bosch, BMW und Jung zusätzliche Potentiale in der Erfassung und Zusammenstellung der Daten aus den explorativen Studien erarbeitet, die zusätzlich Impulse gaben.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

3.3 AP 3: Entwicklung und Generalisierung eines Verfahrens zur Prädiktion dynamischer Engpässe

In AP 3 des PrEPFlow Vorhabens war die Entwicklung und Generalisierung eines Verfahrens zur Prädiktion dynamischer Engpässe zu leisten. Dies geschah wie im Antrag vorgesehen anhand von zwei Teilarbeitspaketen. TAP 3.1 beschäftigt sich hierbei mit der prototypischen Umsetzung der Prognose in einem Anwendungsfall, TAP 3.2 zielt auf die Reproduktion der Ergebnisse und eine Generalisierung der Vorgehensweise ab. Die Ziele durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse beider TAPs werden in der Folge zusammenfassend beschrieben.

TAP 3.1: Vorbereitung, Modellierung und Evaluation einer Engpassprognose für einen PA-Anwendungsfall

Zielsetzung:

Das TAP 3.1 setzte auf der Vorarbeit der APs 1 und 2 auf und erarbeitete anhand eines Anwendungsszenarios eine erste Umsetzung der Engpassprognose für industrielle Anwendungen. Ziel des TAP war es die in AP 2 bereits explorative analysierten Daten eines Anwendungsunternehmens in die Prognose zu überführen. Dabei wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen, die insbesondere hinsichtlich der Generalisierung des Verfahrens (vgl. TAP 3.2) wesentlich waren.

Durchgeführte Arbeiten:

Zur Definition der Anforderungen an die Datenqualität für den relevanten Anwendungsfall wurden verschiedene Modelle verglichen und bewertet. Für die initiale Anwendung der Methodik ist im Rahmen des Projektes das Anwendungsszenario der BMW Group AG ausgewählt worden. Das Datenqualitätsmodell von Askham et al. (2013) erweist sich aufgrund seines geringen Umfangs und seiner Vollständigkeit als praktikabel. Es umfasst die sechs Kerndimensionen *Vollständigkeit*, *Einzigartigkeit*, *Aktualität*, *Validität*, *Korrektheit* und *Konsistenz*. Die Anwendung des Modells auf den Anwendungsfall zeigt als Ergebnis eine gute Datenqualität mit geringem Handlungsbedarf. Die Handlungsbedarfe wurden im Rahmen einer Datenvorverarbeitung zur Verbesserung der Datenqualität adressiert. Hierbei wurden unter anderem irrelevante Attribute, Attribute mit nur einer Ausprägung, Attribute mit überwiegend leeren oder fehlerhaften Werten sowie Duplikate entfernt. Des Weiteren mussten im Rahmen der Datenvorverarbeitung die in Abbildung 3-8 dargestellten virtuellen Pufferbestände berechnet werden. Diese werden als Attribut für die Engpassprognose nach BNW und APM benötigt (Biller et al. 2008; Roser et al. 2017). Die entsprechenden Werte wurden anhand der Kapazitätsgrenzen des realen Produktionssystems validiert.

Für die Erstellung des Modells zur Engpassprognose wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt (Cao et al. 2012; Lai et al. 2018; Fang et al. 2020; Huang et al. 2019). Aufgrund der hohen Eignung zur Modellierung komplexer, nichtlinearer Langzeitabhängigkeiten wurde ein Long Short-Term Memory Modell (LSTM, Lai et al. 2018) für die Zeitreihenprognose

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

ausgewählt. Als Referenzmodelle wurden ein Auto-Regressive Integrated Moving Average-Modell (ARIMA, Li et al. 2011) als gängiger Vertreter autoregressiver Verfahren und ein naives Modell verwendet. Das naive Modell wählt den letzten Wert der Zeitreihe als nächsten Wert. Nach der Zeitreihenprognose erfolgt die Engpassidentifikation mit Hilfe der APM. Die Prognosemodelle wurden anhand des MAPE (Mean Absolute Percentage Error) bewertet. Den Vergleich der Modelle für einen Ausschnitt des Anwendungsfalles (ausgewählte Pufferstände zwischen den Prozessstufen auf der x-Achse) zeigt Abbildung 3-9. Hierbei ist zu beachten, dass die Modelle jeweils einen Zeitschritt in die Zukunft prognostizieren. Das Ergebnis zeigt für den Anwendungsfall, dass es keine eindeutige Dominanz eines der komplexeren Modelle (LSTM, ARIMA) gibt. Zudem weisen die Modelle eine mäßige Prognosegüte auf. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für eine zuverlässige Engpassprognose im Anwendungsfall Verbesserungen des LSTM-Modells zu prüfen sind.

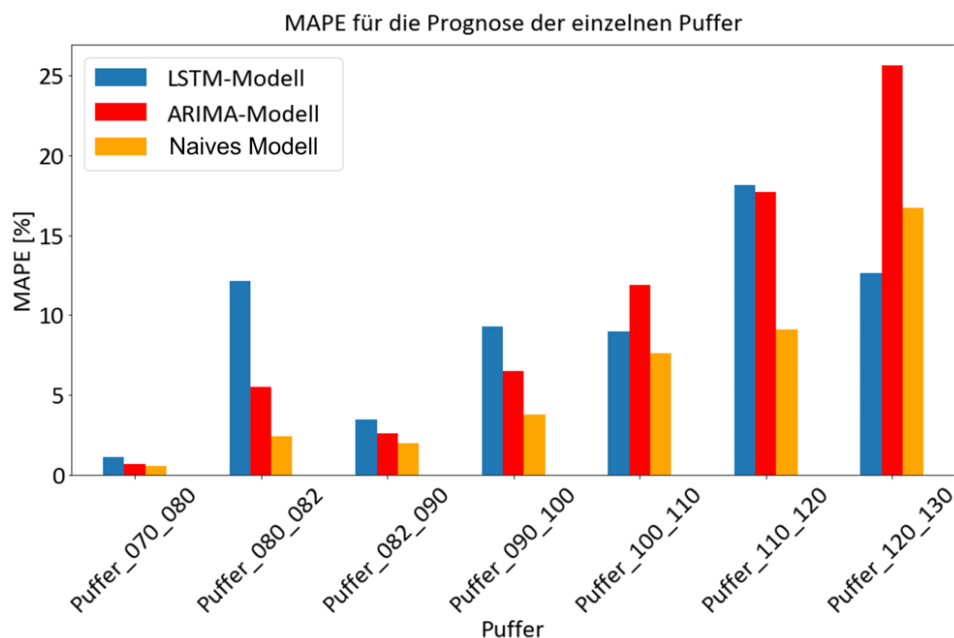


Abbildung 3-9: Prognoseergebnisse des LSTM-Modells und der zwei Referenzmodelle

Neben diesen konkreten Teilergebnissen aus der Modellierung, die in weiteren Iterationsschleifen zu einer Verbesserung der Modellbildung und auch Prognosegüte führten (vgl. auch AP 6) wurden in Zusammenarbeit mit den Anwendern (hier speziell BMW Group AG) weitere Bedarfe hinsichtlich des Vorgehens aufgezeigt. In Anlehnung an die Vorgehensmodelle Cross Industry Standard Process for Data Mining (Chapman et al. 2000) und Box-Jenkins Methodik (Box und Jenkins 1970) wurde in der Konsequenz ein generalisiertes Vorgehensmodell zur Engpassprognose definiert (Abbildung 3-10). Im Vorgehensmodell wurden die Analyseschritte aus dem Anwendungsfall generalisiert integriert.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

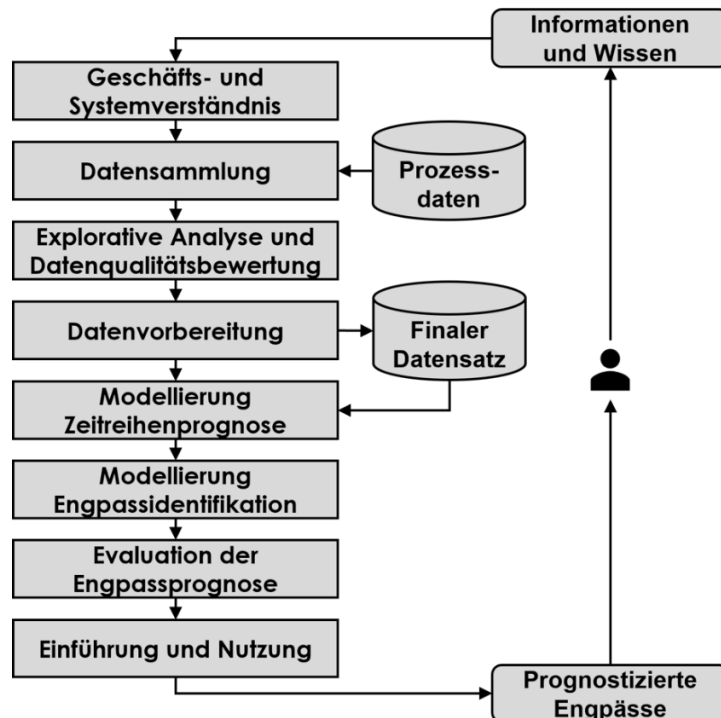


Abbildung 3-10: Generalisiertes Vorgehensmodell zur Engpassprognose

Das so erarbeitete zweistufige Vorgehen (Vorgehensmodell und detaillierte Aufarbeitung für den Bereich Datenvorbereitung und Modellierung der Zeitreihenprognose lieferte am Anwendungsfall der BMW Group erste Ergebnisse, die validiert werden konnten. Hinsichtlich des Vorgriffhorizonts und der praktischen Möglichkeiten des Systemeingriffs konnten diese Ergebnisse dem Praxisabgleich jedoch nicht standhalten, so dass von einer Einführung und Nutzung zu diesem Zeitpunkt abgesehen werden musste.

Ergebnisse:

Als wesentliche Ergebnisse des TAP 3.1 sind das adaptierte Vorgehensmodell zur Prognose dynamischer Engpässe und die pilothafte Umsetzung der Prognose mittels Zeitreihen Fortschreibung am Anwendungsfall der BMW Group AG festzuhalten. Während das Vorgehensmodell eine direkte Anwendbarkeit in der Praxis und eine hohe Eignung zur Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle des Projektes versprach, waren die Ergebnisse der Prognose für die praktische Einführung noch unzureichend. In einer weiteren Iteration wurde die Modellbildung verbessert und die Vorhersage der Engpassstation enger in das Prognosemodell verknüpft. Somit konnte aus der ersten prototypischen Umsetzung der Methode tieferer Nutzen für die Weiterentwicklung in TAP 3.2 und AP 6 gewonnen werden.

TAP 3.2: Reproduktion der Prognose für weitere Anwendungsfälle und Generalisierung der Vorgehensweise

Zielsetzung:

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Das TAP 3.2 setzte auf der Vorarbeit des TAPs 3.1 auf und erarbeitete auf Basis der Erkenntnisse der Anwendungsfälle bei der Fa. Jung und der Fa. Bosch Anpassungen sowie eine Generalisierung der Vorgehensweise. Ziel des TAP war es die erarbeitete Vorgehensweise und auch die Modelle auf ihre Allgemeingültigkeit hin zu überprüfen und ggfs. Anpassungen vorzunehmen. Dabei wurden insbesondere Anpassungen an der Modellierung vorgenommen.

Durchgeführte Arbeiten:

Die Anwendung des generalisierten Vorgehensmodells wurde auf die beiden anderen Anwendungsfälle durchgeführt. Details zum Einsatz der Methoden und den praktischen Restriktionen finden sich im AP 5. Im Rahmen der dritten PA-Sitzung wurden die Ergebnisse des AP 3 vorgestellt und diskutiert. Anregungen zur Optimierung der Prognoseergebnisse wurden von den Unternehmen des PA gegeben.

Für die Adaption des Vorgehensmodells ergaben sich in der Diskussion mit den Anwendern nur geringe Anpassungsbedarfe. Vermehrt wurde auf die hohen Anforderungen der Methodik in den unterschiedlichen Phasen der Modellierung eingegangen. Hierbei waren zwei Eingriffspunkte im Prozess Gegenstand der Diskussion:

1. Betrachtung der Eingriffs- und Deployment-Optionen:

Mehrfach wurde von Anwendern in Interviews (auch bereits im Rahmen der Anforderungsinterviews) auf die hohen Anforderungen des operativen Betriebs für eine Lösung des Engpassmanagements hingewiesen. Neben den rein technischen und datentechnischen Anforderungen sind demnach auch die praktikablen Möglichkeiten eines operativen Betriebs der Lösung früh im Prozess (im Rahmen des Geschäftsverständnisses) zu eruieren. Mit den Anwendern Jung, BMW und EBG wurde auf diese Anforderungen im Rahmen von vertiefenden Gesprächen eingegangen. Mit Erarbeitung des Maßnahmenkataloges (vgl. AP 4) konnte einem Teil der Bedenken aus industrieller Perspektive begegnet werden. Der zweite Teil der Bedenken bezog sich konkret auf die erzeugbaren Vorgriffshorizonte und die erforderlichen IT-technischen Voraussetzungen zur Implementierung im Live-Betrieb. Beide Punkte wurden konzeptionell besprochen, konnten im Rahmen des Projektes jedoch keiner vollständigen Lösung zugeführt werden.

2. Schnelle und intuitive Bewertung der Anwendungseignung

Seitens der Anwender wurde der Wunsch geäußert im Bereich der Datenreife (mit speziellem Bezug zur Anwendungseignung von Szenarien) eine noch einfachere und intuitivere Vorgehensweise im Prozess zu verankern. Dieser Quick-Check zur Datenverfügbarkeit sollte sich ebenfalls in einer ganz frühen Phase des Projektes und damit Vorgehensmodells wiederfinden. Ziel ist es, wie auch im Falle der Eingriffs- und Deployment-Optionen

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Blindleistung zu vermeiden und schnell im Modell zu Entscheidungspunkten zu gelangen, die valide über den weiteren Verlauf der Einführung entscheiden.

Zusammenfassend handelte es sich bei den Vertiefungen um eine Verfeinerung des Vorgehensmodells, dass in den Meilensteinen und Kontrollpunkten verfeinert, in den Werkzeugen jedoch noch nicht vollständig erweitert werden konnte.

Größere Anpassungen erfolgten auf Basis der Ergebnisse der Evaluation für die Modellierung der Prognose selbst und damit dezidiert in den Phasen Datenvorverarbeitung, Modellierung und Evaluation des Vorgehensmodells. Diese Anpassungen sind direkt in die Umsetzung des IT-Werkzeug (vgl. AP 6) eingegangen und trugen wesentlich zur Verbesserung der Prognose bei.

Kernpunkt der Anpassungen war die Integration der Ergebnisse der Engpassdetektion in die Datenbasis des ML-Modells zur Engpassprognose. Während in allen bisherigen Arbeiten versucht wurde die Eingangsparameter der Detektionsmethoden in der Zeit fortzuschreiben, integrierte die neu entwickelte Methode die Ergebnisse der Detektionsmethode in der historischen Betrachtung als Eingangsgrößen in das Modell. Diese Erweiterung hatte zur Folge, dass sich die Prognosegüte in allen betrachteten Anwendungsfällen deutlich verbesserte. In der Gesamtbetrachtung war es somit erstmalig möglich die naiven Verfahren (bspw. „Vorhersage des zukünftigen Engpasses „durch die Annahme: aktueller Engpass bleibt bestehen“) in der Prognosegüte zu übertreffen und praktischen Mehrwert aus dem Modell zu ziehen. Die Orientierung an den klassischen Zyklen der Serienfertigung wurde von den Anwendern in der Bewertung ebenfalls als sehr intuitiv und zielführend angesehen. Insbesondere hinsichtlich der Nutzung von Maßnahmen, die im Folgenden in AP 4 systematisiert werden erhalten die Anwenderunternehmen gestufte Möglichkeiten (je nach Vorgriffs Horizont) auf ihre dynamischen Engpässe und prognostizierten dynamischen Engpässe zu reagieren.

Ergebnisse:

Als wesentliche Ergebnisse des TAP 3.2 sind kleiner Anpassungen am Vorgehensmodell durch die Integration neuer Meilensteine und Abbruchkriterien sowie die Aufdeckung neuer Unterstützungsbedarfe im Bereich des Quick-Check Anwendungseignung ebenso wie die Anpassungen in der Modellbildung zu sehen. Speziell die Anpassungen der Modellbildung erzeugten erstmalig ein funktionsfähiges und anwendungstaugliches Prognosemodell für dynamische Engpässe, das praktischen Mehrwert stiften konnte. Somit konnte eben diese Implementierung des Modells als Grundlage für die Umsetzung im Tool (vgl. AP 6) weiter genutzt werden.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

3.4 AP 4: Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zum Umgang mit prognostizierten Engpässen

Zielsetzung:

Das AP 4 setzte auf der Vorarbeit aller bisherigen APs und den aus den Diskussionen im PA gewonnenen Erkenntnissen auf und erarbeitete konkrete Maßnahmen zur Intervention im Engpassfall. Diese Maßnahmen sollten über eine bloße Zusammenstellung hinaus in Form eines Kataloges einen praxistauglichen und validierten Maßnahmenkatalog bereitzustellen, um Anwendern (mit oder ohne Prognose oder Toolnutzung) den Umgang mit Engpässen zu erleichtern und Handlungsoptionen im Unternehmensalltag aufzuzeigen.

Durchgeführte Arbeiten:

Ausgangspunkt der Arbeiten in AP 4 war zunächst eine breit angelegte Recherche zu Maßnahmen gegen Engpässe in Produktionssystemen. In einem mehrstufigen Prozess der Sammlung und Verdichtung konnten 21 Maßnahmen identifiziert werden, die durch Expertengespräche mit Mitarbeitenden des RIF e. V. auf 24 Maßnahmen erweitert wurden. Da die Maßnahmen im Sinne des Gedankens eines Pufferdesigns wesentlich auf unterschiedliche Pufferarten wirken, wurden sie anschließend in eine Matrix aus Pufferarten (*Zeit, Kapazität, Bestand*) strukturiert. Neben dieser eingängigen Strukturierung wurde zur verbesserten Verortung in den Unternehmensstrukturen zusätzlich eine MTO-Analyse (*Mensch, Technik, Organisation*) durchgeführt und die Maßnahmen anhand dieser eingeordnet. In der Zusammenfassung konnte so ein breiter und dennoch strukturierter Überblick über potentielle Maßnahmen erschlossen werden, der in der Folge mit den Einsatzbedingungen und dem Feedback aus der Industrie zusammengebracht wurde.

Im Rahmen einer standardisierten Interviewstudie wurden die Engpasssszenarien von sechs Unternehmen des PA diskutiert. Die Unternehmen charakterisierten ihre Szenarien nach Art der Auftragsauslösung, Art des Organisationsprinzips, Fertigungsart und Variantenanzahl. Um Zusammenhänge zwischen Szenario und Engpassmaßnahmen herstellen zu können, bewerteten die Unternehmen anschließend die Engpassmaßnahmen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in ihrem Szenario. Insgesamt konnten so die Maßnahmen aus der Recherche durch die Studie von den Unternehmen bestätigt werden. Für die praktische Anwendung und eine verbesserte Übersichtlichkeit wurde eine Auswahl an Maßnahmen anhand ihrer Nutzung im Unternehmensalltag erstellt. Die 14 am häufigsten angewendeten Maßnahmen im Rahmen der Interviewstudie sind:

- Leiharbeit
- Sonderschichten
- Effektive Ressourcenbelegung
- Taktausgleich
- Schnelles Anlernen
- Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

- Technische Optimierungen am Engpass
- Lokale Reihenfolgenoptimierung
- Optimierung des Lagerhaltungssystems
- Pufferflächen vergrößern
- Wartungen schieben
- Einrichtung einer Parallelstrecke
- Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen
- Springereinsatz

Zur Detaillierung der Maßnahmen, für ein einheitliches Verständnis und als schneller, anwendungsgerechter Überblick über die Handlungsoptionen wurden aus den jeweiligen Maßnahmen One Pager – sog. Steckbriefe entwickelt. Dieser fasst die Maßnahme und ihre Zielsetzung auch in Anlehnung an relevante Literatur zusammen. Darüber hinaus enthalten die Steckbriefe die Charakterisierung der Engpassmaßnahmen hinsichtlich Pufferart und MTO-Analyse (vgl. Abbildung 3-11 und Anhang).

| | | |
|--|--|---------|
| Bezeichnung Taktausgleich | | Nr. 4.0 |
| Synonyme Taktzeitpuffer | | |
| Bezeichnung Effektive Ressourcenbelegung | | Nr. 3.0 |
| Synonyme Ressourcenplanung, Kapazitätsplanung, Leistungsabstimmung | | |
| Bezeichnung Sonderschichten | | Nr. 2.0 |
| Synonyme Mehrarbeit, Bedarfsdeckung ohne Personalbewegung | | |
| Bezeichnung Leiharbeit | | Nr. 1.0 |
| Synonyme Zeitarbeit, Personalleasing, Mitarbeitendenüberlassung, flexibler Mitarbeitendeneinsatz, Arbeitnehmendenüberlassung | | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |
| Bewertung | | |
| Zeit | ●●● (kurzfristig) | |
| Wirksamkeit | ●●○ (mittel bis gut) | |
| Handhabung | ●●○ (moderat) | |
| Kosten | ●○○ (hoch) | |
| Ziel | | |
| Ziel des Einsatzes von Leiharbeit ist der mittelfristige, flexible Puffer an Kapazität von Mitarbeitenden wodurch Ausbringungsverluste am Engpass reduziert werden können. | | |
| Kurzbeschreibung | | |
| Leiharbeit ist die gegen ein Entgelt, zeitlich begrenzte Nutzung von Arbeitnehmenden über eine Leiharbeitsfirma. Die Leiharbeitenden sind bei der Leiharbeitsfirma angestellt und das Entgelt wird in der Regel an diese entrichtet. Im Gegensatz zu befristeten Arbeitsverhältnissen entfällt die zeitintensive Personalrekrutierung und die Arbeitskräfte sind sofort verfügbar. | | |
| Potenziale und Risiken | | |
| Potenziale | - Abfangen von Auftragsspitzen und Krankenzeiten - Flexibilitätsvorteile gegenüber Festanstellungen | |
| Risiken | - Kaum Fachausbildung der Mitarbeitenden - Zeit zum Anlernen notwendig | |
| Literatur | | |
| Dudenhöffer, Büttner (2006): Der Wettbewerbsfaktor Zeitarbeit in der Automobilindustrie | | |

Abbildung 3-11: Auszug der Engpassmaßnahmen im PrEPFlow-Maßnahmenkatalog (bspw. Leiharbeit)

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Zusätzlich wurde im Rahmen der dritten Sitzung des PA von PrEPFlow ein Workshop zur Bewertung der Maßnahmen durchgeführt. In Kleingruppen wurden die TOP 14 Maßnahmen des Katalogs anhand der vier Kategorien *Zeit*, *Wirksamkeit*, *Handhabung* und *Kosten* bewertet. Jede Kategorie hat drei aufsteigende Ausprägungen. Tabelle 3.2 zeigt, welche Fragen die Teilnehmenden bei der Bewertung beantworten mussten und welche Ausprägungen der Kategorien vorgesehen waren. Durch die intensive Diskussion vor Ort konnten in der Präzisierung der Kategorien, Ausprägungen und Formulierungen wesentliche Fragen geklärt werden, die eine offline Befragung im Nachgang ermöglichten.

Tabelle 3.2: Bewertung der Verbesserungsmaßnahmen gegen dynamische Engpässe

| Kategorie | Frage | Ausprägungen | | |
|-------------|--|--------------|---------------|-------------|
| | | Langfristig | Mittelfristig | Kurzfristig |
| Zeit | Wie schnell wirkt die Maßnahme? | Langfristig | Mittelfristig | Kurzfristig |
| Wirksamkeit | Wie stark wirkt die Maßnahme auf den Engpass? | Gering | Mittel | Gut |
| Handhabung | Wie kompliziert ist der Einsatz dieser Maßnahme? Wie „hoch“ müssen die Kompetenzen sein? | Schwierig | Moderat | Einfach |
| Kosten | Wie teuer ist der Einsatz dieser Maßnahme? | Hoch | Mittel | Gering |

Um die Objektivität der Bewertung zu steigern und die Stichprobe zu erhöhen, wurde nach den Workshops eine Umfrage mit Experten durchgeführt. Die Ergebnisse der Workshops und der Umfrage wurden anschließend zu einer gemeinsamen Bewertung zusammengeführt (Abbildung 3-12). In der Gesamtzusammenstellung helfen die Bewertungen den Nutzenden in der konzeptionellen Planung relevanter Maßnahmen und (besonders wesentlich) in der Einschätzung der Komplexität in ihrer Beherrschung.

| | Maßnahme | Zeit | Wirksamkeit | Handhabung | Kosten |
|----|--|------|-------------|------------|--------|
| 1 | Leiharbeit | ●●● | ●●● | ●●○ | ●○○ |
| 2 | Sonderschichten | ●●● | ●●● | ●●○ | ●○○ |
| 3 | Effektive Ressourcenbelegung | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 4 | Taktausgleich | ●●○ | ●●○ | ●●○ | ●●○ |
| 5 | Schnelles Anlernen | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 6 | Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung | ●●○ | ●●● | ●●○ | ●●○ |
| 7 | Technische Optimierung am Engpass | ●●○ | ●●● | ●○○ | ●○○ |
| 8 | Lokale Reihenfolgenoptimierung | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 9 | Optimierung des Lagerhaltungssystems | ●●○ | ●●○ | ●○○ | ●○○ |
| 10 | Pufferflächen vergrößern | ●●○ | ●●○ | ●●○ | ●●○ |
| 11 | Wartungen schieben | ●●● | ●●○ | ●●● | ●●● |
| 12 | Einrichtung einer Parallelstrecke | ●●○ | ●●● | ●●● | ●●○ |
| 13 | Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen | ●●● | ●●● | ●●● | ●●● |
| 14 | Springereinsatz | ●●● | ●●● | ●●● | ●●○ |

Abbildung 3-12: Bewertungsmatrix

Das Feedback zum Maßnahmenkatalog fiel insbesondere bei den KMU besonders positiv aus. Dort waren viele der Maßnahmen wenig bekannt oder in ihrem Verständnis anders belegt.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Allein durch die Beschäftigung mit ihnen konnten somit neue Handlungsoptionen erschlossen werden und Maßnahmen auch konkret Anwendung finden. Besonders positiv gesehen wurden die Möglichkeiten der isolierten Anwendung des Kataloges. Hierdurch gelang es auch für Anwenderunternehmen, die bspw. keine ausreichende Datenbasis für die Engpassprognose aufwiesen (und diese auch nicht schaffen konnten oder wollten) praktikable Ergebnisse aus dem Projekt abzuleiten und direkt zu nutzen

Ergebnisse:

Als wesentliche Ergebnisse des AP 4 steht der Maßnahmenkatalog für Interventionen am Engpass in gerichteten Materialflusssystemen. Als eigenständiges Ergebnis des Projektes konnte der Katalog in der Diskussion mit den Anwendern validiert, verfeinert und an vielen Stellen bereits genutzt werden. Die Bewertung der Maßnahmen, ihre Kategorisierung entlang der Pufferarten und der MTO-Analyse sowie die Strukturierung in den Abfragen vor Ort und online waren Teilergebnisse, die im Abgleich mit der Literatur wesentlich zum Verständnis auch im PA beitrugen. Für die weitere Umsetzung der Prognose und die Einführung im realen System (siehe nachfolgendes Kapitel) wurden somit die Eingriffsgrenzen festgelegt und validiert.

3.5 AP 5: Einführung und Optimierung der Engpassprognose in realen Materialflusssystemen

In AP 5 wurde die Prognose von Engpässen in realen Materialflusssystemen möglichst echtzeitnah durchgeführt. Mit der praktischen Umsetzung auf zusammenhängenden Datensätzen konnte der wirtschaftliche Mehrwert überprüft und kritisch hinterfragt werden. Die Struktur von AP 5 folgt der Einführung innerhalb des CRISP-DM und gliedert sich in zwei TAP bearbeitet. TAP 5.1 umfasst die Maßnahmen bei der Vorbereitung und Unterstützung der Methodik während TAP 5.2 sich auf die Zielerreichung und messbaren Größen im Unternehmensumfeld fokussiert.

TAP 5.1: Vorbereitung und Unterstützung während der Einführung der Methodik

Zielsetzung:

Ogleich die Durchführung der praktischen Umsetzung innerhalb der Werke vorrangig bei den produzierenden Unternehmen aus dem PA lag und die wesentlichen Anwender und Domänenexperten die praktische Einführung selbst steuerten, zielte das TAP 5.1 auf eine zielgerichtete Unterstützung der Einführung der Methodik ab. Ziel war die Begleitung der Unternehmensinternen Umsetzungen der Engpassprognose.

Durchgeführte Arbeiten:

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Im Rahmen der Umsetzung konnten drei Anwendungsszenarien unter Mitwirkung der Mitglieder des PA begleitet werden. Hierbei handelte es sich um die Anwendungsszenarien

1. **Bosch** (Vietnam): elastisch verkettete Montagelinie, verzweigte Wertströme, Datenerfassung gemäß den Anforderungen der Automotive Supply Chain
2. **BMW** (Steyr): Flexibles, automatisiertes Fertigungssystem der spanenden Bearbeitung, zentraler elastischer Puffer, vollständige Datenerfassung aus MES System
3. **Jung** (Schalksmühle): automatische Steckdosenmontage, starre Verkettung in Montagesträngen in Kombination mit elastischen Zwischenpuffern, Black-Box System in Bezug auf die Datenhaltung

Zu **1. Bosch** (Vietnam): In der Unterstützung der Einführung der Systematik bei Bosch Vietnam ergaben sich die Kernherausforderungen in der **Abgrenzung des Use Case** Bereichs, der **Validierung und dem Mapping der Daten** und der **Erarbeitung einer geeigneten Architektur** zur Umsetzung. Da alle Fragestellungen anwendungsspezifisch und zudem in englischer Sprache erörtert und diskutiert werden mussten ergab sich eine gestaffelte Folge von Online-Terminen, bei denen die Schwerpunkte vom Use Case in Richtung der Daten und zuletzt der Umsetzungsarchitektur wanderten.

Für die Eingrenzung des relevanten Use Case Umfangs erfolgte die Analyse und Validierung von Bubble Charts, die Darstellung und Abgrenzung von Produktflüssen sowie die Analyse der Planung und Steuerung des Systems mithilfe von Experteninterviews. Die erarbeiteten Erkenntnisse flossen in eine Neuausrichtung des geplanten Use Case Umfangs ein und mussten somit iterativ erneut validiert werden. Da die Datenhaltung und –anbindung jedoch in allen Konstellationen einheitlich war, konnten die Arbeiten an den Anwendungsdaten parallel erfolgen.

Für das valide Mapping der Anwendungsdaten auf das Zielformat der Engpassprognose waren insbesondere die zwei Aspekte relevant. Zum einen mussten die aktiven und inaktiven Zustände aus den MES-Zustandsdaten heraus definiert und mit Prozessexperten validiert werden. Hierzu wurden Data Understanding Workshops in Zusammenarbeit der Prozess- und IT-Experten durchgeführt und die Plausibilität der getroffenen Annahmen anhand der offline

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

bereitgestellten Daten validiert. Zum anderen musste die Integrität der Datenumfänge der isoliert ermittelten Daten der Einzelstationen erfolgen. Hierbei wurden explorative Analysen der Datenumfänge und Wenn-Dann Regeln zur Eingrenzung der zulässigen Produktströme verwendet. (Vgl. Abbildung 3-13)

| | | Machinenumber | | | Total: |
|----------------|-----|---------------|-------|------|--------|
| | | 7094 | 7095 | 7096 | |
| Product-number | 78 | / | 1706 | / | 1706 |
| | 97 | / | 524 | / | 524 |
| | 100 | 1034 | 7809 | 1209 | 10052 |
| Total: | | 1034 | 10039 | 1209 | 12282 |

Abbildung 3-13: Ausschnitt der Datenanalyse im Zuge der Werkzeugeinführung

Hinsichtlich der geeigneten Ziel-Architektur in der Einführung der Methode wurden mit den Experten vor-Ort unterschiedliche Alternativen (Batch-Processing als Service, Integration in ein MES und der Aufbau einer Cloudbasierten Umgebung für wertstromgetriebene Analysen) diskutiert. Die Erfahrungen aus bereits etablierten, ähnlichen Anwendungen sowie kategorische Vor- und Nachteile wurden geteilt. Zudem erfolgte Bosch intern eine Prüfung der Anschlussfähigkeit und Skalierbarkeit der Methodik, deren Ergebnisse zum Zeitpunkt der Berichterstattung noch nicht vorlagen.

Zu **2. BMW (Steyr)**: In der Unterstützung der Einführung der Systematik bei BMW in den Flexiblen Fertigungssystemen am Standort Steyr ergaben sich zusätzliche Anforderungen in den Bereichen **Datenvorverarbeitung, Eingrenzung des Use Cases aus fachlicher Sicht und Integration in ein Anwendungssystem**. Durch die etablierte, enge Zusammenarbeit mit dem Forschungspartner konnten die relevanten Themen sowohl intern als auch bei weiterführenden Fragestellungen mit den Prozessexperten des PA Mitglieds geklärt werden.

In Bezug auf die Datenvorverarbeitung mussten für das Zielformat der Engpassprognose Daten aus den relevanten Teilen des BDE Systems (Betriebsmittelspezifische Eigenentwicklung des Lieferanten) als auch des Planungs- und Steuerungssystems auf MES Ebene (OEM-spezifische Eigenentwicklung für die spanende Fertigung) verbunden werden. Eine intensive Datenvorverarbeitung mit anschließender Validierung durch BMW folgte. Anhand des entwickelten Reifegradschemas konnte die erforderliche Datenqualität

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

sichergestellt werden. Im Anwendungsfall ergaben sich durch die feingliedrige Erfassung von Events und Zuständen der zahlreichen Produktionsressourcen (Bearbeitungszentren) enorme Datenmengen, die im Hinblick auf eine effiziente Verarbeitung im System reduziert werden mussten. Neben den technischen Möglichkeiten zur Reduktion des Datenaufkommens (Selektion, Reinigung und Verdichtung) wurde in diesem Use Case der Umfang der Daten auch auf fachlichem Weg eingegrenzt.

In der zunächst statischen Analyse der Prozessstufen und Arbeitsinhalte – durchgeführt durch RIF mit Unterstützung der Prozess- und Datenexperten von BMW – konnten die drei kritischen Prozessstufen und resultierend die kritischen Ressourcen identifiziert werden. Diese wurden in Interviews von den Betreibern validiert und als relevanter Use Case und damit auch Datenumfang eingegrenzt. Es konnte somit eine Reduzierung auf 8 Stationen innerhalb des flexiblen Fertigungssystems vorgenommen werden. (Siehe Abbildung 3-14 Dies reduzierte die Datenmenge und den Aufwand bei der Vorverarbeitung erheblich.

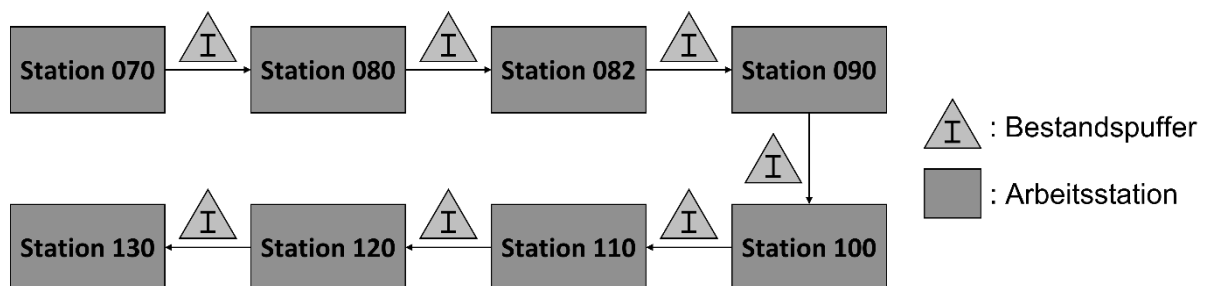


Abbildung 3-14: Eingegrenzter Use Case und Datenumfang in der Anwendung bei BMW

Für die Integration in ein Anwendungssystem musste im Use Case mit BMW zunächst die vorhandene IT-Architektur durchdrungen und die Freiheitsgrade bei der Programmierung erfasst werden. Zusätzlich waren die Möglichkeiten der Skalierung der Anwendung (hier mit baugleichem Fertigungssystem in Hams Hall) ein relevanter Entscheidungspunkt. Abschließend wurden in offener Diskussion mit den Verantwortlichen die Themen Akzeptanz des Systems und Eingriffsgeschwindigkeit diskutiert. Ergebnis war eine zweistufige Vorgehensweise mit einer vorgelagerten Entscheidung über das Hauptsystem der Anwendung und einer nachgelagerten Entscheidung über die Tiefe der Integration.

Zu **3. Jung** (Schalksmühle): In der Einführung der Methodik bei der Fa. Jung am Standort in Schalksmühle ergaben sich zahlreiche Fragestellungen, die im Folgenden genauer detailliert werden sollen. In der Auswahl der drei Kernaspekte sind hier die **Akquisition von Daten** aus dem Fertigungssystem, die **Integration mit Shopfloor Management und PDCA** der Fa. Jung und der **Aufbau einer**

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Cloudbasierten Analyseumgebung für die Wertströme zu nennen. Die Umsetzung selbst erfolgte durch RIF und die IPS Engineers GmbH., die Teile der zu erbringenden Leistungen in der Erarbeitung der Einführungsvoraussetzungen gemeinsam mit den Wissensträgern bei Jung selbständig umsetzten.

Die Akquisition von Daten aus dem Fertigungsumfeld der Fa. Jung in Schalksmühle stellte sich zu Beginn des Projektes als wesentliches Hemmnis für die Einführung der Engpassprognose da. Es existierten im Bereich der automatischen Steckdosenmontage zwar geeignete verkettete Montagesysteme inkl. der erforderlichen flexiblen Verkettung mittels flexibler Transportbänder, jedoch waren die Leistungsdaten der Systeme, so wie sie als Eingangsdaten für die Systematik im Bereich der Anforderungsanalyse definiert wurden nicht zugänglich. Diese wurden in einer Beckhoff-Steuerung erfasst und auch verarbeitet sowie den MA an der Maschine zugänglich gemacht, eine freie Nutzung der Daten und ihre Verbindung mit weiteren Daten des Unternehmens wie bspw. Auftragsdaten war jedoch nicht gegeben. Aus diesem Grund begleitete RIF den Aufbau einer Industrial Internet of Things (kurz:IIoT) Architektur mit deren Hilfe die Daten echtzeitnah erfasst und frei zugänglich für Folgefunktionen gespeichert werden konnten. In der konkreten Umsetzung in der automatischen Steckdosenmontage gelang dies mittels Lichtschranken IO-Link Inseln zum Bündeln der Signale und Zusammenführung der Inselsignale auf einer Siemens SPS (S7-1200). Die Anforderungen der Engpassdetektion und –prognose konnten hierbei bereits in einer frühen Phase eingebracht werden, so dass die IPS Engineers im Zusammenspiel mit Jung die Positionierung der Sensoren (2 Sensoren je Hauptstrang und eigenständigem Betriebsmittel – vor und hinter der abliefernden Station) planen konnten. Aus diese Weise gelang es durch einfache Sensorik eine Möglichkeit zu schaffen, sowohl die Puffer der Linien zu überprüfen als auch auf die inaktiven Zustände durch Blockage und Starvation zu schließen. Ein zweiter wesentlicher Aspekt der Datenakquisition ergab sich in der Einstellung und Verarbeitung der Abtastraten im System. Da an einigen der Linien Zykluszeiten von 1sec unterschritten wurden und diese auch noch in Doppelzyklen ablieferten traten bei Einhaltung der Standard Abtastraten Datenverluste auf, die erheblichen Einfluss auf die Methodik der Engpassdetektion und –prognose nahmen. Eine Korrektur und manuelle Anpassung der Abtastraten wirkte der Problemstellung entgegen und führte

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

zu validen Werten in den Ablieferzyklen und der Berechnung der Pufferfüllstände. Eine Übersicht der finalen Architektur inkl. der zusätzlichen Validierungsmöglichkeiten via Grafana und Influx DB zeigt Abbildung 3-15.

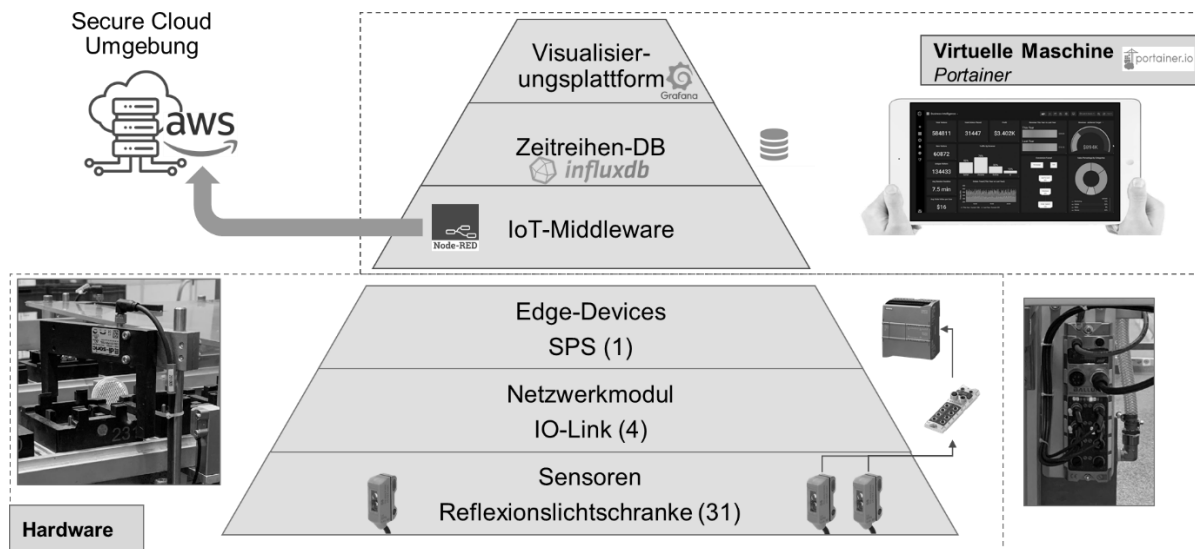


Abbildung 3-15: Umsetzung der IIoT-Architektur im Use Case der Fa. Jung

Speziell in mittelständischen Unternehmen ist die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben im starken Maße von der Akzeptanz der Lösungen und den aufgezeigten Potentialen in deren Umsetzungsprozess abhängig. Aus diesem Grunde entschloss sich das PA Mitglied Jung die Einführung der Methodik und der verbundenen digitalen Umgebung mit zwei Maßnahmen zum konkreten Transfer in die Unternehmensprozesse zu flankieren. Hierbei ging es zum einen um die Integration der ermittelten Daten in die täglichen Runden des Shop Floor Management (SFM), zum anderen um die Unterstützung der PDCA Prozesse am Standort Schalksmühle durch die zugrundeliegende Datenbasis. Für die Unterstützung des SFM konnte in Zusammenarbeit mit Jung eine Bereitstellung der digitalen Informationen in die täglichen Shopfloor-Runden erfolgen. Diese wurde zunächst mithilfe von Grafana Dashboards zum Vergleich der Ausbringungen in den Schichten über die unterschiedlichen Montagelinien hinweg durchgeführt. (vgl. Abbildung 3-16)

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

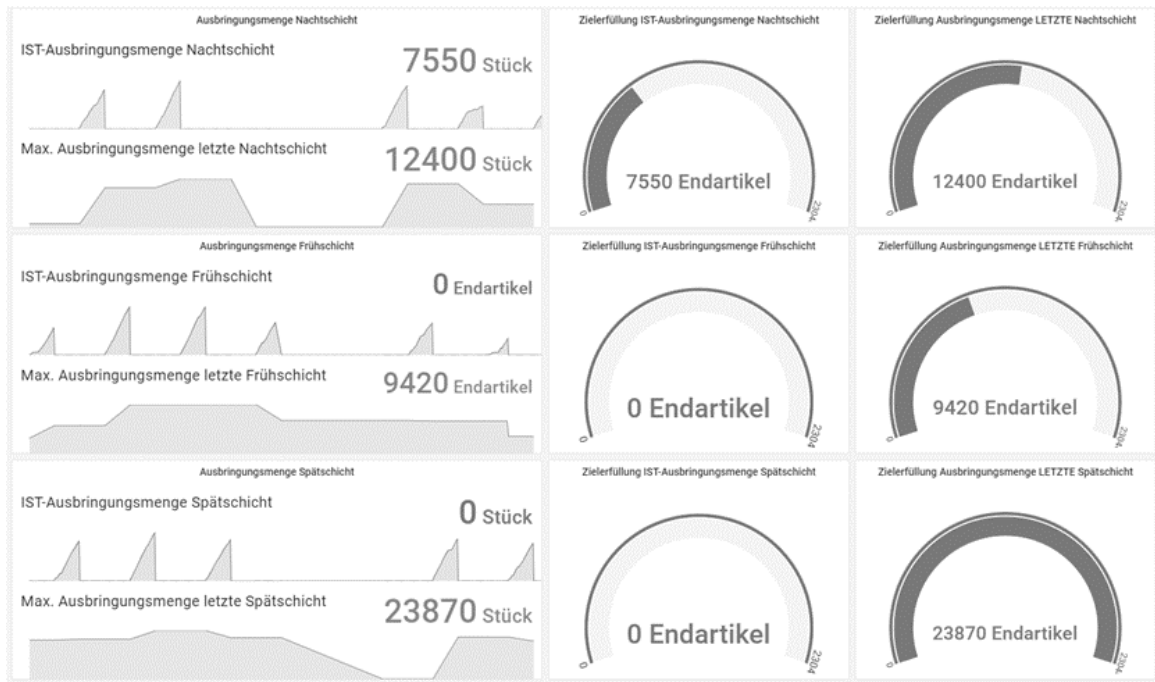


Abbildung 3-16: Grafana-Dashboards zur Integration der Daten in das SFM der Fa. Jung

In einer zweiten Stufe der Umsetzung soll das Dashboard nun durch eine cloudbasierte Version ersetzt werden. Der Anwendungspartner verspricht sich dadurch eine verbesserte Zugänglichkeit, Robustheit und Vorteile in der Verwaltung und im Reporting der resultierenden Daten. Diese Weiterentwicklung bietet sich auch daher an, da das gesamte Anwendungssystem in eine cloudbasierte Umgebung integriert wurde. In den hoch automatisierten Systemen wurde ergänzend entschieden eine mittel- und langfristige Zielperspektive in der PDCA-Routine zu schaffen. Diese basiert auf einer Erfassung der OEE der Montagelinien basierend auf Stückzahlrückmeldungen und aktiven Zeiträumen.

Der Aufbau der Cloudbasierten Analyseumgebung wurde in Kooperation mit dem PA Mitglied IPS Engineers und unter Zuhilfenahme zusätzlicher Ressourcen über das PrEPFlow Projekt hinaus geleistet. Das System soll nicht nur Daten im Wertstrom sammeln und zusammenbringen, sondern auch in der Lage sein, diese Daten zu analysieren und darauf basierende Berechnungen durchzuführen. Es sollte also sowohl Daten erfassen als auch diese analysieren können. RIF sicherte die Nutzung von Analysefunktionen wie Zykluszeit- und Pufferanalysen ab, um die erforderlichen Eingangsdaten für die Engpassdetektion und Prognose zu schaffen. Neben diesen Analysefunktionen bietet die Plattform für die Zukunft die Möglichkeit eine gute Möglichkeit die Engpassfunktionalitäten echtzeitnah in den Produktionsbetrieb zu integrieren.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Erzielte Ergebnisse:

In Summe gelang es in allen drei Use Cases eine strukturell geeignete Datenbasis für einen Live-Betrieb der Engpassprognose zu erarbeiten. In dieser Hinsicht unterschieden sich die vorausgewählten Anwendungsfälle demnach deutlich von der Mehrzahl der identifizierten Use Cases (siehe AP 1). Die erzielten Ergebnisse dürfen demnach nicht über die generell identifizierten Einsatzhemmnisse der Methodik speziell in den kleineren Unternehmen (lediglich Jung fällt in diese Kategorie) hinwegtäuschen.

Die Ergebnisse im Einzelnen:

1. Bosch:

- i. Validiertes Datenschema für die Engpassprognose
- ii. Validierte Offline-Daten zur Durchführung der Engpassprognose
- iii. Wertstromüberblick und identifizierte Datenbedarfe zur Abbildung des Engpassszenarios
- iv. IT-Architekturanalyse und Darstellung der Handlungsoptionen zur Integration der Engpassprognose im Live-Betrieb
- v. Meilensteinplanung für schrittweise Umsetzung und Einbindung in das potentielle Folgeprojekt DeDiFlow (Schwerpunkt: Engpassdiagnose)

Zusammenfassend konnte im Use Case mit Bosch die Integration der Daten in die Methodik und der damit verbundene Offline-Test der Datenprognose durchgeführt werden. Die erzielten Ergebnisse für die betrachteten Stationen ließen jedoch den fachlichen Schluss zu, dass nur mit einer Erfassung weiterer Nebenströme der Montagelinien (und damit einer Erweiterung des Datenraumes) eine zielgerichtete Einführung der Systematik erfolgen kann. Die Offline Ergebnisse mit den bereitgestellten Daten bestätigten diese These. So konnten zu Ende der Projektlaufzeit die konkreten nächsten Schritte in Richtung der Einführung der Methodik in den Linien festgelegt und Bosch für die weitere Zusammenarbeit (auch im Rahmen des PA des potentiellen Nachfolgeprojektes DeDiFlow) gewonnen werden.

2. BMW:

- vi. Validierte Zusammenführung der Daten aus BDE und MES in das erforderliche Datenschema der Engpassprognose
- vii. Validierter Use Case Zuschnitt inkl. Bereitstellung von repräsentativen Offline-Daten zur Durchführung der Engpassprognose

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

- viii. Validierte Umsetzung der Methodik an ausgewählten Stationen im fachlich relevanten Engpassbereich
- ix. Abgleich der Real und Prognosedaten und Validierung der Verläufe in der elastischen Verkettung
- x. Umsetzung der Methode im MES für die mechanische Fertigung

Zusammenfassend zeigten sich im Use Case mit BMW die Möglichkeiten der Umsetzung der Methodik in stark automatisierten Systemen mit komplizierten Wirkzusammenhängen. In der Anwendung der Engpassprognose war es wesentlich den Betrieb der Systeme in die Überlegungen zur Verbesserung einzubeziehen. Dies geschah bei BMW durch eine enge Integration der Instandhaltungsplanung. Diese zeit- und arbeitsintensiven Tätigkeiten tragen in der Praxis signifikant zur Ausbringung automatisierter Anlagen bei. Ziel des Use Cases war es nun mittels der Engpassprognose die Zeitfenster zu bestimmen, in denen unter Beeinflussung des jeweiligen Produktmix mit den geringsten Verlusten Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden konnten. Eine interne Studie bei BMW und ein IST-SOLL Vergleich für beide Lösungen rundete die Erkenntnisse ab.

3. Jung:

- xi. Validierte Akquisition der Daten mittels IIoT-Architektur
- xii. Entwickelte Analysemodule zur Erarbeitung der relevanten Eingangsgrößen der Engpassprognose (wie bspw. Zykluszeiten und Pufferfüllstände)
- xiii. Integrationskonzept für SFM und PDCA-Routinen der Fa. Jung
- xiv. Offline Test der Engpassprognose für die automatische Steckdosenmontage am Standort Schalksmühle
- xv. Analysearchitektur (cloudbasiert) für eine Live-Integration der Methodik

Zusammenfassend konnte in Zusammenarbeit mit der Fa. Jung ein umfangreiches Szenario für die Engpassdetektion und –prognose erschlossen werden. Besonders bemerkenswert war in diesem Zusammenhang die Grundlagenarbeit, die im Aufbau der Datenbasis und Analysestruktur im Verlauf des Projektes geschaffen werden konnte. In der Umsetzung der Methodik ist der Anwendungsfall zu Projektende kurz vor der Fortsetzung und Überführung in den produktiven Einsatz an einer ersten Montagelinie. In Zusammenarbeit der PA Mitglieder Jung und IPS Engineers geht die Umsetzung in eine Verlängerung bis zum Jahresende und hoffentlich auch darüber hinaus in die Anwendung. Die große Wertschätzung des Anwenderunternehmens für

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

die Forschungsergebnisse wurde auch durch die umfassende Veranstaltung des Abschluss-PA am Standort Schalksmühle unterstrichen.

TAP 5.2: Untersuchung und Bewertung der Einführung hinsichtlich der Zielerreichung

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden die erarbeiteten Konzepte zum Aufbau einer geeigneten Datenarchitektur in die Anwendung überführt. Die Vorgehensweise in der Implementierung der Anwendungsfälle war hierbei immer zweistufig. In einer ersten Stufe wurde die Zusammenstellung der erforderlichen Lösungsbausteine methodisch hergeleitet und erarbeitet. In der zweiten Umsetzungsphase wurde darauf aufbauend die Implementierung der ausgewählten Lösungsbausteine begleitet. Die Validierung der Vorgehensweise mündet in einer Kontrolle der Wirksamkeit durch geeignete Metriken der Zielerreichung.

Da schon die Auswahl der geeigneten Zielbausteine für eine Umsetzung der erforderlichen Technologien im Kontext der Engpassdetektion und –prognose wesentlichen Einfluss auf die Metriken zur Zielerreichung hat soll auch diese Entwicklung einer geeigneten Auswahlmethodik kurz erläutert werden. Die Methodik basiert auf einer Klassifizierung der analysierten Produktionssysteme anhand klassischer Merkmale der Fertigungstypologien wie Wiederholhäufigkeit, Automatisierungsgrad, Organisationsprinzip etc. Das Screening wurde für das ausgewählte Pilotsystem durchgeführt und in den Ergebnissen gemeinsam mit den Ansprechpartnern vor Ort validiert. Abbildung 3-17 stellt die Ergebnisse zusammenfassend dar.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

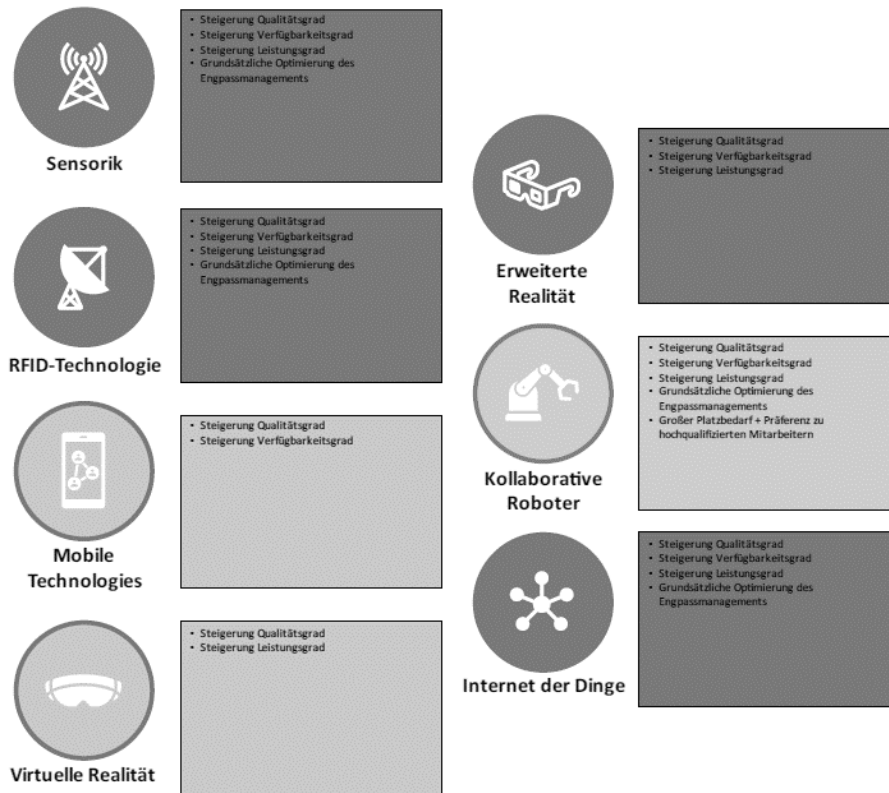


Abbildung 3-17: Screening Ergebnisse für die Einführung der Lösungsbausteine im Pilotsystem

Ausgehend von den methodisch abgeleiteten Ergebnissen wurde im Anwendungsfall des PA Unternehmens eine Kombination aus Sensorik (Lichtschranken und klassischen Sensoren), mobile Technologies (Grafana-Dashboarding und visuelle Mock-Ups für Shopfloor-Management) sowie Internet der Dinge (Industrial IoT-Architektur in Node Red) ausgewählt. Letztere Architektur ist in der Umsetzung gleichzeitig auf die Erfüllung der Datenbedarfe aus AP2 ausgerichtet und liegt der grundsätzlichen Beschreibung im vorangegangenen TAP zugrunde.

In der konkreten Umsetzung im Produktionssystem konnten bspw. im Anwendungsfall der Fa. Jung die automatische Montage der Steckdosen durch eine gezielte Staffelung von Lichtschranken vor und nach den automatischen Bauteilmontagen, der Verpackungsstation und der abschließenden Umverpackung im vollständigen Wertstrom abgetastet und alle relevanten Zonen für eine dynamische Identifikation und Prognose von Engpässen erfasst werden. Die Positionierung der Sensoren im stilisierten Layout des Anwendungsfalles stellt Abbildung 3-18 zusammenfassend dar.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

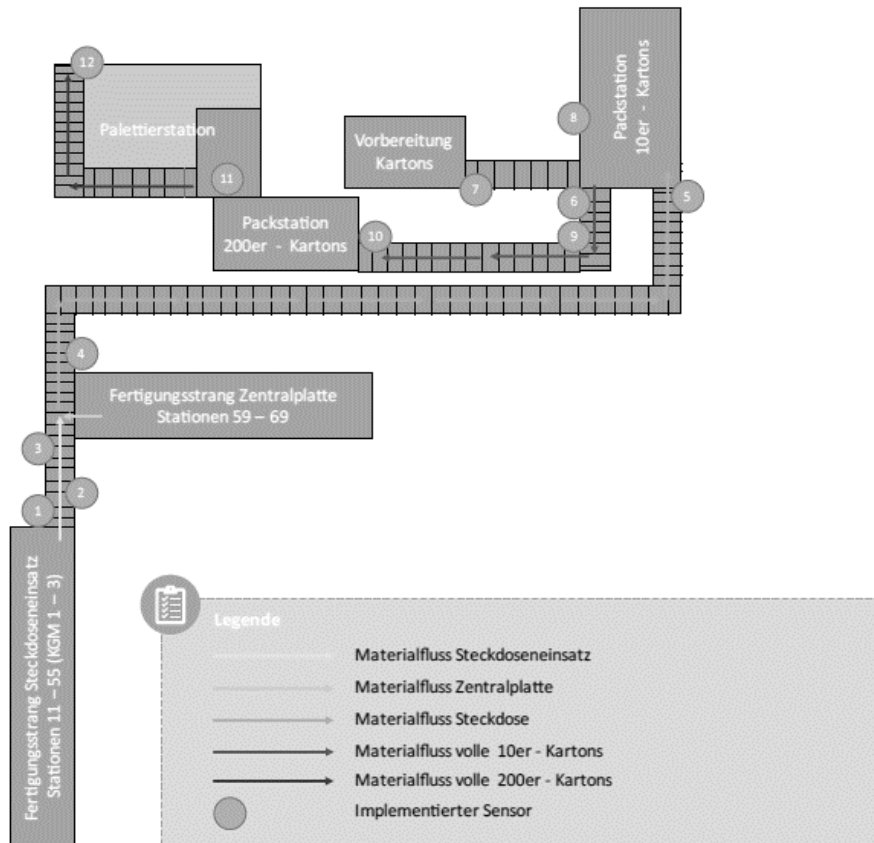


Abbildung 3-18: Schematisches Layout des Anwendungsfalles automatische Steckdoseneinsatz und der implementierten Sensorik

Auf eine Darstellung der ebenfalls ausgeführten PLC- und IIoT-Programmierung im Anwendungsfall wird an dieser Stelle verzichtet. Die etablierten Dashboard-Sichten für Zykluszeiten, Pufferstände und Ausbringungen ermöglichten im Zusammenspiel mit den im Unternehmen etablierten Methoden und Werkzeugen des Shopfloormanagements (SFM) eine deutliche Verbesserung der Produktivitätsmessung und Verifizierung der Zielerreichung der Produktion.

Erzielte Ergebnisse:

Die prognostizierte große Auswirkung auf die Beeinflussung der Produktivität im System durch die Einführung der neuen Technologien und die dynamische Engpassdetektion und -prognose soll mithilfe einer Pilotstudie im laufenden Betrieb bestätigt werden. Hierzu wurde für das Anwendungsbeispiel zunächst die Overall Equipment Effectiveness (OEE) als aussagefähigste Leistungskennzahl identifiziert. Im zweiten Schritt konnten die Verluste innerhalb des Systems durch zunächst händische Aufschreibungen im SFM quantifiziert und anschließend analysiert werden. Als Ergebnis der Aufschreibungen wurde das Gros der Störungen innerhalb der automatischen Montagestränge (insb. Montage des Steckdoseneinsatzes) verortet. In

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

der Verfeinerung der Aufzeichnungen wurden im dritten Schritt die genaue Lokalisierung der Störung und die Symptomatik (ggfs. auch ein Ausblick auf mögliche Störursachen) dokumentiert. Diese Informationen helfen die Störungen gezielter zu bearbeiten, unterstützen den Kollaborationsprozess mit dem Betriebsmittelbau und erhöhen die Transparenz im System. Der vierte und abschließende Schritt der konzeptionellen Validierung der OEE-Studien war der Abgleich der händisch erarbeiteten Datenbasis mit den Daten der IIoT-Architektur. Zusammenfassend konnten in diesem Abgleich das Matching der Verfügbarkeitsverluste (Störungen >3min) mit einigen Überarbeitungen (verbesserte zeitliche Zuordnung und veränderte Bewertung von Folgestörungen) bereits gut validiert werden. Probleme entstehen hier in der Zuordnung der Störungen zu ursächlichen Stationen sowie der zeitlichen Zuordnung der Störung im Falle von summierten Aufschrieben. Beide Effekte wurden in der Begleitung der Handaufschriebe adressiert und sollen in Zukunft präziser gelöst werden. Über die erarbeitete Sensorstruktur konnten zusätzlich Erkenntnisse über das Auftreten von Leistungsverlusten und deren Umfänge gewonnen werden. Die integrierte Zykluszeitanalyse (vgl. auch Datenbasis für Engpassdetektion in AP2) liefert auch diesbezüglich valide Daten, die für eine technische Bewertung und Verbesserung der Anlagenstränge genutzt werden. Zu guter Letzt konnten für den ausgewählten Pilotbereich auch bereits Diagnosen des Engpassverhaltens im Berichtszeitraum durchgeführt werden. Diese Ergebnisse wurden verdichtet und nachfolgend mit der in AP3 entwickelten Methode der Engpassprognose kombiniert (vgl. TAP5.1 in der Fortführung).

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

3.6 AP 6: Überführung der Methodik in ein IT-Werkzeug und vorhabenbegleitende Optimierung

Zielsetzung:

Zur Aggregation der im PrEPFlow-Projekt erarbeiteten Ergebnisse, einer barrierefreien Bereitstellung der erarbeiteten Logiken und als Absprungpunkt für weitere Entwicklungen entwickelte das RIF im Rahmen des AP 6 ein IT-Werkzeug, das zum Abschluss des Projektes in überarbeiteter Form bereitgestellt werden sollte.

Durchgeführte Arbeiten:

Bereits in der zweiten PA-Sitzung haben neun PA-Unternehmen in einer Umfrage ihre Anforderungen an das IT-Werkzeug formuliert (original Zusammenstellung der Ergebnisse in Abbildung 3-19). Hervorzuheben ist, dass die Unternehmen eine einfache Interaktion in User Interface bevorzugen und dass Muster in den Daten erkannt werden sollen. Die definierten Anforderungen wurden bei der Erstellung des IT-Werkzeugs berücksichtigt und integriert.

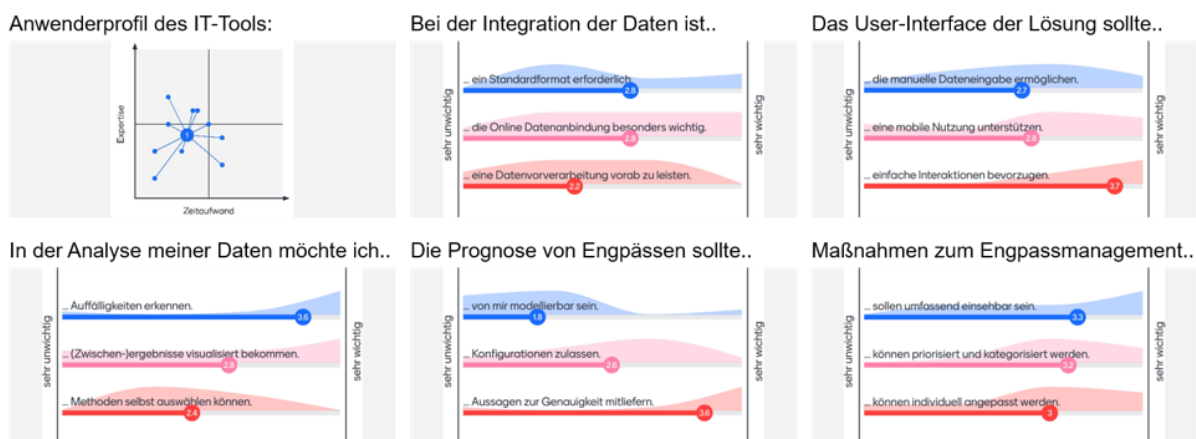


Abbildung 3-19: Sammlung von Anforderungen der PA-Unternehmen an das IT-Werkzeug während der zweiten PA-Sitzung

Entlang der hier gegebenen Leitplanken wurde das IT-Werkzeug basierend auf dem Python-Framework *Dash* entwickelt. *Dash* ist Open Source und wird häufig für die Entwicklung von ML- und Datenanalyse-Webanwendungen verwendet. Über die URL: <https://prepflow.pythonanywhere.com/> ist die Webanwendung erreichbar. Der Name des IT-Werkzeug ist *BottleNext* in Anlehnung an die Prognose zukünftiger Engpässe. Strukturiert ist *BottleNext* in die vier Stufen *Datenauswahl*, *Engpassidentifikation*, *Engpassdiagnose* und *Engpassprognose*. Innerhalb der einzelnen Schritte erhalten die Anwendenden Informationen zur Verwendung von *BottleNext*. Darüberhinaus kann die Prognose für die Engpassprognose in der internationalen Veröffentlichung von West et al. (2023) nachvollzogen werden. Hierzu wurde der Code ebenfalls diskriminierungsfrei über GitHub zur Verfügung gestellt (<https://github.com/nikolaiwest/2023-bottleneck-prediction-icrcet>). Damit wurde den

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Anwenderunternehmen die Möglichkeit gegeben die Engpassprognose an ihre IT-Systeme anzubinden.

Bei der *Datenauswahl* kann zwischen drei Szenarien gewählt werden. Anwendende können entweder einen *Beispieldatensatz* verwenden, eine *neue individuelle Simulation* erstellen oder ihre *eigenen Daten* hochladen. Der Beispieldatensatz wurde mit Hilfe einer Simulation erstellt. Er besteht aus einem Materialflusssystem mit 5 Stationen und 6 Pufferbeständen (Abbildung 3-20). Der Vorteil der Verwendung des Beispieldatensatzes ist, dass er schnell angewendet werden kann. Sowohl die Simulation als auch der Upload eigener Daten ist mit längeren Berechnungszeiten verbunden. Diese hängen von den gewählten Parametern bzw. von der Größe des jeweiligen Datensatzes ab. Der Beispieldatensatz hat eine Größe von 10 Millionen simulierten Zeitschritten. Der Datensatz wurde in der angesprochenen Veröffentlichung von West et al. (2023) zur Engpassprognose verwendet. Um einen tieferen Einblick in die Struktur der Daten zu erhalten, können diese über zusätzliche Registerkarten eingesehen werden. Aufgrund der Datenmenge ist die Auswahl auf die ersten 10.000 Datensätze beschränkt. Die Simulationsereignisse sowie die Pufferfüllstände wurden mit einer ereignisdiskreten Simulation erzeugt, während die aktiven Perioden jeder Station mit einer entsprechenden Berechnungslogik ermittelt wurden.

BottleNext

Datenauswahl

- Engpassdetektion
- Engpassdiagnose
- Engpassprognose

Verwende Beispieldaten
Ermöglicht die Durchführung der Engpassanalyse mit einem bereits verfügbaren Beispieldatensatz.
Auswählen

Nutze eine Simulation
Ermöglicht die Erzeugung von neuen Daten durch die Simulation eines gerichteten Wertstroms.
Auswählen

Verwende eigene Daten
Ermöglicht das Hochladen eigener Daten aus einem Wertstrom mittels entsprechender CSV-Dateien.
Auswählen

Beschreibung des Datensatzes
Der Beispieldatensatz stammt von einem Wertstrom mit fünf Arbeitsstationen S und sechs Puffern B . Der Wertstrom ist gerichtet und die Systemgrenzen sind unbeschränkt. Als Prozesszeiten pt wurde 2,00 festgelegt, wobei die Stationen S_1 und S_3 zusätzliche Prozesszeit mit 2,25 besitzen. Als Maximalbestand der Puffer bc wurden für alle Puffer 5 Teile festgelegt. Der Datensatz umfasst 10 Millionen Zeitschritte und ist vollständig online verfügbar.
[-> See repository with the example dataset](#)

Hinweise zur Verwendung
Der Vorteil dieses Datensatzes ist, dass er schnell angewendet werden kann. Sowohl die Simulation als auch die Verwendung eigener Daten ist mit längeren Berechnungszeiten verbunden, wobei die Dauer erheblich von den gewählten Parametern abhängt. Für den Beispieldatensatz wurde bereits ein Modell trainiert, sodass auch die Prognose schnell eingesehen werden kann. Eine ausführliche Beschreibung dieses Anwendungsfalls findet sich weiterführend in unserer Veröffentlichung zur Engpassprognose, die als Basis für dieses Webtool dient.
[-> See publication with the detailed analysis](#)

Auswahl bestätigen und mit der Analyse fortfahren

Diagramm: Ein gerichteter Wertstrom mit 5 Stationen (S_0 bis S_4) und 6 Puffern (B_0 bis B_5). Die Stationen sind durch Pfeile verbunden, die die Prozesszeiten (pt) angeben: $pt_{S_0}=2,00$, $pt_{S_1}=2,25$, $pt_{S_2}=2,00$, $pt_{S_3}=2,25$, $pt_{S_4}=2,00$. Die Puffer sind unter den Stationen platziert, mit den Kapazitäten (bc): $bc_{B_0}=\text{inf.}$, $bc_{B_1}=5$, $bc_{B_2}=5$, $bc_{B_3}=5$, $bc_{B_4}=5$, $bc_{B_5}=\text{inf.}$

Abbildung 3-20: Startbildschirm des IT-Werkzeugs BottleNext (Beispieldatensatz)

Anstatt den Beispieldatensatz zu verwenden, können Sie in der Datenauswahl einen neuen Datensatz simulieren. Die Simulation wird in dieser Sitzung durchgeführt und kann später

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

heruntergeladen werden. Die Simulation ist auf gerichtete Materialflusssysteme beschränkt. Die folgende Abbildung 3-21 zeigt die Hauptelemente der Simulation. Es gibt eine frei definierbare Anzahl von Stationen n , eine Prozesszeit pt pro Station und eine Pufferkapazität bc . Um die Wirksamkeit der Vorhersage zu testen, wird empfohlen, einen Systemzustand mit dem erwarteten dynamischen Verhalten zu erzeugen. Andernfalls wird das Systemverhalten vollständig durch die zufällig verteilte Prozesszeit pt charakterisiert.

The screenshot displays the 'BottleNext' software interface. At the top left is the logo, and at the top right are navigation icons. Below the logo is a 'Datenauswahl' (Data Selection) menu with three options: 'Engpassdetektion' (Bottleneck Detection), 'Engpassdiagnose' (Bottleneck Diagnosis), and 'Engpassprognose' (Bottleneck Forecast). The main area is divided into three columns:

- Verwende Beispieldaten** (Use Example Data): 'Ermöglicht die Durchführung der Engpassanalyse mit einem bereits verfügbaren Beispieldatensatz.' (Enables bottleneck analysis with an already available example dataset.)
- Nutze eine Simulation** (Use a Simulation): 'Ermöglicht die Erzeugung von neuen Daten durch die Simulation eines gerichteten Wertstroms.' (Enables the generation of new data through the simulation of a directed value stream.)
- Verwende eigene Daten** (Use your own data): 'Ermöglicht das Hochladen eigener Daten aus einem Wertstrom mittels entsprechender CSV-Dateien.' (Enables the upload of your own data from a value stream using corresponding CSV files.)

Below these is the 'Details zur Simulation' (Simulation Details) section, which includes a diagram of a production line with stations S_0 to S_n and buffers B_1 to B_n . The diagram shows process times pt_{S_1} to pt_{S_n} and buffer capacities bc_{B_1} to bc_{B_n} . Below the diagram is the 'Festlegung der Parameter' (Parameter Setting) section, which includes input fields for:

- Anzahl der Stationen: 5
- Gesamte Simulationsdauer: 10000
- Prozesszeit festlegen (pt): [2,00, 2,25, 2,00, 2,25, 2,00]
- Pufferkapazitäten festlegen (bc): [5,00, 5,00, 5,00, 5,00, 5,00]

At the bottom, there is a button that says 'Save selection and proceed to the next steps.'

Abbildung 3-21: Datenauswahl des IT-Werkzeugs BottleNext (Simulation)

Das dritte Szenario ermöglicht es den Anwendenden, ihre eigenen Datensätze per Drag & Drop in BottleNext hochzuladen (Abbildung 3-22). Dazu benötigen sie bereits Datensätze aus ihrem Materialflusssystem. Dies kann z. B. ein Datensatz der Pufferfüllstände während der Produktionszeit sein oder die (ggf. bereits berechneten) aktiven Perioden der Stationen. Sollten keine aktiven Perioden vorhanden sein, sondern nur Maschinenereignisse im betrachteten Zeitraum, werden diese mit Hilfe der Simulationsergebnisse berechnet. Dieser Vorgang ist jedoch mit zusätzlichem Rechenaufwand verbunden. Zur Unterstützung der Anwendung sind die erwarteten Datenformate der Methoden zusätzlich beschrieben und abgebildet.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

The screenshot shows the BottleNext software interface. On the left, there is a 'Datenauswahl' (Data Selection) menu with three options: 'Engpassdetektion' (Bottleneck Detection), 'Engpassdiagnose' (Bottleneck Diagnosis), and 'Engpassprognose' (Bottleneck Forecast). The 'Engpassdetektion' option is currently selected. Below the menu are three main data source options: 'Verwende Beispieldaten' (Use Example Data), 'Nutze eine Simulation' (Use a Simulation), and 'Verwende eigene Daten' (Use Your Own Data). Each option has a brief description and an 'Auswählen' (Select) button.

Below these options, there are two sections for uploading data:

- Pufferfüllstände hochladen** (Upload Buffer Levels): This section includes a description and a table with columns for time (t) and buffer levels (B0, B1, ..., Bn-1, Bn). The table shows a linear increase from 0 to 4 over 4 time steps.
- Aktive Betriebsperioden hochladen** (Upload Active Operating Periods): This section includes a description and a table with columns for station indices (S0, S1, ..., Sn-1, Sn) and a 'bottleneck' column. The table shows a sawtooth pattern where the bottleneck station index increases from 0 to 4 over 4 time steps.

At the bottom of the interface, there is a dark blue button labeled 'Save selection and proceed to the next steps.'

Abbildung 3-22: Datenauswahl des IT-Werkzeugs BottleNext (Eigener Datensatz)

Nachdem das Szenario ausgewählt wurde, wird die Engpassidentifikation und die Engpassprognose freigeschaltet. Mit einem Klick auf die *Engpassidentifikation* startet die Berechnung der Identifikation. Es werden drei Darstellungen dargestellt (Abbildung 3-23). Sie geben einen visuellen Überblick über die Identifikation von dynamischen Engpässen. Zunächst werden die Füllstände der einzelnen Puffer dargestellt. Die Füllstände bewegen sich immer zwischen Null und dem maximalen Füllstand bc , wobei nur ganzzahlige Sprünge möglich sind. Im zweiten Diagramm sind die aktiven Perioden der einzelnen Stationen dargestellt. Die Kurven zeigen ein charakteristisches Sägezahnprofil. Die Station mit dem höchsten Wert ist der aktuelle Engpass nach der APM. Die Lage des dynamischen Engpasses im betrachteten Zeitraum zeigt die letzte Grafik.

Perspektivisch können die dargestellten Ergebnisse der Identifikation um eine Engpassdiagnose ergänzt werden. Weitergehende Berechnungen, wie die Ermittlung der relativen Engpasshäufigkeit oder der absoluten Engpassschwere, sind derzeit nicht expliziter Bestandteil des Forschungsvorhabens. Sie müssten vielmehr in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben fortgeführt werden und können später die Funktionalität im Bereich der Engpassdiagnose ergänzen.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen



Abbildung 3-23: Engpassidentifikation des IT-Werkzeugs BottleNext

Die letzte Stufe des IT-Werkzeugs ist die *Engpassprognose*. Zunächst werden die Ergebnisse eines umfassenden Benchmarkings und zweier Prognosen mit unterschiedlichen Modellen vorgestellt (Abbildung 3-24). Der *Zufalls-Benchmark* wählte zufällig eine der fünf Stationen als zu prognostizierenden Engpass aus und erzielte eine durchschnittliche Trefferquote von 19,99 %. Die beiden Benchmarks *Naive M2* und *Naive M4* sagten immer Station M2 respektive M4 als Engpass voraus und erreichten eine Trefferquote von 41,88 % bzw. 44,40 %. Der beste Benchmark war *Last*, der während der Trainingsperiode immer die Station als Engpass vorhersagt, die zuletzt Engpass war. Dieses Benchmark erzielte mit 94,63 % ein sehr gutes Ergebnis. Von den beiden Prognosemodellen erreichte *60x4* eine Genauigkeit von 75,41 %. Das Prognosemodell *60x4* ist ein LSTM-Modell. In der Input-Layer bekommt es einen Inputvektor mit den Pufferfüllständen der vier Pufferbeständen bc der letzten 60 Zeitschritte. Es sagt den Engpass der nächsten 30 Zeitschritte voraus. Das Prognosemodell *60x5* ist ebenfalls ein LSTM-Modell, es erhält bloß als Input neben den Pufferfüllständen die Informationen über den Engpass zu den letzten 60 Zeitschritten. Es erzielt die besten Ergebnisse mit einer Genauigkeit von 95,23 % und es übertrifft somit auch den besten Benchmark-Ansatz übertraf. Aus diesem Grund wird das *60x5*-Modell für die nachfolgende Engpassprognose verwendet.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

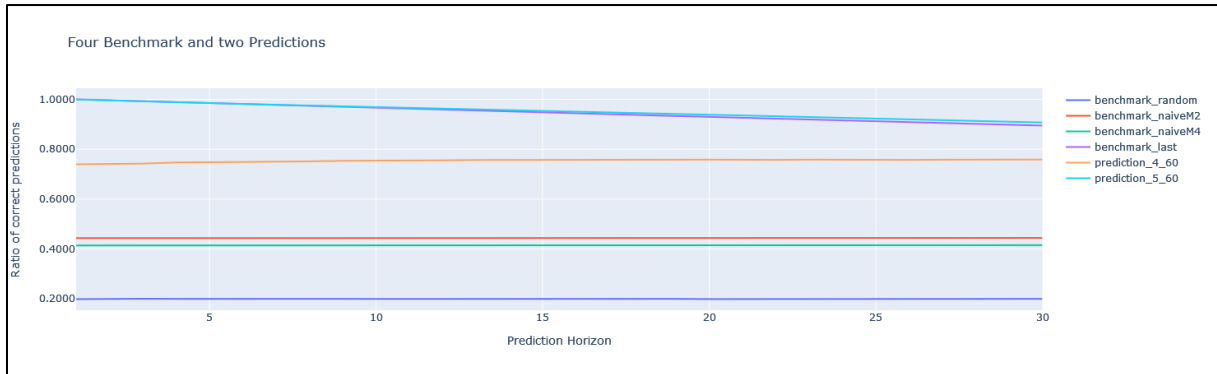


Abbildung 3-24: Vergleich der Prognose-Genauigkeit der Engpassprognose mit Benchmarks

Bei den Trainingsdaten wurden einer zehnfachen mit insgesamt 99.200 Stichproben kreuzvalidiert. Von diesen weisen 10.485 Stichproben einen sich verschiebenden Engpass innerhalb ihres 30-stufigen Prognosehorizonts auf. Für die Untersuchung der Engpassprognose wurden nur die Stichproben mit einem sich verschiebenden Engpass ausgewählt. Zur Veranschaulichung der Prognoseergebnisse können Anwendende über eine Eingabe auswählen welche Stichprobennummer sie auswerten möchten. Sie erhalten erneut drei Diagramme (Abbildung 3-25). Die linken Diagramme zeigen die beiden Inputparameter an. Sie entsprechen jeweils einem 60 Zeitschritte langen Intervall. Im oberen Diagramm werden die Verläufe der Pufferfüllstände der Stationen angezeigt. Im unteren Diagramm werden die letzten Engpässe ausgegeben. Aus diesen beiden Inputdaten erzeugt das 60x5-Modell dann die Engpassprognose, dessen 30-stufiger Prognosehorizont unten rechts abgebildet ist. Im der beispielhaften Stichprobennummer 13 ist gut zusehen, dass die Prognose (rot) mit einer kurzen Verzögerung die Engpassverschiebung prognostiziert. Das Ergebnis zeigt auch visuell, wie vielversprechend die Engpassprognose funktioniert.

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen



Abbildung 3-25: Engpassprognose BottleNext

In Ergänzung der Arbeiten wurde im Verlaufe der Verfeinerung innerhalb des Tools eine Vielzahl von Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen. Zum einen wurde mit der Möglichkeit einer Engpassdiagnose der Startpunkt für vertiefte Arbeiten rund um diese besonders praxisrelevante Phase des Engpassmanagements gesetzt. In der Anwendung können demnach Stationen in ihrem Auftreten als Engpass auch für ganze Zeitintervalle überprüft werden und technisch auch weitere Kriterien wie die Schwere des Engpasses oder Kosten hinterlegt werden. Einen zusammenfassenden Eindruck von den Diagnosefunktionen zum Abschluss des PrEPFlow-Vorhabens bietet Abbildung 3-26.

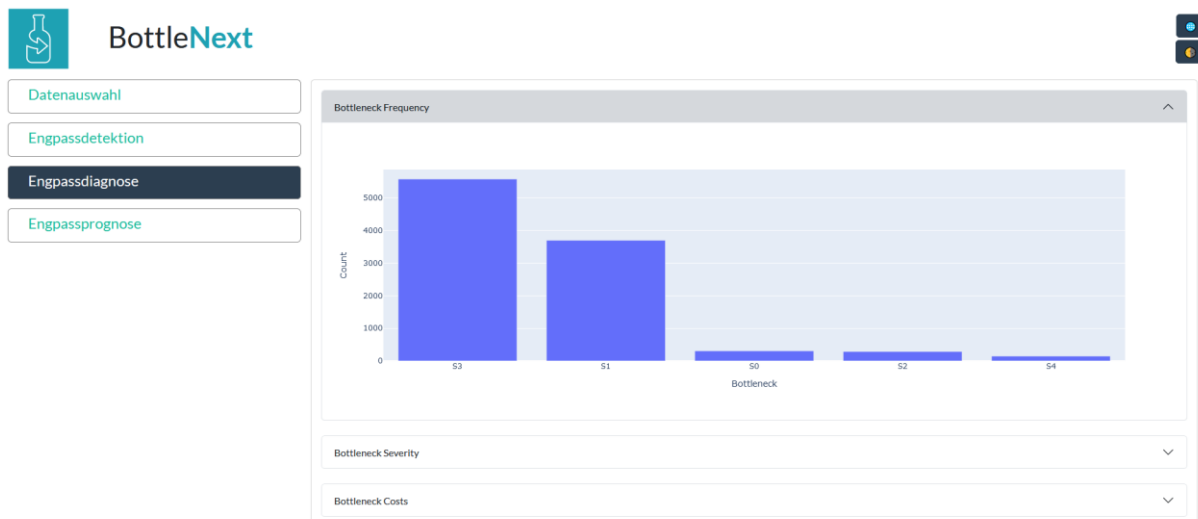


Abbildung 3-26: Diagnosebereich des BottleNext-Tools (Beispieldatensatz)

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Zum anderen sind durch das Feedback der Anwender zusätzliche Funktionen eingeflossen, die die Usability der Anwendung weiter erhöht haben. Speziell die Beschäftigung mit dem Anwendungsfall der Fa. Bosch legte eine Integration der Mehrsprachigkeit ins Tool nahe. Neben der deutschen Sprache steht in der Anwendung nunmehr auch die englische Sprachumgebung zur Verfügung. Auf Feedback aus dem Expertenkreis des RIF wurde zudem eine Dark Mode Variante der Applikation entwickelt, die nunmehr per Knopfdruck umgeschaltet werden kann.

| Kategorie | Anforderung | Wichtigkeit > Skala 1 - 4 | |
|--------------------|------------------------------------|---------------------------|---|
| Datenintegration | Standardformat | 2.8 | ✔ |
| | Online-Datenanbindung | 2.8 | x |
| | Datenvorverarbeitung | 2.2 | |
| User Interface | Manuelle Dateneingabe | 2.7 | x |
| | Mobile Nutzung | 2.8 | ✔ |
| | Einfache Interaktion | 3.7 | ✔ |
| Zur Analyse | Auffälligkeiten erkennen | 3.3 | ⚡ |
| | Ergebnisse visualisieren | 2.8 | ✔ |
| | Modell selbst auswählen | 2.4 | |
| Zum Prognosemodell | Modellierbar | 1.8 | |
| | Konfiguration zulassen | 2.6 | ⚡ |
| | Aussagen zur Genauigkeit | 3.6 | ✔ |
| Maßnahmen | Umfassend einsehbar | 3.3 | ⚡ |
| | Priorisierung und Kategorisierung | 3.2 | ✔ |
| | Individuell Anpassbar | 3.0 | ⚡ |

✔ erfüllt
⚡ teilweise erfüllt
x nicht erfüllt

Abbildung 3-27: Anforderungsabgleich in der PREPFlow-Toolentwicklung

In der Gesamtschau auf die Anforderungen der IT-Toolentwicklung wird offenbar, dass alle Kernanforderungen aus dem PA vollständig oder teilweise erfüllt werden konnten. Die Anforderungen „Datenvorverarbeitung“, „Modell selbst auswählen“ und „Modellierbar“ wurden in Abstimmung mit den Anwendern während der Detaillierung als nicht zielführend verworfen. Eine nicht im Rahmen des PrEPFlow-Projektes zu schließende und nach Einschätzung der PA Teilnehmer auch ohnehin sehr individuell zu behandelnde Anforderungslücke ergab sich bei der „Online-Datenanbindung“ und der „Manuelle(n) Dateneingabe“. (Vgl. Abbildung 3-27) Die Integration von Daten in die Modellanwendung und auch die Erzeugung (hier gelöst mit Simulationsdaten) ist stark abhängig von den jeweiligen Möglichkeiten der IT-Bebauung und strategischen Entscheidungen der Anwenderunternehmen.

Erzielte Ergebnisse:

Das BottleNext-Tool des PrEPFlow-Vorhabens stellt eine kompakte und doch vielschichtige Umsetzung der zahlreichen Erkenntnisse des Projektes dar. Es vereint den Zugang zu den Phasen des Engpassmanagements, das Verständnis der Detektionsmethoden, die erforderlichen Formate zur Integration von Anwendungsdaten, die Modellbildung und auch die

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen

Evaluation der Ergebnisse in einem frei zugänglichen Werkzeug. Der zugrundeliegende Code ist zugänglich und bietet eine ideale Absprungbasis für Folgeentwicklungen in Praxis und Forschung. Mit der Bestätigung der Anforderungsbestätigung im abschließenden PA bei einem Anwenderunternehmen konnte zudem die Erwartungshaltung der begleitenden Industrieunternehmen vollumfänglich erfüllt werden.

3.7 AP 7: Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit, Dokumentation und Ergebnistransfer

Zielsetzung: Das AP 7 zielt auf die Dokumentation und Dissemination der erzielten Forschungsergebnisse während der gesamten Projektlaufzeit des PrEPFlow-Vorhabens ab. Es ergänzt somit die Teilbereiche der Dokumentation, die bereits im Rahmen der AP 1-6 dargestellt sind. Neben der Koordination unterschiedlicher Interaktionsformate umfasst das AP auch die diskriminierungsfreie Bereitstellung gewonnener Erkenntnisse und (Teil-)Ergebnisse in einer breiten Fachöffentlichkeit.

Durchgeführte Arbeiten:

Im Verlauf des Projektes wurden zahlreiche unterschiedliche Formate der Zusammenarbeit bilateral und in größeren Runden wie bspw. dem PA erprobt. Unter dem Einfluss der Corona Pandemie konnten viele der Veranstaltungen in der frühen Phase des Projektes nur digital stattfinden, was speziell für die Abstimmungen in den Anwendungsfällen und um die Daten nur schwer zu realisieren war. Aus dieser Phase des Projektes stammen die Verzögerungen im Arbeitsplan, die trotz allen Bemühens nicht ganz aufgeholt werden konnten und in einer kostenneutralen Verlängerung des Projektes mündeten.

Neben den geplanten PA-Sitzungen ergab sich zum Abschluss des Vorhabens die Möglichkeit eine Abschlussveranstaltung im Kernteam des PA direkt in einem Anwenderunternehmen durchzuführen. Diese Konstellation hatte den besonderen Charme, dass durch die räumliche Nähe zum Produktionssystem und Anwendungsfall der Fa. Jung der direkte Brückenschlag zwischen den erarbeiteten Ergebnissen und ihrer praktischen Anwendung gelingen konnte. Einen Eindruck von der Konstellation der PA-Treffen am Beispiel dieses Abschlusstreffens gibt Abbildung 3-28

3. Vergleich der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse mit den Zielen



Abbildung 3-28: PreEPFlow-Abschlusstreffen bei der Fa. Jung

Neben den großen PA-Treffen wurden im Projektverlauf zahlreiche Arbeitstreffen, Interviewtermine, Online-Umfragen, Review-Termine und Diskussionsrunden organisiert. Hierbei waren die Formate und die Art der Dokumentation (Concept Board, Mentimeter, Google Docs, Powerpoint etc.) immer an die jeweilige Aufgabe angepasst und wurden sogar im Termin teilweise flexibel angepasst.

Zusätzlich erfolgte die Ergebnisveröffentlichung in einschlägigen (inter-)nationalen wissenschaftlichen Journalen und im Internet. Die Ergebnisse des Projekts fließen in laufende Dissertationen am Institut für Produktionssysteme der TU Dortmund ein. Durch die Vorstellung der Ergebnisse auf internationalen Konferenzen konnte zusätzliches Feedback von nicht direkt am Vorhaben beteiligten Personen gesammelt werden.

Der Online Auftritt und die regelmäßigen Updates zum Projekt (auch über den Kooperationspartner IPS an der TU Dortmund und NIRO) trugen zur Vergrößerung des PA bei und so konnten zusätzliche Teilnehmer gewonnen werden.

Erzielte Ergebnisse:

Neben dem hier vorliegenden Abschlussbericht sind die Vorbereitungen, Durchführungen und Nachbereitungen aller Interaktionsformate des PreEPFlow-Vorhabens direkte Ergebnisse des AP 6. Zudem sind die getätigten Veröffentlichungen ebenso zu nennen wie das in AP 6 ausführlich dargestellte IT-Tool Bottle-Next. Weitere Teilergebnisse wurden für spezielle Zielgruppen aufbereitet und finden sich im Überblick in Kapitel 4.

4. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

In der Zusammenfassung der Ergebnisse des PrEPFlow Projektes wurde auch getrieben durch den PA eine modulare Ergebnisstruktur erzielt. Das Feedback der Industrieteilnehmer präferierte diese selektiv einsetzbare Form der Ergebnisse vor einer Integration in einem Format. Somit können Verwerter unterschiedlicher Gruppen zielgerichtet von unterschiedlichen Ergebnismodulen des Projektes profitieren und diese wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ausgeführt wirtschaftlich verwerten. In ihrer groben Struktur folgen die Ergebnismodule des Projektes den erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete und unterteilen sich in prognosemodellbezogene Ergebnisse und anwendungsbezogene Ergebnisse jeweils für das Anwendungsumfeld des „Dynamischen Engpassmanagement“.

In der Ergebnisübersichtsdarstellung (wie auf dem vierten PA-Treffen des PrEPFlow Projektes vorgestellt) erfolgte die Aufteilung in prognose- (vgl. linker Teil von Abbildung 4-1) und anwendungsbezogenen (vgl. rechter Teil von Abbildung 4-1) Ergebnissen bereits. Der vertikale Verlauf von oben nach unten repräsentiert das zeitliche Entstehen der Ergebnismodule im Verlauf des Projektes und gibt Aufschluss über die Möglichkeiten der Verwendung innerhalb der Projektlaufzeit.

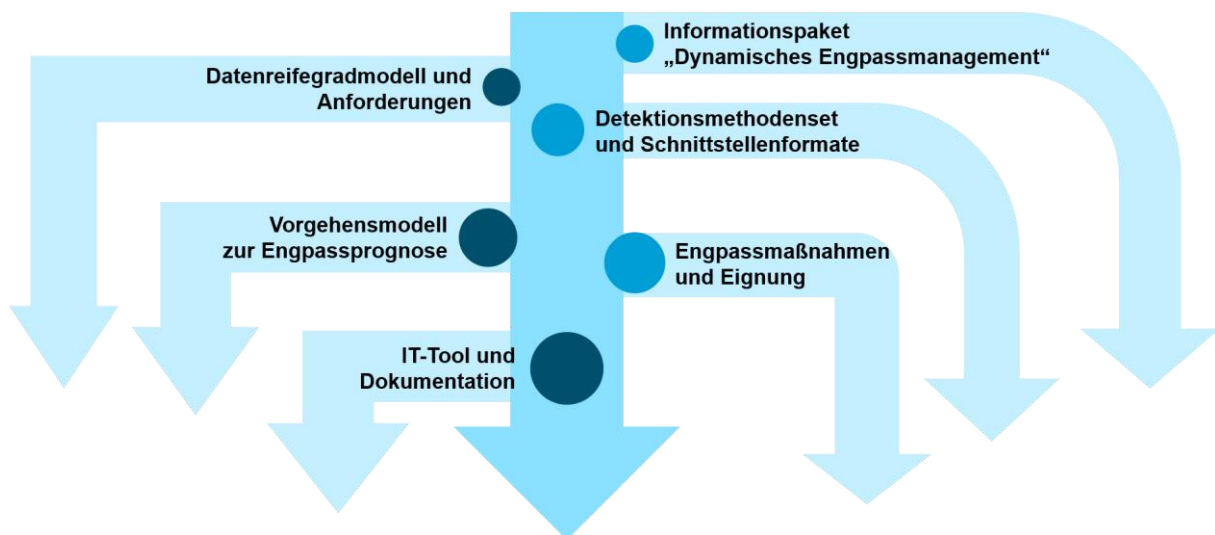


Abbildung 4-1: Ergebnisübersichtsdarstellung des PrEPFlow Forschungsvorhabens

Die Ergebnismodule sollen zusammenfassend kurz dargestellt und ihre Bedeutung für das Vorhaben und nachfolgende Verwertung erläutert werden:

- **Informationspaket „Dynamisches Engpassmanagement“ (Anwendung)**

4. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

In diesem Ergebnismodul wurde dem Wunsch der Verbände und Anwender nachgekommen ein niederschwelliges Informationsangebot für den Einstieg in das Themenfeld „Dynamisches Engpassmanagement“ zu gestalten. In einem kompakten (>10 Folien umfassenden) Informationspaket konnten Kerninformationen zur Grundmotivation, relevanten Problemstellungen, dem Stand der Technik und strukturierten Lösungsansätzen zusammengestellt werden. Genutzt wurde das Paket sowohl zur Akquise potentieller neuer Projektpartner als auch für den breiteren Transfer der Projektergebnisse.

- **Datenreifegradmodell und Anforderungen (Prognosemodell)**

In diesem Ergebnismodul konnte der Problematik der Datenbeschaffung in einer ebenfalls frühen Phase des Projektes entgegengewirkt werden. In einem speziell auf den Anwendungsfall zugeschnittenen und intuitiv durch potentielle Anwender zu bedienenden Assessment-Tool konnten die Anforderungen an die Datenbasis und der erforderliche Reifegrad der dort abgebildeten Informationen bewertet werden. Genutzt wurde das Tool in der projektinternen Bewertung der Anwendungsfälle und zur Auswahl der zur Vertiefung vorgeschlagenen Use Cases aber auch (in abgewandelter Form) in Beratungsangeboten der PA Mitglieder zur Reifegradbewertung und Methodenauswahl in Kundenprojekten.

- **Detektionsmethodenset und Schnittstellenformate (Anwendung)**

In diesem Ergebnismodul ging es um die potentielle Integration von Anwendungsdaten in die Systematik des dynamischen Engpassmanagements. Das speziell auf die Detektion dynamischer Engpässe zugeschnittene Methodenset wurde um die in den jeweiligen Methoden erforderliche Grundstruktur der Daten erweitert. Genutzt wurden Methodenset und Formate zur Validierung der Use Cases und (im Erfolgsfall) als Schema zur Integration der Anwenderspezifischen Daten. Zudem dienten die Spezifikationen auch als Grundlage für Analysemodule in cloudbasierten Umgebungen der PA Mitglieder und zur Systematisierung der Eingangsdaten in diese.

- **Vorgehensmodell zur Engpassprognose (Prognosemodell)**

Kern dieses Ergebnismoduls stellt die Vorgehensweise zur Integration von Prognosemodellen in die Anwendungsumgebungen der Unternehmen dar. Das Modul nutzt hierbei bereits erarbeitete Ergebnisse des Projektes und integriert diese mit neuen Erkenntnissen (bspw. Bewertung der Datenqualität, Prognosemodellbildung, Validierung der Modelle) in eine geschlossenen anwendbare Methode. Diese wurde in der Unterstützung der Durchführung der Anwendungsfälle, der Ausprägung des IT-Werkzeugs und auch in den Einzelbetrachtungen der Anwenderunternehmen rege genutzt. Das Modul erwies sich hierbei als generisch genug, allgemein eingesetzt zu werden und brachte nach Feedback der Anwender dennoch ausreichenden konkreten Mehrwert.

- **Engpassmaßnahmen und Eignung (Anwendung)**

4. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Im Fokus dieses Ergebnismoduls steht die zielgerichtete Zusammenstellung und Aufbereitung von potentiellen Maßnahmen zur Engpassvermeidung im dynamischen Fall. Das Modul liefert hierzu einen umfangreichen Maßnahmenkatalog (inkl. einer Bewertung der Anwendungseignung) und detaillierte Beschreibungen zu deren Einsatz. Besonders wertvoll waren in diesem Ergebnismodul die praxisnahen Einschätzungen der PA Teilnehmer, die eine breite Basis für den Einsatz der ausgewählten Maßnahmen bieten. Genutzt wurden Katalog und Interviews im unternehmensinternen Abgleich von Maßnahmen, dem unternehmensübergreifenden Austausch von Informationen über Maßnahmen und in der Ableitung von konkreten Maßnahmen in den Anwendungsfällen des PA. Das Modul stellte sich insbesondere für die PA Mitglieder, bei deren Use Cases eine direkte Integration in die Prognosemodellbildung scheiterte als sehr hilfreich dar. Das Methodenset und mitgelieferte Wissen half, die Engpassprobleme allein durch eine breitere Sichtweise effektiv zu bekämpfen.

- **IT-Tool und Dokumentation (Prognosemodell)**

Im Fokus dieses abschließenden Ergebnismoduls des PrEPFlow Projektes steht die Integration der Lösungsbausteine in einen Demonstrator. Das Modul liefert hierzu neben dem benutzerfreundlichen Front-End auch die erforderlichen Logiken und Dokumentationen (inkl. Modelle und exemplarischer Daten) um eine Engpassprognose durchzuführen und nachzuvollziehen. Genutzt wurde das Tool neben der Anwendung auf Simulationsdaten im dargestellten Beispiel auch auf den Use Case Daten des PA. Diese offline Umsetzung war Basis für weitere Integrationen in Analyseumgebungen und kann auch in Zukunft Eingang in kommerzielle Werkzeuge (bspw. des Wertstrommanagements) halten. Die integrierte Prognosemethodik stellt überdies (wie bereits dargestellt) ein überragendes Ergebnis des Projektes aus Sicht des Standes der Forschung dar.

Im Ausblick auf weitere dem PrEPFlow Projekt folgende Forschungsaktivitäten und –felder ist zunächst die durchweg problematische Datenlage in produzierenden Unternehmen zu nennen. Im PrEPFlow Projekt verhinderte diese Daten- und auch IT-Systemproblematik eine Live Integration der Methodik innerhalb der Projektlaufzeit. Zudem konnten viele der in der Praxis identifizierten und fachlich relevanten Anwendungsfälle aufgrund fehlender oder mangelhafter Datenbasis nicht zufriedenstellend gelöst werden. Neben den gegangenen Schritten (Datenreifegradmessung, Evaluation der Datenqualität und Aufbau von Beispielarchitekturen in Use Cases) braucht es speziell für kleinere und mittlere Unternehmen in diesem Zusammenhang verbesserte Lösungen. So ist es einer Initiative des RIF aus dem PA des PrEPFlow Projektes heraus zu verdanken, dass diese Forschungslücke mit einer Folgeaktivität begegnet wird.

4. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Das Forschungsvorhaben „Detektion und Diagnose von dynamischen Engpässen in gerichteten Materialflusssystemen durch nachrüstbare Pufferfüllstands-Überwachung (DeDiFlow)“ (aktuell eingereicht in der Langantragphase der AiF) richtet sein Augenmerk auf zwei wesentliche Aspekte. Erstens, den bereits genannten Aspekt der Datenakquisition, dem im Rahmen der Entwicklung mit einem Nachrüstbaren Low-Cost Ansatz für die kontinuierliche Überwachung von Pufferfüllständen begegnet wird. Zweitens waren nicht viele Unternehmen im Rahmen des PrEPFlow PA in der Lage die erforderliche Eingriffsgeschwindigkeit zur Vermeidung von Engpässen zu leisten. Somit kam der Wunsch auf, eine eher zeitraumgetriebene Auswertung in Form einer Diagnosemethode zu entwickeln, mit deren Hilfe Unternehmen auch in längeren Zyklen in Verbindung mit den entsprechenden Maßnahmen Produktivitätsgewinne erzielen können. Die Vorgehensweise im Nachfolgeprojekt, der Kern des PA entstanden aus dem PrEPFlow PA und wesentliche erwartete Forschungsergebnisse fasst Abbildung 4-2 zusammen.

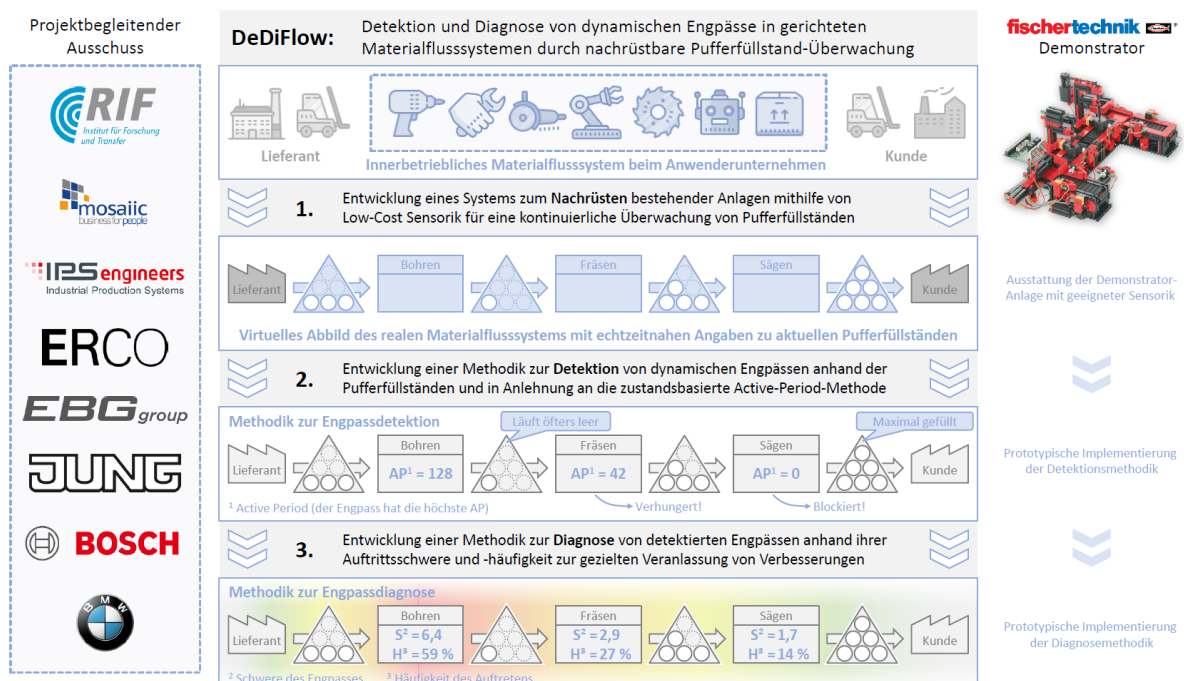


Abbildung 4-2: Forschungsvorhaben DeDiFlow im Überblick

Im Hinblick auf die Unterstützung heterogener Anwendungen durch das IT-Tool haben sich im Verlaufe des Projektes zahlreiche Entwicklungsmöglichkeiten ergeben, denen im Rahmen der Projektlaufzeit nicht nachgegangen werden sollte. Diese sind im Einzelnen:

- Flexible Integration von Live Daten über Connectoren
- Adaption der Prognoselogik entlang der Charakteristika des Produktionssystems
- Modulare Nutzung unterschiedlicher Detektions- und Prognoselogiken
- Integration von systemgetriebenen KPIs für eine zielführende Diagnose von Engpassituationen

4. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Diese Weiterentwicklungspotentiale wurden innerhalb des PA diskutiert, validiert und sind vereinzelt in die individuellen Entwicklungsroadmaps der verbundenen Unternehmen eingegangen.

Ergänzend zu diesen sehr naheliegenden, direkt aus PrEPFlow entstandenen Anforderungen an zukünftige Forschungsvorhaben ist speziell im Kontext der Liefer-, Absatz- und Versorgungskrisen der vergangenen Jahre auch innerhalb des PA der Wunsch nach verbesserter Assistenzfunktion in Wertschöpfungsnetzwerken oder –kreisläufen geäußert worden. Diese mit der Engpassdetektion und –prognose verwandten Ansätze folgen analogen aber nicht identischen Logiken. Zudem sind die Einflussfaktoren aus strategischer wie aus operativer Perspektive vielfältiger. Nicht zu bestreiten ist aber, dass die Wandlungsfähigkeit der Produktionssysteme und ihre Robustheit gegen Störungen aus externen Quellen in Zukunft noch entscheidender sein wird. In einer aus dem Forschungsprojekt entstandenen gemeinsamen Konsortialinitiative sollen diese Herausforderungen angegangen werden.

Aus Sicht des Managements dynamischer Engpässe bietet dieser neue, zeitgemäße Zuschnitt des Systemverständnisses zahlreiche methodische und technische Herausforderungen, von denen einige kurz aufgeführt werden sollen:

- Entwicklung kapazitätssensitiver Engpassdetektionsmethoden
- Unternehmensübergreifende Bilanzierung von Engpassverlusten
- Lernen und Ausführen von Prognosemodellen auf verteilten Datenbeständen
- Umgang mit heterogener Datenreife in Prognoseprozessen
- Schaffung gesicherter Datenräume für Netzwerkbasierete Auswertungen
- Verzahnung unternehmensinterner Entwicklungen in Datenbank- und Machine Learning Technologien
- Abstrahierung und Modellierung von Unternehmensnetzwerken und Interdependenzen

Bei allen aufgezeigten Herausforderungen bietet der erweiterte Blickwinkel auf das Dynamische Engpassmanagement enorme Zukunftspotentiale und verhilft einem – wie im Projekt deutlich aufgezeigt – hoch relevanten Thema zu noch größerer Dringlichkeit und Potential.

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Bereits in einer frühen Phase des Projektes wurde ein umfassendes Konzept zum Transfer der PrEPFlow Ergebnisse in die Wirtschaft erarbeitet. Die im Konzept abgebildeten Handlungsfelder und führenden Transfertreiber des PA sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Sie fokussieren auf unterschiedliche Geschäftsmodelle hinter der Nutzung der Ergebnisse.

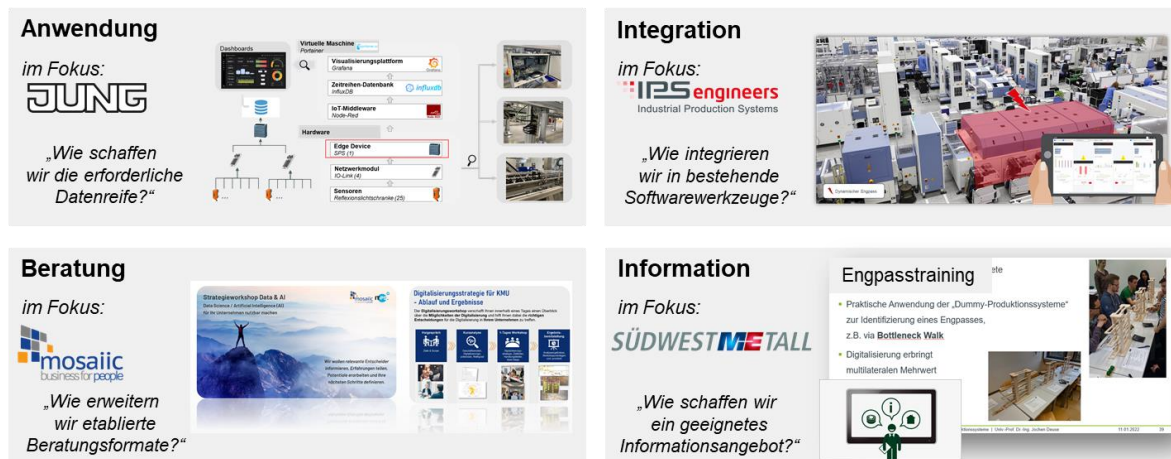


Abbildung 5-1: Transferkonzept des PrEPFlow-Vorhabens

Während die Ergebnisse für die Anwendung (vgl. Kapitel 3) und die Information (vgl. Kapitel 4) bereits umfassend beschrieben sind, sollen in der Folge die Ergebnisse im Bereich der Beratung und der Integration kurz skizziert werden.

Unter der Leitung der mosaiic GmbH konnten im Verlauf des Projektes die wesentlichen Anknüpfungspunkte für das Beratungsgeschäft nach Projektende herausgearbeitet werden. Die hier erarbeiteten Lösungsbausteine sind analog auch für die PA-Mitglieder RIF e.V. (in seiner Eigenschaft als Auftragsforschungseinrichtung) und die IPS Engineers GmbH relevant und adaptiert nutzbar. Exemplarisch für die mosaiic GmbH wurde das Beratungsformat einer Digitalisierungsstrategieberatung (siehe Abbildung im Überblick) ausgewählt und die Suchfeldanalyse um die Identifikation von Anwendungsfällen des Engpassmanagements erweitert. Für die übrigen Beratungsunternehmen konnten ähnliche Anknüpfungspunkte (teils auch auf detaillierteren Ebenen) gefunden werden.



Abbildung 5-2: Exemplarische Integration der PrEPFlow-Ergebnisse im Beratungsformat

Im Falle der Integration in Software ist der Weg in die Anwendung umfangreicher zu unterstützen. Im Abgleich der Ergebnisse mit den strategischen Roadmaps der Softwareanbieter Evosoft und IPS Engineers GmbH wurde eine Abstimmung der Transfererwartungen geschaffen. Die erforderlichen Grundfunktionalitäten wie Zykluszeitberechnung, Pufferstandberechnung und auch Bestimmung aktiver Perioden sind bereits entwickelt und stehen in Werkzeugen wie dem „Dynamic Value Stream Assistant“ zur Verfügung. Die Anbindung der Modellbildung erfordert jedoch eine über die aktuellen Fähigkeiten der Umgebung herausgehende Erweiterung. Auf den Roadmaps der beteiligten Service-Provider ist mit der Integration dieser Erweiterung in den charakteristischen Schritten des im PrEPFlow-Projektes entwickelten Engpassmanagements zu rechnen. Die Detektion wird in der kurzfristigen Perspektive (>1 Jahr) realisierbar sein. Mit einer kleinen Verzögerung ist mit einer Integration der Diagnosemodule zu rechnen. Der besondere Anspruch in dieser Entwicklung liegt in der Interaktion mit dem Anwender zur Darstellung der Ergebnisse und Integration der zusätzlichen Metriken. Umfangreicher und damit langfristiger sind die Anpassungen zur Integration der Prognose in die Systeme. Möglichkeiten des Modellmanagements und der Modellbildung sind zu integrieren. Zudem ist die Organisation der Versorgung mit Trainingsdaten im Zusammenspiel mit einer performanten Live-Analyseumgebung ein Entwicklungsschwerpunkt der kommenden 3-5 Jahre.

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Zusammenfassend sollen die Transfermaßnahmen des PrEPFlow-Projektes in Tabelle 6 vorgestellt werden. Diese werden auch nach Projektende noch fortgeschrieben (vgl. Tabelle7).

Tabelle 6 Übersicht der während der Projektlaufzeit geplanten Transfermaßnahmen

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Termin |
|--|---|--|---|
| Projektinformation im Internet über den aktuellen Stand der Arbeiten | <ul style="list-style-type: none"> • Informationen zu den Projektergebnissen • Verbreitung der Projektidee an potenzielle Anwender | www.ips.do, www.bvl.de, https://www.rif-ev.de | 01.10.2021 |
| Sitzungen des PA | <ul style="list-style-type: none"> • Diskussion und Abstimmung des Projektvorgehens • Sicherstellung der Akzeptanz im PA | Meilensteintreffen des PA im Projekt | 07.09.2021 12.01.2022 28.09.2022 |
| Transfer in die Industrie durch Netzwerke und Verbände | <ul style="list-style-type: none"> • Ansprache von und Verbreitung an potenziell interessierte Unternehmen | Netzwerkpartner NIRO, Südwestmetall, mosaic | 03.02.2021 27.04.2022 19.05.2022 23.06.2022 |
| Akquise potenziell interessierter Unternehmen | <ul style="list-style-type: none"> • Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Industrie | Vorstellungen der Projektergebnisse bei Unternehmen und Verbänden | fortlaufend (und auf Anfrage, bspw. Bosch VN) |
| Präsentation auf Wissensplattformen oder in Arbeitskreisen | <ul style="list-style-type: none"> • Austausch und Ergebnistransfer in die (regionale) Wirtschaft durch Plattformen wie bspw. NIRO-Wissen | Fortlaufend | Siehe Transferkonzept Information |
| Informationsblatt | <ul style="list-style-type: none"> • Übersicht über die Forschungsergebnisse | E-Mail-Newsletter | Siehe Transferkonzept Information |
| Master-/Bachelor- und Projektarbeiten im Forschungsprojekt | <ul style="list-style-type: none"> • Ausschreibung wissenschaftlicher Arbeiten zur Vermittlung wissensch. Erkenntnisse im Themenfeld und zur Heranführung Studierender an selbstständiges Arbeiten | Moodle-Lernplattform der TU Dortmund | Fortlaufend, 3 in 2022 abgeschlossen, 1 in Arbeit |
| Ergebnisvorstellung auf Tagungen/ Kongressen | Schriftlicher Bericht und Vortrag der Projektergebnisse: <ul style="list-style-type: none"> • Internationale Messe • Fachkongresse (bspw. Supply Chain Forum Südwest) | Tages- oder Mehrtagesveranstaltungen jeweils jährlich | CARV Conference 01.11-02.11.2021, IEA/AIE Conference 19.07.2022, Austausch „Smart Factory und Dyn. Wertstrom“ 07.02.2022, „wertstrom Experten Runde – VW Konzern“ 19.05.2022, „Dynamisches Engpassmanagement – Batteriezellproduktion“ 24.11.2022 |
| Schulungsunterlage | Praxisnahe Aufbereitung der Ergebnisse zur Durchführung von Workshops in der NIRO-Akademie und in anderen Netzwerken | Angebot eines Workshops „EP-Prognose in Materialflusssystemen“ im Rahmen der NIRO-Akademie | 2021 Schaufenster-Format, erstes Informationsangebot NIRO/SWM |
| | Wissensch. didaktische Aufbereitung der Ergebnisse zur Einbindung in die universitäre Lehre | Ergebnistransfer in die Vorlesung „Gestaltung von Produktionssystemen“ | 2021 integriert in Lean Awareness Schulung |

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

| | | | |
|--|--|---|---|
| Exemplarische Einführung des entwickelten IT-Werkzeugs | <ul style="list-style-type: none"> • Zeitgleiche Verifizierung und Validierung der Forschungsergebnisse in den Anwenderbetrieben | Tages- oder Mehrtagesveranstaltungen | Durchgeführt bei den PA Mitgliedern Jung und IPS Engineers – Fortsetzung in 2023 |
| Beratung von Unternehmen | <ul style="list-style-type: none"> • Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Industrie | Verwendung der Forschungsergebnisse in Industrieprojekten | Projekt IPS Engineers 2021, Projekt IPS Engineers „Bestandsdimensionierung“ Q2-3 2022, Projekt IPS Engineers „Wertstrom-assistent“ Q3 2022-Q1 2023, Geplantes Projekt IAP 2023, Geplantes Projekt mosaic 2023 |
| Veröffentlichungen in Fachzeitschriften | <ul style="list-style-type: none"> • Wissensch. Veröffentlichungen in Fachzeitschriften: Industrial Engineering, Logistik, wt Werkstatttechnik online, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, etc. | fortlaufend | Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (2022) 5 |
| Dissertation und wissensch. Publikation | <ul style="list-style-type: none"> • Wissensch. Qualifikation des Bearbeiters des Forschungsprojekts | Dissertation | 2 in Vorbereitung (Ziel nach Projektende) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Nationaler Ergebnistransfer | Publikation in Fachzeitschriften Internationale Konferenzen | 3 gesamt |
| Abschlussbericht | <ul style="list-style-type: none"> • Verbreitung der Projektergebnisse | eldorado.tu-dortmund.de | 2023 |
| Publikation der Projektergebnisse im Internet | <ul style="list-style-type: none"> • Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wirtschaft | Verwaltung einer Projekt-Homepage | Integriert in RIF und informativ auf IPS Homepage |
| | | IT-Tool BottleNext | https://prepflow.pythonanywhere.com |

5.1 Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Tabelle 3 - Übersicht über geplante Transfermaßnahmen

| Maßnahme | Ziel | Ort / Rahmen | Datum / Zeit |
|---|--|--|--------------------------------|
| Exemplarische Einführung der Systematik | Zeitgleiche Verifizierung und Validierung der Forschungsergebnisse bei Anwenderunternehmen aus dem Mitgliedskreis des PA. | Fortlaufende Begleitung des Anwenderunternehmens | Nach Projektende / fortlaufend |
| Abschlussbericht | Veröffentlichung auf www.eldorado.tu-dortmund.de und www.gbo-ev.de | Digital | Nach Projektende |
| Akquise von F&E Industriaufträgen | Aufnahme von „Dynamisches Engpassmanagement“ in das Portfolio des RIF und IPS | Digital | Fortlaufend nach Projektende |

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

| | | | |
|--|---|-----------|------------------------------|
| Verbreitung der Ergebnisse auf Fachseminaren | Durchführung von Workshops und Schulungen im Bereich Engpassmanagement (konkret: Entwicklung Demonstratore) | Digital | Fortlaufend nach Projektende |
| Einbindung der Ergebnisse in die universitäre Lehre, insb. in die Veranstaltungen „Grundlagen der Arbeits- und Betriebsorganisation“ | Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse im Themenfeld des Engpassmanagements | WS2024/25 | Fortlaufend nach Projektende |

5.2 Bewertung des Ergebnistransfers in die Wirtschaft

Die Umsetzung der Transfermaßnahmen erfolgte gemäß den im Projektplan festgelegten Maßnahmen. Die Transfermaßnahmen sind hinsichtlich des Wissenstransfers in die Industrie als erfolgreich zu bewerten.

Die Anforderungsdefinition sowie die Analyse Anwendungsbedingungen und Use Cases erfolgten zu Beginn des Projektes. Die Unternehmen des PA wurden frühzeitig in die Anforderungsdefinition eingebunden. Darüber hinaus fand im zweiten PA eine intensive Diskussion der Anforderungen statt, die es ermöglichte, praxisorientierte Anforderungen explizit bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Darüber hinaus fand ein Austausch mit den Mitgliedern des PA über den Entwicklungsstand des IR-Tools statt, um weitere Anregungen einfließen zu lassen. Auch aus den Gesprächen mit den Industrienetzwerken konnten weitere Verbesserungen abgeleitet werden.

Die Anwendung bzw. Integration der Engpassprognose in den Use Cases ist als besonders wertvoll einzustufen. Hervorzuheben ist auch die erfolgreiche Suche nach Validierungspartnern, im Rahmen der Akquise wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts in mehreren bilateralen Austauschen bei KMU vorgestellt. Im Zuge der Validierungswshops konnte die praktische Anwendbarkeit der Methodik verifiziert werden. Dies spiegelt sich auch in der positiven Erfüllung der Anforderungen wider.

Ferner wird die Integration der Projektergebnisse in der Lehre und der Betreuung von studentischen Arbeiten als relevant eingestuft. Auf diese Weise können die Studierenden auch in Zukunft einen Beitrag zum weiteren Transfer der Projektergebnisse in die Industrie leisten. Darüber hinaus erfolgte der Transfer bereits während der Projektlaufzeit im Rahmen von praxisorientierten Abschlussarbeiten (teils - wie im Falle der Fa. Jung - mit Industriebeteiligung).

Der bei der Antragstellung beschriebene Nutzen der Methode konnte allgemein bestätigt werden. Das Management dynamischer Engpässe wird somit insbesondere transparenter und

5. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

fundierter durchgeführt. Weiterhin werden Unternehmen bei der Auseinandersetzung mit den Themen Engpassmanagements, Digitalisierung, Datenhaltung, Visualisierungstechniken und Interventionsmaßnahmen unterstützt. Die Punkte sind langfristig als wichtiger Wettbewerbsfaktor einzustufen.

6. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 2-1: Arten der Auftragsauslösung in Produktionssystemen (in Anlehnung an Hoekstra 1992, S. 6f.; Wiendahl 2019, S. 249) | 11 |
| Abbildung 2-2: Organisationsprinzipien in Produktionssystemen (Habenicht 1993, S. 3387; Kletti 2006, S. 13; Louis 2009, S. 76f.; Wannewetsch 2010, S. 527; Wiendahl 2019, S. 44).14 | 14 |
| Abbildung 2-3: Klassifikation von Fertigungsarten in Produktionssystemen (i. A. a. Lödning 2016, S. 126)..... | 16 |
| Abbildung 2-4: Unterteilung der Variantenanzahl in einem Produktionssystem | 17 |
| Abbildung 2-5: Vorgehensweisen zur Kalkulation der OEE (in Anlehnung an Focke und Steinbeck 2018, S. 8 ff.; May und Koch 2008, S. 247; Muchiri und Pintelon 2008, S. 3518 ff.) | 20 |
| Abbildung 2-6: Vier-Phasenmodell zum Managen dynamischer Engpässe (vgl. Subramaniyan et al. 2021, S. 742 f.; West, Syberg und Deuse 2022, S. 616 f.) | 30 |
| Abbildung 2-7: Modell zur Bewertung der Datenreife (Eickelmann et al., 2019, S. 30)..... | 33 |
| Abbildung 2-8: CRISP-DM Vorgehensmodell (Chapman et al., 2000, S. 10) | 37 |
| Abbildung 3-1: Steckbrief eines PrEPFlow-Anwendungsfalles (Beispiel Fa. Jung) | 43 |
| Abbildung 3-2: Anforderungen an die Engpassidentifikation und –prognose aus der Praxis (Ergebnisdarstellung der ersten PA-Sitzung)..... | 45 |
| Abbildung 3-3: Bewertung der Engpassidentifikationsverfahren im Rahmen einer NWA | 47 |
| Abbildung 3-4: Definition von Kennzahlen zur Identifikation dynamischer Engpässe | 48 |
| Abbildung 3-5: Definition des Datenschemas für das Identifikationsverfahren APM | 49 |
| Abbildung 3-6: Datenreifegradmodell für die dynamische Engpassprognose (i. A. a. Eickelmann et al. (2019))..... | 50 |
| Abbildung 3-7: Datenerfassungsarchitektur zur Prognose dynamischer Engpässe | 52 |
| Abbildung 3-8: Explorative Vorstudie des Analyse-Datensatzes..... | 53 |
| Abbildung 3-9: Prognoseergebnisse des LSTM-Modells und der zwei Referenzmodelle | 55 |
| Abbildung 3-10: Generalisiertes Vorgehensmodell zur Engpassprognose..... | 56 |
| Abbildung 3-11: Auszug der Engpassmaßnahmen im PrEPFlow-Maßnahmenkatalog (bspw. Leiharbeit) | 60 |
| Abbildung 3-12: Bewertungsmatrix | 61 |
| Abbildung 3-13: Ausschnitt der Datenanalyse im Zuge der Werkzeugeinführung | 64 |
| Abbildung 3-14: Eingegrenzter Use Case und Datenumfang in der Anwendung bei BMW ... | 65 |
| Abbildung 3-15: Umsetzung der IIoT-Architektur im Use Case der Fa. Jung | 67 |
| Abbildung 3-16: Grafana-Dashboards zur Integration der Daten in das SFM der Fa. Jung...68 | 68 |
| Abbildung 3-17: Screening Ergebnisse für die Einführung der Lösungsbausteine im Pilotsystem..... | 72 |
| Abbildung 3-18: Schematisches Layout des Anwendungsfalles automatische Steckdosenmontage und der implementierten Sensorik | 73 |

6. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 3-19: Sammlung von Anforderungen der PA-Unternehmen an das IT-Werkzeug während der zweiten PA-Sitzung..... | 75 |
| Abbildung 3-20: Startbildschirm des IT-Werkzeugs BottleNext (Beispieldatensatz) | 76 |
| Abbildung 3-21: Datenauswahl des IT-Werkzeugs BottleNext (Simulation) | 77 |
| Abbildung 3-22: Datenauswahl des IT-Werkzeugs BottleNext (Eigener Datensatz)..... | 78 |
| Abbildung 3-23: Engpassidentifikation des IT-Werkzeugs BottleNext | 79 |
| Abbildung 3-24: Vergleich der Prognose-Genauigkeit der Engpassprognose mit Benchmarks | 80 |
| Abbildung 3-25: Engpassprognose BottleNext | 81 |
| Abbildung 3-26: Diagnosebereich des BottleNext-Tools (Beispieldatensatz) | 81 |
| Abbildung 3-27: Anforderungsabgleich in der PREPFlow-Toolentwicklung..... | 82 |
| Abbildung 3-28: PrEPFlow-Abschlusstreffen bei der Fa. Jung | 84 |
| Abbildung 4-1: Ergebnisübersichtsdarstellung des PrEPFlow Forschungsvorhabens..... | 85 |
| Abbildung 4-2: Forschungsvorhaben DeDiFlow im Überblick | 88 |
| Abbildung 5-1: Transferkonzept des PrEPFlow-Vorhabens | 90 |
| Abbildung 5-2: Exemplarische Integration der PrEPFlow-Ergebnisse im Beratungsformat ... | 91 |

7. Literaturverzeichnis

- Adhikari, Animesh; Adhikari, Jhimli (2015): *Advances in Knowledge Discovery in Databases*. Cham, CH: Springer International Publishing (Intelligent Systems Reference Library).
- Aiteanu, D.; Hillers, B.; Graser, A.: A step forward in manual welding: demonstration of augmented reality helmet. In: *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings.*: IEEE Comput. Soc, 2003., S. 309–310.
- ALAVIAN, P., P. DENNO und S.M. MEERKOV, 2017. Multi-job production systems: definition, problems, and product-mix performance portrait of serial lines [online]. *International Journal of Production Research*, 55. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207543.2017.1338779
- Alavian, Pooya; Denno, Peter; Meerkov, Semyon M.: Multi-job production systems: definition, problems, and product-mix performance portrait of serial lines. *International Journal of Production Research*, Nr. 24 (2017.), S. 7276–7301.
- Alavian, Pooya; Eun, Yongsoon; Meerkov, Semyon M.; Zhang, Liang: Smart production systems: automating decision-making in the manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, Nr. 3 (2020.), S. 828–845.
- Alkoc, Ediz; Erbatur, Fuat: Productivity improvement in concreting operations through simulation models. *Building Research und Information*, Nr. 2 (1997.), S. 82–91.
- ALLEN, P.G. und R. FILDES, 2001. *Econometric Forecasting*. In: J.S. ARMSTRONG, Hg. *Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners*. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 303–362. ISBN 0-306-47630-4.
- Alloghani, Mohamed; Al-Jumeily, Dhiya; Mustafina, Jamila; Hussain, Abir; Aljaaf, Ahmed (2020): A Systematic Review of Supervised and Unsupervised Machine Learning Algorithms for Data Science. In: Michael W. Berry, Azlinah Mohamed und Bee Wah Yap (Hg.): *Supervised and Unsupervised Learning for Data Science*. Cham: Springer International Publishing (Unsupervised and Semi-Supervised Learning), S. 3–21.
- Alpaydin, Ethem (2019): *Maschinelles Lernen*. 2. Aufl. Berlin, Boston: De Gruyter (De Gruyter Studium).
- Alphonsus, Ephrem Ryan; Abdullah, Mohammad Omar: A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2016.), S. 1185–1205.

7. Literaturverzeichnis

- Anderl, Reiner; Picard, André; Wang, Yübo; Fleischer, Jürgen; Dosch, Steffen; Klee, Benedikt; Bauer, Jörg: Leitfaden Industrie 4.0: Orientierungshilfe zur Einführung in den Mittelstand. Frankfurt am Main, 2015.
- Andersen, Rasmus S.; Bogh, Simon; Moeslund, Thomas B.; Madsen, Ole: Task space HRI for cooperative mobile robots in fit-out operations inside ship superstructures. In: 2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN): IEEE, 2016., S. 880–887.
- Ankele, Alexander; Staiger, Thomas J.; Koch, Thomas: Chefsache Produktionssystem: Pfade zum Erfolg. LOG_X, Stuttgart, 2008.
- Antón-Haro, C.; Dohler, M.: Introduction to machine-to-machine (M2M) communications. In: Antón-Haro, C.; Dohler, M. (Hrsg.): Machine-to-machine (M2M) Communications: Elsevier, 2015., S. 1–23.
- Antonelli, Dario; Astanin, Sergey; Bruno, Giulia: Applicability of Human-Robot Collaboration to Small Batch Production. In: Afsarmanesh, H.; Camarinha-Matos, L. M.; Soares, A. L. (Hrsg.): Collaboration in a Hyperconnected World. Cham: Springer Nature, 2016., S. 24–32.
- ARABNIA, H.R., K. DAIMI, R. STAHLBOCK, C. SOVIANY, L. HEILIG und K. BRÜSSAU, 2020. Principles of Data Science. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-43980-4.
- ARIYO, A.A., A.O. ADEWUMI und C.K. AYO, 2014. Stock Price Prediction Using the ARIMA Model. In: 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation: IEEE, S. 106-112. ISBN 978-1-4799-4922-9.
- ARMSTRONG, J.S., 2001a. Evaluating Forecasting Methods. In: J.S. ARMSTRONG, Hg. Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 443-472. ISBN 0-306-47630-4.
- ARMSTRONG, J.S., 2001b. Extrapolation for Time-Series and Cross-Sectional Data. In: J.S. ARMSTRONG, Hg. Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 219-243. ISBN 0-306-47630-4.
- ARMSTRONG, J.S., 2001c. Standards and Practices for Forecasting. In: J.S. ARMSTRONG, Hg. Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 679-732. ISBN 0-306-47630-4.
- ASKHAM, N., D. COOK, M. DOYLE, H. FEREDAY, M. GIBSON, U. LANDBECK, R. LEE, C. MAYNARD, G. PALMER und J. SCHWARZENBACH, 2013. The Six Primary Dimensions for Data Quality Assessment. Defining Data Quality Dimensions [online]. Briston [Zugriff am: 16. Juli 2022]. Verfügbar unter: <https://docplayer.net/3987248-The-six-primary-dimensions-for-data-quality-assessment.html>
- Azuma, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Nr. 4 (1997.), S. 355–385.

7. Literaturverzeichnis

- Babel, Wolfgang: Felddbusse, Kommunikationsprotokolle, Bedienoberflächen, Hardware ASIC's. In: Babel, W. (Hrsg.): Industrie 4.0, China 2025, IoT: Der Hype um die Welt der Automatisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021., S. 159–349.
- BACHMANN, R., G. KEMPER und T. GERZER, 2014. Big Data - Fluch oder Segen? [online]. s.l.: Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm. mitp Professional. ISBN 978-3-8266-8338-1. Verfügbar unter: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=979090>
- Bahmann, Werner: Werkzeugmaschinen kompakt. 21. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- Bal, Mert; Hashemipour, Majid: Applications of Virtual Reality in Design and Simulation of Holonic Manufacturing Systems: A Demonstration in Die-Casting Industry. In: Marík, V.; Vyatkin, V.; Colombo, A. W. (Hrsg.): Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007., S. 421–432.
- Bandyopadhyay, Debasis; Sen, Jaydip: Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. Wireless Personal Communications, Nr. 1 (2011.), S. 49–69.
- BARRON, A.R., 1994. [Neural Networks: A Review from Statistical Perspective]: Comment [online]. Statistical Science, 9(1), 33-35. ISSN 08834237. Verfügbar unter: <http://www.jstor.org/stable/2246277>
- Bauer, Jürgen: Grundlagen der Produktionslogistik. In: Böge, A.; Böge, W. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021., S. 1701–1708.
- Bauer, Jürgen: Produktionscontrolling und -management mit SAP® ERP. 5. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- Bauernhansl, Thomas; Krüger, Jörg; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther: WGP-Standpunkt Industrie 4.0., 2017.
- Bauernhansl, Thomas: Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017., S. 1–31.
- Becker, Torsten (2008): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- BENGIO, Y., P. SIMARD und P. FRASCONI, 1994. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult [online]. IEEE transactions on neural networks, 5(2), 157-166. ISSN 1045-9227. Verfügbar unter: doi:10.1109/72.279181
- Bergmann, Lars; Lacker, Michael: Denken in Wertschöpfung und Verschwendung. In: Dombrowski, U.; Herrmann, C.; Lacker, T.; Sonnentag, S.

- (Hrsg.): Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen: Ein ganzheitliches Konzept. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009., S. 161–168.
- Betterton, C. E.; Silver, S. J. (2012): Detecting bottlenecks in serial production lines. A focus on interdeparture time variance. In: International Journal of Production Research 50 (15), S. 4158–4174.
 - BETTERTON, C.E. und S.J. SILVER, 2012. Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance [online]. International Journal of Production Research, 50(15), 4158-4174. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207543.2011.596847
 - Bibby, Lee; Dehe, Benjamin: Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defence sector. Production Planning und Control, Nr. 12 (2018.), S. 1030–1043.
 - Bildstein, Andreas; Seidelmann, Joachim: Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014., S. 581–597.
 - Biller, Stephan; Li, Jingshan; Marin, Samuel P.; Meerkov, Semyon M.; Zhang, Liang (2008): Bottlenecks in production lines with rework. A systems approach. In: Proceedings of the 17th World Congress (IFAC, Seoul, Korea) 17 (1), S. 14888–14893.
 - BLACKSTONE, J.H., 2001. Theory of constraints - A status report [online]. International Journal of Production Research, 39(6), 1053-1080. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540010028119
 - Blanco-Novoa, Oscar; Fernandez-Carames, Tiago M.; Fraga-Lamas, Paula; Vilar-Montesinos, Miguel A.: A Practical Evaluation of Commercial Industrial Augmented Reality Systems in an Industry 4.0 Shipyard. IEEE Access, (2018.), S. 8201–8218.
 - Blumenfeld, Dennis E.; Li, Jingshan: An analytical formula for throughput of a production line with identical stations and random failures. Mathematical Problems in Engineering, Nr. 3 (2005.), S. 293–308.
 - BMWi (2015): Industrie 4.0. Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland. Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
 - Bochmann, Lennart Sören: Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für variantenreiche Produkte, Dissertation, ETH Zürich, 2018.
 - Bontempi, Gianluca; Ben Taieb, Souhaib; Le Borgne, Yann-Aël (2013): Machine Learning Strategies for Time Series Forecasting. In: Wil van der Aalst, John Mylopoulos, Michael Rosemann, Michael J. Shaw, Clemens Szyperski, Marie Aude Afaure und Esteban Zimányi (Hg.): Business Intelligence, Bd. 138. Berlin,

Heidelberg: Springer Verlag (Lecture Notes in Business Information Processing), S. 62–77.

- BOX, G.E.P. und G.M. JENKINS, 1970. Time series analysis forecasting and control [online]. San Francisco: Holden-Day. ISBN 0816210942. Verfügbar unter: <http://books.google.com/books?id=qsnaAAAAMAAJ>
- BOX, G.E.P., G.M. JENKINS, G.C. REINSEL und G.M. LJUNG, 2015. Time Series Analysis. Forecasting and Control [online]. 5th ed. Hoboken: Wiley. Wiley Series in Probability and Statistics. ISBN 978-1-118-67491-8. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2064681>
- Box, George E. P.; Jenkins, Gwilym M.; Reinsel, Gregory C. (2008): Time Series Analysis. Forecasting and Control. 4. Aufl.: John Wiley & Sons Inc. Publications.
- BRADLEY, A.P., 1997. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms [online]. Pattern Recognition, 30(7), 1145-1159. ISSN 00313203. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0031-3203(96)00142-2
- Bragância, Sara; Costa, Eric; Castellucci, Ignacio; Arezes, Pedro M.: A Brief Overview of the Use of Collaborative Robots in Industry 4.0: Human Role and Safety. In: Arezes, P. M.; Baptista, J. S.; Barroso, M.; Carneiro, P.; Cordeiro, P.; Costa, N.; Melo, R. B.; Miguel, A. S.; et al. (Hrsg.): Occupational and Environmental Safety and Health. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019., S. 641–650.
- Brecher, Christian; Weck, Manfred: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1. 9. Aufl., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- Brecher, Christian; Weck, Manfred: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3: Mechatronische Systeme, Steuerungstechnik und Automatisierung. 9. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- Brinzer, Boris: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2005.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Machine-to-Machine-Kommunikation-eine Chance für die deutsche Industrie AG2 M2M Initiative Deutschland. Essen, 2012.
- Burggräf, Peter; Schuh, Günther; Dannapfel, Matthias; Potente, Till; Pulz, Christian; Swist, Mateusz; Welter, Tobias; Ebade Esfahani, Matthias: Gestaltung der Produktionssteuerung. In: Burggräf, P.; Schuh, G. (Hrsg.): Handbuch Produktion und Management. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021., S. 365–407.
- CAO, Z., J. DENG, M. LIU und Y. WANG, 2012. Bottleneck Prediction Method Based on Improved Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) in Semiconductor Manufacturing System [online]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 20(6), 1081-1088. ISSN 10049541. Verfügbar unter: doi:10.1016/S1004-9541(12)60590-4

7. Literaturverzeichnis

- Cao, Zhengcai; Deng, Jijie; Liu, Min; Wang, Yongcai (2012): Bottleneck Prediction Method Based on Improved Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS) in Semiconductor Manufacturing System. In: Chinese Journal of Chemical Engineering 20 (6), S. 1081–1088.
- Carmigniani, Julie; Furht, Borko: Augmented Reality: An Overview. In: Furht, B. (Hrsg.): Handbook of Augmented Reality. New York, NY: Springer New York, 2011., S. 3–46.
- Caudell, T.P.; Mizell, D.W.: Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences: IEEE, 1992., S. 659–669.
- CHAPMAN, P., J. CLINTON, R. KERBER, T. KHABAZA, T. REINARTZ, C. SHEARER und R. WIRTH, 2000. CRISP-DM 1.0. Step-by-step data mining guide [online]. SPSS Inc [Zugriff am: 19. August 2022]. Verfügbar unter: <https://docplayer.net/202628-Crisp-dm-1-0-step-by-step-data-mining-guide.html>
- Chapman, Pete; Clinton, Julian; Kerber, Randy; Khabaza, Thomas; Reinartz, Thomas; Shearer, Colin; Wirth, Rüdiger (1999): CRISP-DM 1.0. Step-by-step data mining guide: CRISP-DM Consortium.
- Chatfield, Christopher (1982): Analyse von Zeitreihen. Eine Einführung. München: Carl Hanser Verlag.
- Chavez, Victor; Wollert, Jorg: 10BASE-T1L Industry 4.0 Smart Switch For Field Devices based on IO-Link. In: 2022 IEEE 18th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS): IEEE, 2022., S. 1–4.
- Chen, Qili; Pan, Guangyuan; Qiao, Junfei; Yu, Ming (2019): Research on a Continuous Deep Belief Network for Feature Learning of Time Series Prediction. In: The 31th Chinese Control and Decision Conference (2019 CCDC) (1), S. 5977–5983.
- Cheng, Jiangfeng; Chen, Weihai; Tao, Fei; Lin, Chun-Liang: Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. Journal of Industrial Information Integration, (2018.), S. 10–27.
- Cho, Kyunghyun; van Merriënboer, Bart; Culcehre, Caglar; Bahdanau, Dzmitry; Bougares, Fethi; Schwenk, Holger; Bengio, Yoshua (2014): Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation. In: Computation and Language (1), S. 1–15.
- Chongwatpol, Jongsawas; Sharda, Ramesh: RFID-enabled track and traceability in job-shop scheduling environment. European Journal of Operational Research, Nr. 3 (2013.), S. 453–463.
- CHUNG, J., C. GULCEHRE, K. CHO und Y. BENGIO, 2014. Empirical Evaluation of Gated Recurrent Neural Networks on Sequence Modeling [online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1412.3555v1>

7. Literaturverzeichnis

- Ciortea, E M: Manufacturing analysis with discrete events using IoT platform. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Nr. 1 (2019.), S. 1–6.
- CIRP: Dictionary of Production Engineering III – Manufacturing Systems Wörterbuch der Fertigungstechnik III – Produktionssysteme Dizionario di Ingegneria della Produzione III – Sistemi di produzione. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- Colledani, M.; Ekvall, M.; Lundholm, T.; Moriggi, P.; Polato, A.; Tolio, T.: Analytical methods to support continuous improvements at Scania. International Journal of Production Research, Nr. 7 (2010.), S. 1913–1945.
- Collège International pour l'Etude Scientifique des Techniques de Production Mécanique: Wörterbuch der Fertigungstechnik. 2. Springer, Berlin, 2002.
- CONNOR, J.T., R.D. MARTIN und L.E. ATLAS, 1994. Recurrent neural networks and robust time series prediction [online]. IEEE transactions on neural networks, 5(2), 240-254. ISSN 1045-9227. Verfügbar unter: doi:10.1109/72.279188
- Corsten, Hans; Gössinger, Ralf: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. 14. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2016.
- Cotrino, Alberto; Sebastián, Miguel A.; González-Gaya, Cristina: Industry 4.0 Roadmap: Implementation for Small and Medium-Sized Enterprises. Applied Sciences, Nr. 23 (2020.), S. 1–17.
- Cox, James F.; Spencer, Michael S. (1998): The Constraints Management Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press (The CRC Press Series on Constraints Management, 3).
- Cramer, Erhard; Kamps, Udo (2017): Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- CRONE, S.F., M. HIBON und K. NIKOLOPOULOS, 2011. Advances in forecasting with neural networks? Empirical evidence from the NN3 competition on time series prediction [online]. International Journal of Forecasting, 27(3), 635-660. ISSN 01692070. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijforecast.2011.04.001
- da Silva, Gerson Fabio; de Oliveira Pessoa, Marcosiris Amorim; Miyagi, Paulo Eigi; Barari, Ahmad; Tsuzuki, Marcos Sales Guerra: PLC as the Main Controller for Additive Manufacturing Machines. In: Camarinha-Matos, L. M. (Hrsg.): Technological Innovation for Digitalization and Virtualization. Cham: Springer, 2022, S. 217–224.
- Dallasega, Patrick; Rauch, Erwin; Linder, Christian: Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. Computers in Industry, (2018.), S. 205–225.
- DAMA (2013): The six primary Dimensions for Data Quality Assessment. UK: Data Management Association.

7. Literaturverzeichnis

- Dangelmaier, Wilhelm: Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. 2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- DAVYDENKO, A. und R. FILDES, 2016. Forecast Error Measures: Critical Review and Practical Recommendations.
- DAVYDENKO, A., C. SAI und M. SHCHERBAKOV, 2021. Forecast Evaluation Techniques for I4.0 Systems. In: A.G. KRAVETS, A.A. BOLSHAKOV und M. SHCHERBAKOV, Hg. Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. Cham: Springer International Publishing, S. 79-102. ISBN 978-3-030-66076-5.
- de Ron, A.J.; Rooda, J.E.: Equipment Effectiveness: OEE Revisited. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Nr. 1 (2005.), S. 190–196.
- de Sousa Jabbour, Ana Beatriz Lopes; Jabbour, Charbel Jose Chiappetta; Foropon, Cyril; Godinho Filho, Moacir: When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. Technological Forecasting and Social Change, (2018), S. 18–25.
- DEISTLER, M. und K. NEUSSER, 2005. Prognose uni- und multivariater Zeitreihen. In: P. MERTENS und S. RÄSSLER, Hg. Prognoserechnung. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 239-260. ISBN 3-7908-0216-6.
- DENG, J., Z. CAO und M. LIU, 2014. A bottleneck prediction and rolling horizon scheme combined dynamic scheduling algorithm for semiconductor wafer fabrication. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control: IEEE, S. 58-63. ISBN 978-1-4799-3106-4.
- DEUSE, J., D. LENZE, F. KLENNER und T. FRIEDRICH, 2016. Manufacturing Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Produktionssystemen mit hoher wertschöpfender Variabilität. In: Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO mbH Verlag, 2016. ISBN 9783955451851.
- DEUSE, J., K. WEISNER, A. HENGSTEBECK und F. BUSCH, 2015. Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: A. BOTTHOF und E.A. HARTMANN, Hg. Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 99-109. ISBN 978-3-662-45914-0.
- Deuse, Jochen; Lenze, David; Klenner, Ferdinand; Fiedrich, Tilman (2016): Manufacturing Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Produktionssystemen mit hoher wertschöpfender Variabilität. In: Christoph M. Schlick (Hg.): Megatrend Digitalisierung. Potentiale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO mbH Verlag, S. 11–26.
- Deuse, Jochen; Lenze, David; Klenner, Ferdinand; Friedrich, Tilman: Manufacturing Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Produktionssystemen mit hoher wertschöpfender Variabilität. In: Schlick, C. (Hrsg.): Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Berlin: GITO mbH Verlag, 2016., S. 11–26.

7. Literaturverzeichnis

- Deuse, Jochen; Weisner, Kirsten; Hengstebeck, André; Busch, Felix: Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: Botthoff, A.; Hartmann, E. A. (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015., S. 99–109.
- DEWA, M. und L. CHIDZUU, 2013. MANAGING BOTTLENECKS IN MANUAL AUTOMOBILE ASSEMBLY SYSTEMS USING DISCRETE EVENT SIMULATION [online]. The South African Journal of Industrial Engineering, 24(2), 155. The South African Journal of Industrial Engineering. Verfügbar unter: doi:10.7166/24-2-567
- Dhar, Vasant: Data science and prediction. Communications of the ACM, Nr. 12 (2013.), S. 64–73.
- Die Bundesregierung: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Ingrid Nestle, Tabea Rößner, Dr. Valerie Wilms, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 17/7257 – Energieeffizienz bei Breitbandtechnologien. Drucksache 17/7472, (2011.)
- Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred; Weber, Stefan (2007): Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion. München: Carl Hanser Verlag.
- Dikow, Andreas: Messung und Bewertung der Unternehmensproduktivität in mittelständischen Industrieunternehmen: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen, Dissertation, Universität Rostock, 2006.
- Dimitrokalli, Angeliki; Vosniakos, George-Christopher; Nathanael, Dimitris; Matsas, Elias: On the assessment of human-robot collaboration in mechanical product assembly by use of Virtual Reality. Procedia Manufacturing, (2020.), S. 627–634.
- Ding, Kai; Chan, Felix T.S.; Zhang, Xudong; Zhou, Guanghui; Zhang, Fuqiang: Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors. International Journal of Production Research, Nr. 20 (2019.), S. 6315–6334.
- DÖBEL, I., M. LEIS, M. MOLINA VOGELSANG, J. WELZ, D. NEUSTROEV, H. PETZKA, A. RIEMER, S. PÜPING, A. VOSS und M. WEGELE, 2018. Maschinelles Lernen. Eine Analyse zu Kompetenzen, Forschung und Anwendung [online]. Fraunhofer-Gesellschaft. München [Zugriff am: 30. März 2022]. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-497408.html>
- Dolezalek, Carl Martin; Warnecke, Hans-Jürgen: Planung von Fabrikanlagen. 2. Springer, Berlin, 1981.
- Dombrowski, Uwe; Richter, Thomas; Krenkel, Philipp: Interdependencies of Industrie 4.0 und Lean Production Systems - a use cases analysis - . Procedia Manufacturing, (2017.), S. 1061–1068.

7. Literaturverzeichnis

- Dombrowski, Uwe; Richter, Thomas: Ganzheitliche Produktionssysteme und Industrie 4.0. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 12 (2016.), S. 771–774.
- Draht, Rainer: Industrie 4.0 - eine Einführung. In: Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Agenten im Umfeld von Industrie 4.0. München, 2014., S. 47–56.
- Echtler, Florian; Sturm, Fabian; Kindermann, Kay; Klinker, Gudrun; Stilla, Joachim; Trilk, Jörn; Najafi, Hesam: The Intelligent Welding Gun: Augmented Reality for Experimental Vehicle Construction. In: Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing. London: Springer London, 2004., S. 333–360.
- EICKELMANN, M., M. WIEGAND, J. DEUSE und R. BERNERSTÄTTER, 2019. Bewertungsmodell zur Analyse der Datenreife [online]. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114(1-2), 29-33. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112037
- Eickelmann, Michel; Schallow, Julian; Sousanabady, Reza Jalali; Deuse, Jochen (2015a): Lebenszyklusübergreifende Qualitätsservices. Cloudbasierte Service-Plattform zur intelligenten Prognose qualitätsbestimmender Daten. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (4), S. 2–6.
- Eickelmann, Michel; Wiegand, Mario; Deuse, Jochen; Bernerstätter, Robert (2019): Bewertungsmodell zur Analyse der Datenreife. Herleitung des Reifegrads der Datenqualität für die Anwendung maschineller Lernverfahren in der industriellen Produktion. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (1-2), S. 29–32.
- Eickelmann, Michel; Wiegand, Mario; Konrad, Benedikt; Deuse, Jochen (2015b): Die Bedeutung von Data-Mining im Kontext von Industrie 4.0. In: Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (11), S. 738–743.
- EL HIHI, S. und Y. BENGIO, 1995. Hierarchical Recurrent Neural Networks for Long-Term Dependencies. In: Proceedings of the 8th International Conference on Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA, USA: MIT Press, S. 493-499.
- Elsner, Joachim; Pelousek, Wolfgang: Die Wertschöpfung in der Praxis. In: Kamiske, G. F. (Hrsg.): Rentabel durch TQM: Return on Quality - ROQ. Berlin: Springer, 1996., S. 141–156.
- Elson, Jeremy; Estrin, Deborah: Sensor Networks: A Bridge to the Physical World. In: Wireless Sensor Networks. Boston, MA: Springer US, 2006., S. 3–20.
- EN 13306: Instandhaltung.
- Engelhardt, Philipp Ronald: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, Dissertation, Technische Universität München, 2015.
- Eversheim, Walter: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W.; Schröder, H.-H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.

7. Literaturverzeichnis

- Faget, Patrick; Eriksson, Ulf; Herrmann, Frank (2005): Applying discrete event simulation and an automated bottleneck analysis as an aid to detect running production constraints. In: Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference (1), S. 1401–1407.
- FALKENBERG, G. und M. WEBER, 2014. Big-Data-Technologien - Wissen für Entscheider: Leitfaden [online] [Zugriff am: 25. August 2022]. Verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=1NJgzgEACAAJ>
- FANG, W., Y. GUO, W. LIAO, S. HUANG, N. YANG und J. LIU, 2020. A Parallel Gated Recurrent Units (P-GRUs) network for the shifting lateness bottleneck prediction in make-to-order production system [online]. Computers & Industrial Engineering, 140, 1-33. ISSN 03608352. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cie.2019.106246
- Farooq, Basit; Bao, Jinsong; Li, Jie; Liu, Tianyuan; Yin, Shiyong: Data-Driven Predictive Maintenance Approach for Spinning Cyber-Physical Production System. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), Nr. 4 (2020.), S. 453–462.
- Faust, Peter: Zweite Lean-Welle – die sieben Thesen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 3 (2009.), S. 157–163.
- FAYYAD, U.M., G. PIATETSKY-SHAPIRO und P. SMYTH, 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Mag, 17, 37-54. AI Mag.
- Fayyad, Usama M.; Piatetsky-Shapiro, Gregory; Smyth, Padhraic (1996): From Data Mining to Knowledge Discovery. An Overview. In: Usama M. Fayyad, Gregory Piatetsky-Shapiro, Padhraic Smyth und Ramasamy Uthurusamy (Hg.): Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. Menlo Park, CA: AAAI Press, S. 1–36.
- Feelders, Ad J. (2003): Statistical Concepts. In: Michael Berthold und David J. Hand (Hg.): Intelligent Data Analysis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 17–68.
- Fellner, Dieter: Virtuelle Realität in Medien und Technik: Digitalisierung von Kulturartefakten und industriellen Produktionsprozessen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft: Springer Vieweg, 2018., S. 19–42.
- Feng, Bowen; Liu, Lilan; Wan, Xiang; Huang, Qi: Visual Interaction of Rolling Steel Heating Furnace Based on Augmented Reality. In: Wang, Y.; Martinsen, K.; Yu, T.; Wang, K. (Hrsg.): Advanced Manufacturing and Automation IX. Singapore: Springer Nature Singapore, 2020.a, S. 342–348.
- Feng, Jiqiang; Li, Feipeng; Xu, Chen; Zhong, Ray Y.: Data-Driven Analysis for RFID-Enabled Smart Factory: A Case Study. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Nr. 1 (2020.b), S. 81–88.
- FILDES, R., 1992. The evaluation of extrapolative forecasting methods [online]. International Journal of Forecasting, 8(1), 81-98. ISSN 01692070. Verfügbar unter: doi:10.1016/0169-2070(92)90009-X

7. Literaturverzeichnis

- Finkenzeller, Klaus: RFID-Handbuch Grundlagen und praktische: Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 7. Hanser Verlag, München, 2015.
- FISCHÄDER, H., 2007. Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen [online]. Wiesbaden: DUV. SpringerLink Bücher. ISBN 9783835005396. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz282649468cov.htm>
- Flammini, A.; Sisinni, E.: Wireless Sensor Networking in the Internet of Things and Cloud Computing Era. *Procedia Engineering*, (2014.), S. 672–679.
- Fleischer, Jürgen; Weismann, Udo; Nigggeschmidt, Stephan: Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements. In: 13th CIRP International on Life Cycle Engineering Conference, Towards a Closed Loop Economy, Proceedings. Leuven: WTI, 2006., S. 675–680.
- Focke, Markus; Steinbeck, Jörn: Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management: Definitionen, Vorgehen und Methoden – von manuell bis Industrie 4.0. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- fullfact: Was sind die sechs großen Verluste bei OEE?. <https://fullfact.de/blog/sechs-grossen-verlusteooe/>, 2021, Zugriff am 28. Dezember 2022.
- Gabriel, Roland; Gluchowski, Peter; Pastwa, Alexander (2009): Data Warehouse & Data Mining. Herdecke, Witten: W3L-Verlag (Informatik).
- Gao, Kongjun; He, Yihai; He, Zhenzhen; Gu, Changchao: Reliability-Based Robustness Modeling Approach for Manufacturing System Design Based on Fuzzy Design Axioms. In: Proceedings - 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2015, 2016., S. 619–623.
- GEHR, F. und B. HELLINGRATH, Hg., 2007. Logistik in der Automobilindustrie. Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen ; mit 6 Tabellen. Berlin: Springer. VDI. ISBN 9783540140450.
- Geleç, Erdem; Kern, Manuel; Schneider, Benjamin; Ullrich, André; Vladova, Gergana; Gronau, Norbert; von Lipinski, René; Buße, Dirk; et al.: Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik. In: Weinert, N.; Plank, M.; Ullrich, A. (Hrsg.): Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017., S. 39–120.
- GENT, C.R. und C.P. SHEPPARD, 1992. Special Feature. Predicting time series by a fully connected neural network trained by back propagation [online]. *Computing & Control Engineering Journal*, 3(3), 109. ISSN 09563385. Verfügbar unter: doi:10.1049/cce:19920031
- Gepp, M.; Golzer, P.; Grobholz, B.: Engineer-to-order companies are reserved on adoption of current engineering trends - an empirical study. In: 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM): IEEE, 2015., S. 1525–1530.

7. Literaturverzeichnis

- Gershwin, Stanley B.: The future of manufacturing systems engineering. *International Journal of Production Research*, Nr. 1–2 (2018.), S. 224–237.
- Ghosh, Arup; Wang, Gi-Nam; Lee, Jooyeoun: A novel automata and neural network based fault diagnosis system for PLC controlled manufacturing systems. *Computers und Industrial Engineering*, Nr. 106188 (2020.), S. 1–16.
- Gilchrist, Alasdair: *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Apress, Berkeley, CA, 2016.
- Glaser, Horst; Geiger, Werner; Rohde, Volker: *PPS Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*. Gabler Verlag, Köln, 1992.
- Glass, Rupert; Meissner, Alyssa; Gebauer, Christopher; Stürmer, Sandra; Metternich, Joachim: Identifying the barriers to Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, (2018.), S. 985–988.
- Gobinath, V. M.: An Overview of Industry 4.0 Technologies and Benefits and Challenges That Incurred While Adopting It. In: Arockiarajan, A.; Duraiselvam, M.; Raju, R. (Hrsg.): *Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing*. Singapore: Springer Nature, 2021., S. 1–12.
- Gökalp, Ebru; Gökalp, Mert Onuralp; Eren, P. Erhan: Industry 4.0 revolution in clothing and apparel factories: Apparel 4.0. In: Gülsecen, S.; Reis, Z. A.; Gezer, M. (Hrsg.): *Industry 4.0 from the MIS Perspective*. New York: Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2019., S. 169–184.
- GOLDRATT, E.M. und J. COX, 1984. *The goal. Excellence in manufacturing*. Croton-on-Hudson, N.Y: North River Press. ISBN 0884270602.
- GOLDRATT, E.M. und J. COX, 2004. *The goal. A process of ongoing improvement*. 3., rev. ed., 20. anniversary ed. Great Barrington, Mass.: North River Press. ISBN 978-0-88427-178-9.
- Goldratt, Eliyahu M.; Cox, Jeff F. (1984): *The Goal. Excellence in Manufacturing*. Croton-on-Hudson, NY: North River Press.
- Goldratt, Eliyahu M.; Cox, Jeff: *The goal: A process of ongoing improvement*. 4. North River Press, Great Barrington, 2014.
- Goldratt, Eliyahu M.: Computerized shop floor scheduling. *International Journal of Production Research*, Nr. 3 (1988.), S. 443–455.
- Goldratt, Eliyahu M.: *What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented?*. North River Press, Great Barrington, 1990.
- Gorecky, Dominic; Schmitt, Mathias; Loskyll, Matthias; Zuhlke, Detlef: Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In: *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*: IEEE, 2014., S. 289–294.
- Gorecky, Dominic; Schmitt, Mathias; Loskyll, Matthias: Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014., S. 525–542.
- Grabner, Thomas (2019): *Operations Management. Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

7. Literaturverzeichnis

- Gregg, Lynsey; Tarrier, Nicholas: Virtual reality in mental health. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, Nr. 5 (2007.), S. 343–354.
- Greifeneder, Jürgen; Bödcher, Alexander; Trapp, Markus; Gabel, Oliver; Trapp, Mario: Szenario Human Centered Manufacturing (Man-u-Faktur 2012), 2003.
- Groß, Renata: Schlanke Unikatfertigung: Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production. 1. Gabler, Wiesbaden, 2010.
- Gundogar, Emin; Sari, Murat; Kokcam, Abdullah H. (2016): Dynamic bottleneck elimination in mattress manufacturing line using theory of constraints. In: *Springer Plus* 5 (1), S. 1–15.
- Guo, Daqiang; Zhong, Ray Y.; Ling, Shiquan; Rong, Yiming; Huang, George Q.: A roadmap for Assembly 4.0: self-configuration of fixed-position assembly islands under Graduation Intelligent Manufacturing System. *International Journal of Production Research*, Nr. 15 (2020.), S. 4631–4646.
- Gupta, Ajay; Bhardwaj, Arvind; Kanda, Arun (2010): Fundamental Concepts of Theory of Constraints. An Emerging Philosophy. In: *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering* 4 (10), S. 2089–2095.
- Gustavsson, Sten-Olof: Flexibility and productivity in complex production processes. *International Journal of Production Research*, Nr. 5 (1984.), S. 801–808.
- Gutenberg, Erich (1951): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Die Produktion (Band 1). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft).
- Gutenberg, Erich: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre 1: Die Produktion. 19. Springer, Berlin, 1972.
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid: Simulation in Produktion und Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- Gwon, Seong-hoon; Oh, Seog-Chan; Huang, Ningjian; Hong, Soon-ki: Advanced RFID application for a mixed-product assembly line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 1–4 (2011.), S. 377–386.
- Habenicht, Walter: Produktion, Einflussgrößen der. In: Wittmann, W.; Kern, W.; Köhler, R.; Küpper, H.-U.; von Wysocki, K. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993.
- Haberfellner, Reinhard; de Weck, Olivier; Fricke, Ernst; Vössner, Siegfried: Systems Engineering: Grundlagen und Anwendung. 14. Aufl., Orell Füssli Verlag, Zürich, 2018.
- Hajmir, Fattahtabrizi Mahboobehalsadat; Song, Huaming (2019): Investigation of Bottlenecks in Supply Chain System for Minimizing Total Cost by Integrating Manufacturing Modelling Based on MINLP Approach. In: *Applied Sciences* 9 (6), S. 1185–1202. DOI: 10.3390/app9061185.

7. Literaturverzeichnis

- Haller, Axel: Wertschöpfungsrechnung: Ein Instrument zur Steigerung der Aussagefähigkeit von Unternehmensabschlüssen im internationalen Kontext. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1997.
- HAND, D.J., 2003. Introduction. In: M. BERTHOLD und D.J. HAND, Hg. Intelligent Data Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1-15. ISBN 978-3-540-43060-5.
- Hand, David J. (2003): Introduction. In: Michael Berthold und David J. Hand (Hg.): Intelligent Data Analysis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 1–15.
- Hänisch, Till: Grundlagen Industrie 4.0. In: Andelfinger, V. P.; Hänisch, T. (Hrsg.): Industrie 4.0. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017., S. 9–31.
- HANSEN, K., 2005. Lineare Filter und integrierte autoregressive Prozesse. In: P. MERTENS und S. RÄSSLER, Hg. Prognoserechnung. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 215-238. ISBN 3-7908-0216-6.
- Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert; Friedman, Jerome (2009): The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Hedman, Richard; Subramaniyan, Mukund; Almström, Peter: Analysis of Critical Factors for Automatic Measurement of OEE. Procedia CIRP, (2016.), S. 128–133.
- Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael: Grundlagen Automatisierung: Erfassen - Steuern - Regeln. 3. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- Heynicke, Ralf; Krush, Dmytro; Cammin, Christoph; Scholl, Gerd; Kaercher, Bernd; Ritter, Jochen; Gaggero, Pascal; Rentschler, Markus: IO-Link Wireless enhanced factory automation communication for Industry 4.0 applications. Journal of Sensors and Sensor Systems, Nr. 1 (2018.), S. 131–142.
- Hinckeldeyn, J.; Dekkers, R.; Kreutzfeldt, J: Amalgamating Product Development and Operations under the Umbrella of an Integrated Bottleneck Management. In: 4th Production and Operations Management World Conference. Amsterdam, 2012., S. 1–10.
- Hintsches, André: Dynamische Kapazitätssteuerung bei kundenindividueller Auftragsproduktion in der stahlverarbeitenden Industrie. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- Hippmann, Sophie; Klingner, Raoul; Leis, Miriam: Digitalisierung – Anwendungsfelder und Forschungsziele. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft: Springer Vieweg, 2018., S. 9–18.
- HO, S.L. und M. XIE, 1998. The use of ARIMA models for reliability forecasting and analysis [online]. Computers & Industrial Engineering, 35(1-2), 213-216. ISSN 03608352. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0360-8352(98)00066-7

7. Literaturverzeichnis

- HOCHREITER, S. und J. SCHMIDHUBER, 1997. Long short-term memory [online]. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780. ISSN 0899-7667. Verfügbar unter: doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735
- Hochreiter, Sepp; Schmidhuber, Jürgen (1997): Long Short-Term Memory. In: *Neural Computation* 9 (8), S. 1735–1780.
- Hoekstra, Sjoerd: *Integral Logistic Structures: Developing Customer-oriented Goods Flow*. 1. Industrial Press Inc., New York, 1992.
- HOLLAND, H. und K. SCHARNBACHER, 2015. Zeitreihenanalyse in der Betriebsstatistik. In: H. HOLLAND und K. SCHARNBACHER, Hg. *Statistik im Betrieb*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 137-191. ISBN 978-3-8349-4749-9.
- Hompel, Michael ten; Schmidt, Thorsten; Nagel, Lars (2009): *Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Hopp, Wallace J.; Spearman, Mark L.: *Factory Physics*. 3. McGraw-Hill, Boston, 2008.
- Hopp, Wallace J.; Spearman, Mark. L. (2008): *Factory Physics*. 3. Aufl. Long Grove, IL: Waveland Press Inc.
- HSIAO, Y.-C., Y. LIN und Y.-K. HUANG, 2010. Optimal multi-stage logistic and inventory policies with production bottleneck in a serial supply chain [online]. *International Journal of Production Economics*, 124(2), 408-413. ISSN 09255273. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijpe.2009.12.002
- HSU, D., 2017. Time Series Forecasting Based on Augmented Long Short-Term Memory. *ArXiv*, abs/1707.00666, 1-14. *ArXiv*.
- Hsu, Tse-Chuan; Tsai, Yao-Hong; Chang, Dong-Meau: The Vision-Based Data Reader in IoT System for Smart Factory. *Applied Sciences*, Nr. 13 (2022.), S. 1–17.
- Hu, W.; Schroeder, M.; Starr, A.G.: A knowledge-based real-time diagnostic system for PLC controlled manufacturing systems. In: *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)*: IEEE, 1999., S. 499–504.
- HUANG, B., W. WANG, S. REN, R.Y. ZHONG und J. JIANG, 2019. A proactive task dispatching method based on future bottleneck prediction for the smart factory [online]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(3), 278-293. ISSN 0951-192X. Verfügbar unter: doi:10.1080/0951192X.2019.1571241
- Huang, Binbin; Wang, Wenbo; Ren, Shan; Zhong, Ray Y.; Jiang, Jingchao: A proactive task dispatching method based on future bottleneck prediction for the smart factory. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Nr. 3 (2019.), S. 278–293.

- Huang, George Q.; Zhang, Y.F.; Jiang, P.Y.: RFID-based wireless manufacturing for walking-worker assembly islands with fixed-position layouts. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Nr. 4 (2007.), S. 469–477.
- Huang, George Q.; Zhang, YF; Jiang, PY: RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 7–8 (2008.), S. 752–764.
- Huang, Samuel H; Dismukes, John P; Shi, J; Su, Q I; Razzak, Mousalam A; Bodhale, Rohit; Robinson, und D Eugene; Huangy, Samuel H; et al.: Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis. *International Journal of Production Research*, Nr. 3 (2003.), S. 513–527.
- Husejnagić, Damir; Sluga, Alojzjij: A conceptual framework for a ubiquitous autonomous work system in the Engineer-To-Order environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 9–12 (2015.), S. 1971–1988.
- Huynh, Nathan; Uddin, Majbah; Minh, Chu Cong: Data Analytics for Intermodal Freight Transportation Applications. In: *Data Analytics for Intelligent Transportation Systems*: Elsevier, 2017., S. 241–262.
- HYNDMAN, R.J., 2014. *Forecasting. Principles & Practice*.
- IBIDUNMOYE, O., F. HERNÁNDEZ-RODRIGUEZ und E. ELMROTH, 2015. Performance Anomaly Detection and Bottleneck Identification [online]. *ACM Computing Surveys*, 48(1), 1-35. ISSN 0360-0300. Verfügbar unter: doi:10.1145/2791120
- Ingemansson, Arne; Ylipää, Torbjörn; Bolmsjö, Gunnar S.: Reducing bottlenecks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Nr. 6 (2005.), S. 615–628.
- IoT Analytics (2017): *Predictive Maintenance. Market Report 2017-2022*. Hamburg: IoT Analytics GmbH.
- Jacob, Michael: *Informationsorientiertes Management: Ein Überblick für Studierende und Praktiker*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- JANETZKE, P. und A. LEWANDOWSKI, 2012. Der Beitrag der Künstlichen Intelligenz zur betrieblichen Prognose. In: P. MERTENS und S. RÄSSLER, Hg. *Prognoserechnung*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, S. 341–382. ISBN 978-3-7908-2796-5.
- Javaid, Mohd; Haleem, Abid; Singh, Ravi Pratap; Rab, Shanay; Suman, Rajiv: Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, Nr. 100110 (2021.), S. 1–12.
- Jia, Xiaolin; Feng, Quanyuan; Fan, Taihua; Lei, Quanshui: "RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT)." In: *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*: IEEE, 2012., S. 1282–1285.

7. Literaturverzeichnis

- Johnson, Dick: "RFID tags improve tracking, quality on ford line in Mexico." Control Engineering, (2002).
- JUNG Group: "Das Unternehmen." Verfügbar unter: <https://www.jung-group.com/de-DE/Das-Unternehmen/>, Zugriff am 29. November 2022.
- JUNG Group: "Historie - Fortschritt als Tradition." Verfügbar unter: <https://www.jung-group.com/de-DE/Das-Unternehmen/Historie/>, Zugriff am 29. November 2022.
- JUNG Group: "Karriere." Verfügbar unter: <https://www.jung-group.com/de-DE/Das-Unternehmen/Karriere/>, Zugriff am 25. November 2022.
- Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Frankfurt a. M.: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.
- Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes: "Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0." Berlin, 2013.
- Kahle, Egbert: "Produktion." 4. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Berlin, 2018.
- Kalsoom, Tahera; Ramzan, Naeem; Ahmed, Shehzad; Ur-Rehman, Masood: "Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0." Sensors, Nr. 23 (2020.), S. 6783–6802.
- Kamarul Bahrin, Mohd Aiman; Othman, Mohd Fauzi; Nor Azli, Nor Hayati; Talib, Muhamad Farihin: "INDUSTRY 4.0: A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC." Jurnal Teknologi, Nr. 6–13 (2016.), S. 137–143.
- Kamble, Sachin S.; Gunasekaran, Angappa; Gawankar, Shradha A.: "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives." Process Safety and Environmental Protection, (2018.), S. 408–425.
- KANG, Y. und F. JU, 2017. Identifying Bottlenecks in Serial Production Lines with Geometric Machines: Indicators and Rules [online]. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 13952-13957. ISSN 24058963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.2217
- Karriere Südwestfalen: "ALBRECHT JUNG GMBH & CO. KG." Verfügbar unter: <https://www.karriere-suedwestfalen.de/albrechtjung>, Zugriff am 29. November 2022.
- Kautz, Wolf-Eckhard: "Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme: Konzept zur technisch-ökonomisch begründeten Auswahl." 1. Gabler verlag, Wiesbaden, 1996.
- Key, Alicia; Howe, Bill; Perry, Daniel; Aragon, Cecilia: "VizDeck." In: Proceedings of the 2012 international conference on Management of Data - SIGMOD '12. New York, New York, USA: ACM Press, 2012., S. 681–684.

7. Literaturverzeichnis

- Kiangala, Kahiomba Sonia; Wang, Zenghui: "Initiating predictive maintenance for a conveyor motor in a bottling plant using industry 4.0 concepts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Nr. 9–12 (2018.), S. 3251–3271.
- Kiel, Daniel; Müller, Julian M.; Arnold, Christian; Voigt, Kai-Ingo: "SUSTAINABLE INDUSTRIAL VALUE CREATION: BENEFITS AND CHALLENGES OF INDUSTRY 4.0." *International Journal of Innovation Management*, Nr. 08 (2017.), S. 1740015.
- Kim, Jeong-Du; Choi, In-Hyu: "Development of a tool failure detection system using multi-sensors." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Nr. 8 (1996.), S. 861–870.
- Kirsch, Jürgen: "Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme: Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer." Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009.
- Kitain, Lion: "Digital Twin — The New age of Manufacturing." Verfügbar unter: <https://medium.datadriveninvestor.com/digital-twin-the-new-age-of-manufacturing-d964eeba3313>, 05. November 2018, Zugriff am 27. September 2022.
- Kitchenham, Barbara; Pearl Brereton, O.; Budgen, David; Turner, Mark; Bailey, John; Linkman, Stephen: "Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review." *Information and Software Technology*, Nr. 1 (2009.), S. 7–15.
- KLENNER, F., D. LENZE, S. SCHWARZER, J. DEUSE und T. FRIEDRICH, 2016. Smart Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Flexiblen Fertigungssystemen [online]. *at - Automatisierungstechnik*, 64(7), 540–554. ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2016-0014
- Klenner, Ferdinand; Lenze, David; Schwarzer, Samuel; Deuse, Jochen; Friedrich, Tilman: "Smart Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Flexiblen Fertigungssystemen." *at - Automatisierungstechnik*, Nr. 7 (2016.), S. 540–554.
- Klenner, Ferdinand; Lenze, David; Schwarzer, Samuel; Deuse, Jochen; Friedrich, Tilman (2016): Smart Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Flexiblen Fertigungssystemen. In: *at - Automatisierungstechnik* 64 (7), S. 540–554.
- Klepzig, Heinz-Jürgen: "Lean Management in der Praxis: Kritische Darstellung der Kernelemente und Erfolgsmessung.", 2018.
- Klepzig, Heinz-Jürgen: "Working Capital und Cash Flow." 3. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2014.
- KLETTI, J. und J. SCHUMACHER, 2014. Die perfekte Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-45440-4.

7. Literaturverzeichnis

- Kletti, Jürgen; Deisenroth, Rainer; Diesner, Markus; Kletti, Wolfhard; Lübbert, Jann-Peter; Schumacher, Jochen; Strebelt, Thorsten: "Die Anforderungen an die moderne Produktion." In: Kletti, J. (Hrsg.): MES - Manufacturing Execution System. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015., S. 1–18.
- Kletti, Jürgen: "MES-Manufacturing Execution System." Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- Klevers, Thomas: "Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design: Verschwendung erkennen – Wertschöpfung steigern." 1. mi-Wirtschaftsbuch, München, 2009.
- Konstantinidis, Fotios K.; Kansizoglou, Ioannis; Santavas, Nicholas; Mouroutsos, Spyridon G.; Gasteratos, Antonios: "MARMA: A Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant for Fast-Track Repair Procedures in the Context of Industry 4.0." Machines, Nr. 4 (2020.), S. 88–102.
- Kozjek, Dominik; Vrabič, Rok; Rihtaršič, Borut; Butala, Peter: "Big data analytics for operations management in engineer-to-order manufacturing." Procedia CIRP, (2018.), S. 209–214.
- kpibench: "Verluste bei der Kennzahl OEE." Verfügbar unter: <https://www.kpibench.com/digitalisierung/oe-management/verluste-bei-der-kennzahl-oe/>, Zugriff am 04. November 2022.
- KREIß, J.-P. und G. NEUHAUS, 2006. Einführung in die Zeitreihenanalyse. Mit 8 Tabellen [online]. Berlin: Springer. Statistik und ihre Anwendungen. ISBN 3540256288. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz121580822cov.htm>
- Krichel, Ulrich; Reichel, Falk-Gerald; Neuhaus, Ralf: "Neuorientierung der betrieblichen Organisation auf ein Produktionssystem." In: Neuhaus, R. (Hrsg.): Praxishandbuch Produktionssysteme: Hintergründe, Nutzen, Implementierungsbeispiele und Erfahrungen. München: Hanser, 2015., S. 9–22.
- Kruse, Rudolf; Borgelt, Christian; Braune, Christian; Klawonn, Frank, Moewes, Christian; Steinbrecher, Matthias (2015): Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Krush, Dmytro; Cammin, Christoph; Heynicke, Ralf; Scholl, Gerd: "Standardisierung eines schnellen drahtlosen Sensor/Aktor-Netzwerkes für die Fertigungsautomatisierung." tm - Technisches Messen, Nr. 4 (2016.), S. 201–207.
- Krycha, Klaus-Thomas: "Produktionstypologien." In: Kern, W.; Schröder, H.-H.; Weber, J. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.
- KUAN, C.-M. und T. LIU, 1995. Forecasting exchange rates using feedforward and recurrent neural networks [online]. Journal of Applied Econometrics, 10(4), 347-364. ISSN 08837252. Verfügbar unter: doi:10.1002/jae.3950100403

7. Literaturverzeichnis

- Kunst, Sören: "Konzeption eines Modells zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Virtual-Reality-Systemen in der Digitalen Fabrik", Diplomarbeit, Hochschule Wismar, 2005.
- Kuo, C. T.; Lim, J. T.; Meerkov, S. M. (1996): Bottlenecks in serial production lines. A system-theoretic approach. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2, S. 233–276.
- KUO, C.-T., J.-T. LIM und S.M. MEERKOV, 1996. Bottlenecks in serial production lines: A system-theoretic approach [online]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2(3), 233-276. ISSN 1024-123X. Verfügbar unter: doi:10.1155/S1024123X96000348
- KUSIAK, A., 2020. Convolutional and generative adversarial neural networks in manufacturing [online]. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1594-1604. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207543.2019.1662133
- KÜSTERS, U., 2005. Evaluation, Kombination und Auswahl betriebswirtschaftlicher Prognoseverfahren. In: P. MERTENS und S. RÄSSLER, Hg. *Prognoserechnung*. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 367-404. ISBN 3-7908-0216-6.
- LAI, G., W.-C. CHANG, Y. YANG und H. LIU, 2018. Modeling Long- and Short-Term Temporal Patterns with Deep Neural Networks. In: K. COLLINS-THOMPSON, Q. MEI, B. DAVISON, Y. LIU und E. YILMAZ, Hg. *The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval*. New York, NY, USA: ACM, S. 95-104. ISBN 9781450356572.
- LAI, X., H. SHUI und J. NI, 2018. A Two-Layer Long Short-Term Memory Network for Bottleneck Prediction in Multi-Job Manufacturing Systems. In: *Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems: American Society of Mechanical Engineers*. ISBN 978-0-7918-5137-1.
- Lai, Xingjian; Shui, Huanyi; Ding, Daoxia; Ni, Jun: "Data-driven dynamic bottleneck detection in complex manufacturing systems." *Journal of Manufacturing Systems*, (2021.), S. 662–675.
- Landherr, Martin; Neumann, Michael; Volkmann, Johannes; Westkämper, Engelbert; Bauernhansl, Thomas: "Individuelle Softwareunterstützung für jeden Ingenieur." *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Nr. 9 (2012.), S. 628–631.
- Landscheidt, Steffen; Kans, Mirka: "Evaluating factory of the future principles for the wood products industry: Three case studies." *Procedia Manufacturing*, (2019.), S. 1394–1401.
- Langmann, Reinhard; Stiller, Michael: "The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems." *Applied Sciences*, Nr. 18 (2019.), S. 3815–3834.

7. Literaturverzeichnis

- Lanke, Amol Arun; Hoseinie, Seyed Hadi; Ghodrati, Behzad: Mine production index (MPI)-extension of OEE for bottleneck detection in mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, Nr. 5 (2016.), S. 753–760.
- Laqua, Ingo: Optimierte Wertschöpfung statt Beschäftigung mit sich selbst. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Nr. 11 (2005.), S. 648–651.
- Lasshof, Britta: *Produktivität von Dienstleistungen*. 1. DUV, Wiesbaden, 2006.
- Law, Averill M.; Kelton, W. David (1991): *Simulation Modeling and Analysis*. 2. Aufl. New York, NY: McGraw-Hill Inc.
- Law, Averill M.; McComas, Michael G.: Simulation of manufacturing systems. In: *Proceedings of the 19th conference on Winter simulation - WSC '87*. New York, New York, USA: ACM Press, 1987., S. 631–643.
- LAWRENCE, S.R. und A.H. BUSS, 1994. Shifting Production Bottlenecks: Causes, Cures and Conundrums [online]. *Production and Operations Management*, 3(1), 21-37. *Production and Operations Management*. Verfügbar unter: doi:10.1111/j.1937-5956.1994.tb00107.x
- Lawrence, Stephen R.; Buss, Arnold H. (1994): Shifting Production Bottlenecks: Causes, Cures and Conundrums. In: *Production and Operations Management* 3 (1), S. 21–37.
- Lawrence, Stephen R.; Buss, Arnold H. (1995): Economic analysis of production bottlenecks. In: *Mathematical Problems in Engineering* 1 (4), S. 341–363.
- Lawrence, Stephen R.; Buss, Arnold H.: Shifting Production Bottlenecks: Causes, Cures, And Conundrums. *Production and Operations Management*, Nr. 1 (2009.), S. 21–37.
- LAZZERI, F., 2021. *Machine learning for time series forecasting with Python*. Indianapolis, Indiana: Wiley. ISBN 9781119682363.
- Le, Xuan-Hien; Ho, Hung Viet; Lee, Giha (2019): Application of Gated Recurrent Unit (GRU) Network for Forecasting River Water Levels affected by Tides. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts* (1), S. 673–680.
- Lebanon, Guy; El-Geish, Mohamed: *Visualizing Data in R and Python*. In: Lebanon, G.; El-Geish, M. (Hrsg.): *Computing with Data*. Cham: Springer International Publishing, 2018., S. 277–324.
- Lee, C. K. M.; Cao, Yi; Ng, Kam Hung (2017): Big Data Analytics for Predictive Maintenance Strategies. In: John Wang, Hing Kai Chan, Nachiappan Subramanian und Muhammad Dan-Asabe Abdulrahman (Hg.): *Supply Chain Management in the Big Data Era*, Bd. 17: IGI Global (Advances in Logistics, Operations, and Management Science), S. 50–74.
- Lee, Edward A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*: IEEE, 2008., S. 363–369.
- Lee, Ju Yeon; Yoon, Joo Seong; Kim, Bo-Hyun: A big data analytics platform for smart factories in small and medium-sized manufacturing enterprises: An empirical case study of a die casting factory. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Nr. 10 (2017.), S. 1353–1361.

7. Literaturverzeichnis

- Lee, Norma Angelica Nieto; Moctezuma, Luis E. Gonzalez; Lastra, Jose L. Martinez: Visualization of Information in a Service-Oriented Production Control System. In: IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society: IEEE, 2013., S. 4422–4428.
- Lee, Seungchul; Ni, Jun (2013): Joint decision making for maintenance and production scheduling of production systems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 66 (5-8), S. 1135–1146.
- Lehmann, Siegfried: Beitrag zur Anwendung der Warteschlangentheorie bei Mehrstellenarbeit für eine optimale Produktions- und Fertigungsplanung in Industriebetrieben. Westdt. Verlag, Köln, 1968.
- Leite Junior, Alexandre; Condé Lemos, Gléverson Fabner; Gonzaga Trabasso, Luis: Proposal of a Method for the Implementation of the Industry 4.0 - Aircraft Final Assembly Domain. In: Proceedings of the 10th Aerospace Technology Congress. Stockholm, 2019., S. 199–209.
- LEMESSI, M., S. REHBEIN, G. REHN und T. SCHULZE, 2012. Semi-automatic simulation-based bottleneck detection approach. In: Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC): IEEE, S. 1-12. ISBN 978-1-4673-4782-2.
- LEWIS, C., 1997. Demand Forecasting and Inventory Control. Abington: Woodhead Publishing Ltd. ISBN 1855732416.
- LI, J., D. E. BLUMENFELD, N. HUANG und J. M. ALDEN, 2009. Throughput analysis of production systems: recent advances and future topics [online]. International Journal of Production Research, 47(14), 3823-3851. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540701829752
- Li, Jingshan; E. Blumenfeld, Dennis; Huang, Ningjian; M. Alden, Jeffrey: Throughput analysis of production systems: recent advances and future topics. International Journal of Production Research, Nr. 14 (2009.), S. 3823–3851.
- LI, L. und J. NI, 2009. Short-term decision support system for maintenance task prioritization [online]. International Journal of Production Economics, 121(1), 195-202. ISSN 09255273. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijpe.2009.05.006
- LI, L., Q. CHANG und J. NI, 2009. Data driven bottleneck detection of manufacturing systems [online]. International Journal of Production Research, 47(18), 5019-5036. ISSN 0020-7543. Verfügbar unter: doi:10.1080/00207540701881860
- LI, L., Q. CHANG, G. XIAO und S. AMBANI, 2011. Throughput Bottleneck Prediction of Manufacturing Systems Using Time Series Analysis [online]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 133(2). ISSN 1087-1357. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.4003786
- Li, Lin (2009): Bottleneck detection of complex manufacturing systems using a data-driven method. In: International Journal of Production Research 47 (24), S. 6929–6940.
- Li, Lin; Chang, Qing; Ni, Jun (2009): Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. In: International Journal of Production Research 47 (18), S. 5019–5036.

7. Literaturverzeichnis

- Li, Lin; Chang, Qing; Ni, Jun: Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, Nr. 18 (2009.), S. 5019–5036.
- Li, Lin; Chang, Qing; Xiao, Guoxian; Ambani, Saumil (2011): Throughput Bottleneck Prediction of Manufacturing Systems Using Time Series Analysis. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 133 (2), S. 653–661.
- Li, Lin; Chang, Qing; Xiao, Guoxian; Ambani, Saumil: Throughput Bottleneck Prediction of Manufacturing Systems Using Time Series Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Nr. 2 (2011.), S. 1–8.
- Li, Lin: A systematic-theoretic analysis of data-driven throughput bottleneck detection of production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, (2018.), S. 43–52.
- Li, Mingxing; Huang, George Q.: Production-intralogistics synchronization of industry 4.0 flexible assembly lines under graduation intelligent manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, (2021.), S. 1–15.
- Li, Wen; Kara, Sami: Methodology for Monitoring Manufacturing Environment by Using Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT). *Procedia CIRP*, (2017.), S. 323–328.
- Li, Xiaomin; Li, Di; Wan, Jiafu; Vasilakos, Athanasios v.; Lai, Chin-Feng; Wang, Shiyong: A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, Nr. 1 (2017.), S. 23–41.
- Li, Xixing; Du, Baigang; Li, Yibing; Zhuang, Kejia: RFID-based tracking and monitoring approach of real-time data in production workshop. *Assembly Automation*, Nr. 4 (2019.), S. 648–663.
- Li, Zhaojia; Zhang, Hao; Lu, Jianfeng; Xia, Luyao: Research on Augmented Reality Assisted Material Delivery System in Digital Workshop. In: Huang, D.-S.; Jo, K.-H.; Jing, J.; Premaratne, P.; Bevilacqua, V.; Hussain, A. (Hrsg.): *Intelligent Computing Theories and Application*. Xi'an: Springer, 2022., S. 685–698.
- Liberati, Alessandro; Altman, Douglas G.; Tetzlaff, Jennifer; Mulrow, Cynthia; Gøtzsche, Peter C.; Ioannidis, John P.A.; Clarke, Mike; Devereaux, P.J.; et al.: The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, Nr. 10 (2009.), S. e1–e34.
- Lichtblau, Karl; Schleiermacher, Thomas; Goecke, Henry; Schützdeller, Peter (2018): *Digitalisierung der KMU in Deutschland. Konzeption und empirische Befunde*. Köln: IW Consults.
- Liker, Jeffrey K.: *Der Toyota-Weg: 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*. 9. FBV, München, 2014.
- LIMA, E., L. CHWIF und M.R.P. BARRETO, 2008. Methodology for selecting the best suitable bottleneck detection method. In: *2008 Winter Simulation Conference: IEEE*, S. 1746-1751. ISBN 978-1-4244-2707-9.

7. Literaturverzeichnis

- Lin, Chun-Cheng; Deng, Der-Jiunn; Chen, Zheng-Yu; Chen, Kwang-Cheng: Key design of driving industry 4.0: joint energy-efficient deployment and scheduling in group-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, Nr. 10 (2016.), S. 46–52.
- Liu, C. M.; Lin, C. L. (1994): Performance evaluation of unbalanced serial production lines. In: *International Journal of Production Research* 32 (12), S. 2897–2914.
- LIU, M., 2009. Dynamic Prediction Method of Production Logistics Bottleneck Based on Bottleneck Index [online]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 22(05), 710. ISSN 1000-9345. Verfügbar unter: doi:10.3901/CJME.2009.05.710
- Liu, X.; Tu, Y. L.: Capacitated production planning with outsourcing in an OKP company. *International Journal of Production Research*, Nr. 20 (2008.), S. 5781–5795.
- Ljungberg, Örjan: Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. *International Journal of Operations und Production Management*, Nr. 5 (1998.), S. 495–507.
- Lorenz, Rafael; Senoner, Julian; Sihn, Wilfried; Netland, Torbjørn: Using process mining to improve productivity in make-to-stock manufacturing. *International Journal of Production Research*, Nr. 16 (2021.), S. 4869–4880.
- Louis, Philipp: *Manufacturing Execution Systems: Grundlagen und Auswahl*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009.
- Lu Tan; Neng Wang: Future internet: The Internet of Things. In: 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE): IEEE, 2010., S. 376–380.
- Lu, Yang: Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, (2017.), S. 1–40.
- Lucas-Estan, M. Carmen; Coll-Perales, Baldomero; Gozalvez, Javier: Redundancy and Diversity in Wireless Networks to Support Mobile Industrial Applications in Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Nr. 1 (2021.), S. 311–320.
- Luo, Hao; Chen, Jian; Huang, George. Q.: IoT Enabled Production-Logistic Synchronization in Make-to-Order Industry. In: Qi, E.; Shen, J.; Dou, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2015*. Paris: Atlantis Press, 2016., S. 527–538.
- Luthra, Sunil; Mangla, Sachin Kumar: Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, (2018.), S. 168–179.
- Mahmoodpour, Mehdi; Lobov, Andrei; Lanz, Minna; Makela, Petteri; Rundas, Niko: Role-based visualization of industrial IoT-based systems. In: 2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA): IEEE, 2018., S. 1–8.

7. Literaturverzeichnis

- MAKRIDAKIS, S., E. SPILIOTIS und V. ASSIMAKOPOULOS, 2020. The M4 Competition: 100,000 time series and 61 forecasting methods [online]. *International Journal of Forecasting*, 36(1), 54-74. ISSN 01692070. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijforecast.2019.04.014
- MAKRIDAKIS, S.G., S.C. WHEELWRIGHT und R.J. HYNDMAN, 1998. *Forecasting. Methods and applications*. 3. ed. New York, NY: Wiley. ISBN 0471532339.
- Makridakis, Spyros; Spiliotis, Evangelos; Assimakopoulos, Vassilios (2018): Statistical and Machine Learning forecasting methods. Concerns and ways forward. In: *PloS one* 13 (3), 1-26.
- Makris, Sotiris; Karagiannis, Panagiotis; Koukas, Spyridon; Matthaikis, Aleksandros-Stereos: Augmented reality system for operator support in human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, Nr. 1 (2016.), S. 61–64.
- Masao Sugi; Ippei Matsumura; Yusuke Tamura; Jun Ota; Tamio Arai: Quantitative evaluation of physical assembly support in human supporting production system „attentive workbench“. In: 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE, 2008., S. 3624–3629.
- Mattern, Friedemann: Die technische Basis für das Internet der Dinge. In: Fleisch, E.; Mattern, F. (Hrsg.): *Das Internet der Dinge: Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005., S. 39–66.
- Matyi, Henriett; Veres, Peter; Banyai, Tamas; Demin, Vasily; Tamas, Peter: DIGITALIZATION IN INDUSTRY 4.0: THE ROLE OF MOBILE DEVICES. *Journal of Production Engineering*, Nr. 1 (2020.), S. 75–78.
- May, Constantin; Koch, Arno: Overall Equipment Effectiveness (OEE): Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. *Zeitschrift der Unternehmensberatung*, Nr. 6 (2008.), S. 245–250.
- MAYER, G., C. PÖGE, S. SPIECKERMANN und S. WENZEL, 2020. *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-59387-5.
- McCloy, R.; Stone, R.: Science, medicine, and the future: Virtual reality in surgery. *BMJ*, Nr. 7318 (2001.), S. 912–915.
- Mell, Peter; Grance, Timothy: *The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Special Publication 800-145*, (2011.)
- Meng, Fanjun; Dashun, Zhang; Wang, Jing; Miao, Liqin; Li, Xueguang; Hu, Huizhong: Simulation Verification of Parts Processing Based on Virtual Numerical Control Machine. In: 2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation Science (ICMEAS): IEEE, 2021., S. 63–67.
- Miguel, Sofía Estellés; Ribera, Teresa Barbera; Albarracín Guillem, José Miguel; Dema Pérez, Carlos Manuel (2010): Revision to Theory of Constraints. In: 9th International Conference on Balanced Automation Systems for Future Manufacturing Networks (Valencia, Spain), S. 192–201.

7. Literaturverzeichnis

- Milling, Peter: Produktion, Automatisierung der. In: Wittmann, W.; Kern, W.; Köhler, R.; Küpper, H.-U.; von Wysocki, K. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1993.
- Mittermair, Markus: Industry 4.0 Initiatives. *Surface Mount Technology*, Nr. 3 (2015.), S. 58–61.
- Moens, Pieter; Bracke, Vincent; Soete, Colin; vanden Haute, Sander; Nieves Avendano, Diego; Ooijevaar, Ted; Devos, Steven; Volckaert, Bruno; et al.: Scalable Fleet Monitoring and Visualization for Smart Machine Maintenance and Industrial IoT Applications. *Sensors*, Nr. 15 (2020.), S. 1–15.
- Moeuf, Alexandre; Pellerin, Robert; Lamouri, Samir; Tamayo-Giraldo, Simon; Barbaray, Rodolphe: The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, Nr. 3 (2018.), S. 1118–1136.
- Moher, David; Liberati, Alessandro; Tetzlaff, Jennifer; Altman, Douglas G.: Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, Nr. 5 (2010.), S. 336–341.
- Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; et al.: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, Nr. 2 (2016.), S. 621–641.
- Moreno, Aitor; Velez, Gorka; Ardanza, Aitor; Barandiaran, Iñigo; de Infante, Álvaro Ruíz; Chopitea, Raúl: Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Nr. 2 (2017.), S. 365–373.
- Morioka, M.; Sakakibara, S.: A new cell production assembly system with human–robot cooperation. *CIRP Annals*, Nr. 1 (2010.), S. 9–12.
- Moser, Thomas; Klotz, Anita; Felberbauer, Thomas; Moser, Mario: Industrie 4.0 – Konsequenzen für das Produktionsmanagement. In: Koether, R.; Meier, K.-J. (Hrsg.): *Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020., S. 69–87.
- Moss, H. K.; Yu, Wen Bin (1999): Towards the Estimation of Bottleneck Shiftiness in a Manufacturing Operation. In: *Production and Inventory Management Journal* 40 (2), S. 53–58.
- Moss, Hollye K.; Wen, Bin Yu: Toward the estimation of bottleneck shiftiness in a manufacturing operation. *Production and Inventory Management Journal*, Nr. 2 (1999.), S. 53–58.
- Muchiri, P; Pintelon, L: Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, Nr. 13 (2008.), S. 3517–3535.
- Muthiah, K. M. N.; Huang, S. H. (2007): Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection. In: *International Journal of Production Research* 45 (20), S. 4753–4769.
- Nakajima, Seiichi: *Management der Produktionseinrichtungen (Total Productive Maintenance)*. Campus-Verlag, Frankfurt, New York, 1995.

7. Literaturverzeichnis

- Naumann, Martin; Dietz, Thomas; Kuss, Alexander: Mensch-Maschine-Interaktion. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017., S. 203–217.
- Nebl, Theodor: Produktivitätsmanagement: Theoretische Grundlagen, methodische Instrumentarien, Analyseergebnisse und Praxiserfahrungen zur Produktivitätssteigerung in produzierenden Unternehmen. Hanser, München, 2002.
- Nee, A.Y.C.; Ong, S.K.; Chryssolouris, G.; Mourtzis, D.: Augmented reality applications in design and manufacturing. CIRP Annals, Nr. 2 (2012.), S. 657–679.
- Nee, A.Y.C.; Ong, S.K.: Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing. IFAC Proceedings Volumes, Nr. 9 (2013.), S. 15–26.
- Neuhaus, Ralf: Produktionssysteme: Aufbau - Umsetzung Missverständnisse. In: Diederich, P. (Hrsg.): Produktionssysteme: Aufbau - Umsetzung - betriebliche Lösungen. Köln: Wirtschaftsverl. Bachem, 2008., S. 12–36.
- Nicholas, John: Lean production for competitive advantage: A comprehensive guide to lean methods and management practices. CRC Press, Boca Raton, 2018.
- NIELSEN, A., 2020. Practical time series analysis. Prediction with statistics and machine learning. First edition. Beijing: O'Reilly. ISBN 1492041653.
- Nilsen, Samuel; Nyberg, Nils: The adoption of Industry 4.0- technologies in manufacturing – a multiple case study, Master Thesis, KTH Kungliga Tekniska högskolan, 2016.
- Nimbalkar, Sachin; Supekar, Sarang D.; Meadows, Will; Wenning, Thomas; Guo, Wei; Cresko, Joseph: Enhancing operational performance and productivity benefits in breweries through smart manufacturing technologies. Journal of Advanced Manufacturing and Processing, Nr. 4 (2020.), S. 1–12.
- Nyhuis, Friedhelm; Pereira Filho, Néocles Alves: Methods and tools for dynamic capacity planning and control. Gestão und Produção, Nr. 3 (2002.), S. 245–260.
- Ohno, Taiichi: Das Toyota-Produktionssystem. 3. Campus Frankfurt / New York, Frankfurt am Main, 2013.
- Olle, Werner; Clauß, Dietke: Industrie 4.0 braucht den Mittelstand. Chemnitz, 2015.
- Olwal, Alex; Gustafsson, Jonny; Lindfors, Christoffer: Spatial augmented reality on industrial CNC-machines. In: McDowall, I. E.; Dolinsky, M. (Hrsg.): The Engineering Reality of Virtual Reality 2008: SPIE, 2008., S. 1–9.
- Ong, S. K.; Yuan, M. L.; Nee, A. Y. C.: Augmented reality applications in manufacturing: a survey. International Journal of Production Research, Nr. 10 (2008.), S. 2707–2742.

7. Literaturverzeichnis

- Orellana, Felipe; Torres, Romina: From legacy-based factories to smart factories level 2 according to the industry 4.0. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Nr. 4–5 (2019.), S. 441–451.
- Ortmann, Günther: *Formen der Produktion: Organisation und Rekursivität*. Westdt. Verlag, Opladen, 1995.
- Oztemel, Ercan; Gursev, Samet: Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Nr. 1 (2020.), S. 127–182.
- Pan, Zhigeng; Cheok, Adrian David; Yang, Hongwei; Zhu, Jiejie; Shi, Jiaoying: Virtual reality and mixed reality for virtual learning environments. *Computers und Graphics*, Nr. 1 (2006.), S. 20–28.
- PANDIT, S.M. und S.-M. WU, 1983. *Time series and system analysis with applications*. New York: Wiley. ISBN 0471868868.
- PARMEZAN, A.R.S., V.M. SOUZA und G.E. BATISTA, 2019. Evaluation of statistical and machine learning models for time series prediction: Identifying the state-of-the-art and the best conditions for the use of each model [online]. *Information Sciences*, 484, 302-337. ISSN 00200255. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ins.2019.01.076
- Pasi, Bhaveshkumar N.; Mahajan, Subhash K.; Rane, Santosh B.: Redesigning of Smart Manufacturing System based on IoT: Perspective of Disruptive Innovations of Industry 4.0 Paradigm. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Nr. 5 (2020.), S. 5533–5542.
- Patange, Abhishek D.; Jegadeeshwaran, R: Application of Bayesian Family Classifiers for Cutting Tool Inserts Health Monitoring on CNC Milling. *International Journal of Prognostics and Health Management*, Nr. 2 (2021.), S. 1–13.
- Patzak, Gerold: *Systemtechnik: Planung komplexer innovativer Systeme ; Grundlagen, Methoden, Techniken*. Springer, Berlin, 1982.
- Pehrsson, Leif; Ng, Amos H.C.; Bernedixen, Jacob: Automatic identification of constraints and improvement actions in production systems using multi-objective optimization and post-optimality analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, (2016.), S. 24–37.
- Pereira, A.C.; Romero, F.: A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, (2017.), S. 1206–1214.
- Peron, Mirco; Alfnes, Erlend; Sgarbossa, Fabio: Best Practices of Just-in-Time 4.0: Multi Case Study Analysis. In: Wang, Y.; Martinsen, K.; Yu, T.; Wang, K. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Automation X*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021., S. 636–643.
- Pessl, Ernst: Roadmap Industry 4.0 – Implementation Guideline for Enterprises. *International Journal of Science, Technology and Society*, Nr. 6 (2017.), S. 193–202.
- PHAM, D.T. und A.A. AFIFY, 2005. Machine-learning techniques and their applications in manufacturing [online]. *Proceedings of the Institution of*

7. Literaturverzeichnis

Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 219(5), 395-412. ISSN 0954-4054. Verfügbar unter: doi:10.1243/095440505X32274

- Pires, Flavia; Cachada, Ana; Barbosa, Jose; Moreira, Antonio Paulo; Leitao, Paulo: Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. In: 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): IEEE, 2019., S. 721–726.
- Plank, Martin; Königer, Johanna; Dümmler, Mathias; Weinert, Nils; Mose, Christian: Anwendungsbeispiele. In: Weinert, N.; Plank, M.; Ullrich, A. (Hrsg.): Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik: Ergebnisse des Verbundforschungsprojekts MetamoFAB. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017., S. 161–209.
- Plass, Christoph: Industrie 4.0 als Chance begreifen. Berlin, 2015.
- Pournader, Mehrdokht; Shi, Yangyan; Seuring, Stefan; Koh, S.C. Lenny: Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature. International Journal of Production Research, Nr. 7 (2020.), S. 2063–2081.
- Pramanik, Pijush Kanti Dutta; Mukherjee, Bulbul; Pal, Saurabh; Upadhyaya, Bijoy Kumar; Dutta, Shubhendu: Ubiquitous Manufacturing in the Age of Industry 4.0: A State-of-the-Art Primer. (2020.), S. 73–112.
- Prasetyo, Yogi Tri; Veroya, Felix Concepcion: An Application of Overall Equipment Effectiveness (OEE) for Minimizing the Bottleneck Process in Semiconductor Industry. In: 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA): IEEE, 2020., S. 345–349.
- Qiang, Min; Yu-feng, Ding; Ting, Xiao; Shun-li, Wang: Research of Visualization Monitoring Technology Based on Internet of Things in Discrete Manufacturing Process. In: 2015 2nd International Symposium on Dependable Computing and Internet of Things (DCIT): IEEE, 2015., S. 128–133.
- RAHMAN, S., 1998. Theory of constraints [online]. International Journal of Operations & Production Management, 18(4), 336-355. ISSN 0144-3577. Verfügbar unter: doi:10.1108/01443579810199720
- Rahman, Shams (1998): Theory of Constraints. A Review of Its Philosophy and Its Applications. In: International Journal of Operations and Production Management) 18 (4), S. 336–355.
- Rahman, Shams-ur: Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications. International Journal of Operations und Production Management, Nr. 4 (1998.), S. 336–355.
- Rajkumar, Ragunathan (Raj); Lee, Insup; Sha, Lui; Stankovic, John: Cyber-physical systems. In: Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10. New York, New York, USA: ACM Press, 2010., S. 731–736.
- REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION, 1991. Grundlagen der Arbeitsgestaltung. München: Hanser. Methodenlehre der Betriebsorganisation. ISBN 3446163719.

7. Literaturverzeichnis

- Reim, Jürgen: Erfolgsrechnung - Wertsteigerung durch Wertschöpfung. 2. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022.
- Reinhart, Gunther; Zühlke, Detlef: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser, 2017., S. XXXI–XL.
- REMUS, W. und M. O'CONNOR, 2001. Neural networks for time-series forecasting. In: J.S. ARMSTRONG, Hg. Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 245-256. ISBN 0-306-47630-4.
- RENCHER, A.C. und G.B. SCHAALJE, 2008. Linear models in statistics [online]. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-75498-5. Verfügbar unter: [Link](#)
- Repschläger, Jonas; Pannicke, Danny; Zarnekow, Rüdiger: Cloud Computing: Definitionen, Geschäftsmodelle und Entwicklungspotenziale. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, Nr. 5 (2010.), S. 6–15.
- Richter, Alexander; Heinrich, Peter; Stocker, Alexander; Steinhüser, Melanie: Die neue Rolle des Mitarbeiters in der digitalen Fabrik der Zukunft. In: Reinheimer, S. (Hrsg.): Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017., S. 117–131.
- ROMESER, C. und C. ROSER, 2016. Direction of the Bottleneck in Dependence on Inventory Levels. In: I. NÄÄS, O. VENDRAMETTO, J. MENDES REIS, R.F. GONÇALVES, M.T. SILVA, G. von CIEMINSKI und D. KIRITSIS, Hg. Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World. Cham: Springer International Publishing, S. 667-674. ISBN 978-3-319-51132-0.
- ROSCHMANN, K., 1991. Betriebsdatenerfassung. In: U.W. GEITNER, Hg. CIM-Handbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 89-102. ISBN 978-3-528-04522-7.
- ROSER, C. und M. NAKANO, 2015. A Quantitative Comparison of Bottleneck Detection Methods in Manufacturing Systems with Particular Consideration for Shifting Bottlenecks. In: S. UMEDA, M. NAKANO, H. MIZUYAMA, H. HIBINO, D. KIRITSIS und G. von CIEMINSKI, Hg. Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. Cham: Springer International Publishing, S. 273-281. ISBN 978-3-319-22758-0.
- ROSER, C., K. LORENTZEN und J. DEUSE, 2014. Reliable Shop Floor Bottleneck Detection for Flow Lines through Process and Inventory Observations [online]. Procedia CIRP, 19, 63-68. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2014.05.020
- ROSER, C., K. LORENTZEN, D. LENZE, J. DEUSE, F. KLENNER, R. RICHTER, J. SCHMITT und P. WILLATS, 2017. Bottleneck Prediction Using the Active Period Method in Combination with Buffer Inventories. In: H. LÖDDING, R. RIEDEL, K.-D. THOBEN, G. von CIEMINSKI und D. KIRITSIS, Hg. Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable

7. Literaturverzeichnis

- Manufacturing. Cham: Springer International Publishing, S. 374-381. ISBN 978-3-319-66925-0.
- ROSER, C., M. NAKANO und M. TANAKA, 2001. A practical bottleneck detection method. In: Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (Cat. No.01CH37304): IEEE, S. 949-953. ISBN 0-7803-7307-3.
 - ROSER, C., M. NAKANO und M. TANAKA, 2002. Shifting bottleneck detection. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference: IEEE, S. 1079-1086. ISBN 0-7803-7614-5.
 - Roser, C.; Lorentzen, K.; Deuse, J.: Reliable Shop Floor Bottleneck Detection for Flow Lines through Process and Inventory Observations. *Procedia CIRP*, (2014.), S. 63–68.
 - Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: Shifting bottleneck detection. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference: IEEE, 2002.*, S. 1079–1086.
 - Roser, Christoph; Lorentzen, Kai; Deuse, Jochen (2014): Reliable Shop Floor Bottleneck Detection for Flow Lines through Process and Inventory Observations. In: *Procedia CIRP* 19 (1), S. 63–68.
 - Roser, Christoph; Lorentzen, Kai; Lenze, David; Deuse, Jochen; Klenner, Ferdinand; Richter, Ralph et al. (2017): Bottleneck Prediction Using the Active Period Method in Combination with Buffer Inventories. In: Hermann Lödding, Ralph Riedel, Klaus-Dieter Thoben, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, Bd. 514. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 374–381.
 - Roser, Christoph; Nakano, Masaru (2015): A quantitative comparison of bottleneck detection methods in manufacturing systems with particular consideration for shifting bottlenecks. In: *Advances in Production Management Systems (APMS): Innovative Production Management Towards Sustainable Growth* (1), S. 273–281.
 - Roser, Christoph; Nakano, Masaru; Tanaka, Minoru (2001): A practical bottleneck detection method. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, S. 949–953.
 - Roser, Christoph; Nakano, Masaru; Tanaka, Minoru (2003): Shifting Bottleneck Detection. In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference* (1), S. 1079–1086.
 - Roth, Armin; Siepmann, David: Industrie 4.0 – Ausblick. In: Roth, A. (Hrsg.): *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016., S. 247–260.
 - Ruiz-Sarmiento, Jose-Raul; Monroy, Javier; Moreno, Francisco-Angel; Galindo, Cipriano; Bonelo, Jose-Maria; Gonzalez-Jimenez, Javier: A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (2020.), S. 1–15.
 - RUMELHART, D.E., G.E. HINTON und R.J. WILLIAMS, 1986. Learning representations by back-propagating errors [online]. *Nature*, 323(6088), 533-536. ISSN 0028-0836. Verfügbar unter: doi:10.1038/323533a0

7. Literaturverzeichnis

- RUNKLER, T.A., 2010. Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse ; mit 7 Tabellen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. Studium. ISBN 978-3-8348-0858-5.
- Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2012): Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3. Aufl. München: Pearson Studium.
- Rüßmann, Michael; Lorenz, Markus; Gerbert, Philipp; Waldner, Manuela; Engel, Pascal; Harnisch, Michael; Justus, Jan: Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.
(https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries, 09. April 2015, Zugriff am 29. September 2022).
- SAGHEER, A. und M. KOTB, 2019. Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks [online]. Neurocomputing, 323, 203-213. ISSN 09252312. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.neucom.2018.09.082
- Salehinejad, Hojjat; Sankar, Sharan; Barfett, Joseph; Colak, Errol; Valaee, Shahrokh (2018): Recent Advances in Recurrent Neural Networks. In: Neural and Evolutionary Computing.
- Salkin, Ceren; Oner, Mahir; Ustundag, Alp; Cevikcan, Emre: A Conceptual Framework for Industry 4.0. In: Ustundag, A.; Cevikcan, E. (Hrsg.): Ustundag, Alp; Cevikcan, Emre, Cham, Switzerland: Springer Cham, 2018., S. 3–23.
- Sanchez-Iborra, Ramon; Cano, Maria-Dolores: State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. Sensors, Nr. 5 (2016.), S. 708–721.
- SANDERS, N.R. und L.P. RITZMAN, 2001. Judgmental Adjustment of Statistical Forecasts. In: J.S. ARM-STRONG, Hg. Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Boston, MA: Kluwer Academic, S. 405-416. ISBN 0-306-47630-4.
- Sari, Alparslan; Lekidis, Alexios; Butun, Ismail: Industrial Networks and IIoT: Now and Future Trends. In: Butun, I. (Hrsg.): Industrial IoT. Cham: Springer International Publishing, 2020., S. 3–55.
- Schäfer, Erich: Der Industriebetrieb: Betriebswirtschaftslehre der Industrie auf typologischer Grundlage. Westdt. Verlag, Köln, 1969.
- Schamari, Uwe: Datenerfassung in der Produktion: Automatisierte Fertigung profitiert von RFID-Entwicklungen.
(<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/elektronik/automatisierte-fertigung-profitiert-rfid-entwicklungen/>, 12. April 2012, Zugriff am 20. September 2022).
- Schart, Dirk; Tschanz, Nathaly: Praxishandbuch Augmented Reality für Marketing, Medien und Public Relations. UVK Verlagsgesellschaft, Konstanz, München, 2015.
- Schebek, Liselotte: Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. (2017.)

7. Literaturverzeichnis

- Schittenhelm, Roman; Glöckle, Volker: Prozessoptimierung in der Intralogistik mittels RFID., 2014.
- SCHLICK, C., R. BRUDER und H. LUCZAK, 2018. Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-56036-5.
- Schließmann, Alexander: iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory1. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017., S. 173–202.
- SCHMENNER, R.W., 2015. The Pursuit of Productivity [online]. Production and Operations Management, 24(2), 341-350. ISSN 10591478. Verfügbar unter: doi:10.1111/poms.12230
- Scholz-Reiter, Bernd; Windt, Katja; Liu, Huaxin (2010): Modelling Dynamic Bottlenecks in Production Networks. In: Proceedings of the 6th CRIP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology, S. 1445–1463.
- Scholz, Dirk; Rokitta, Olaf: Fertigung. In: Nedeß, C. (Hrsg.): Organisation des Produktionsprozesses. Stuttgart: Teubner, 1997., S. 195–218.
- Schomburg, Eckart: Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau, Dissertation, RWTH Aachen, 1980.
- Schöning, Harald; Dorchain, Marc: Data Mining und Analyse. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014., S. 543–554.
- Schreyögg, Georg: Future of Organization - drei Meinungen. Zeitschrift Führung und Organisation, Nr. 5 (2009.), S. 213–216.
- Schröder, Jürgen; Tomanek, Dagmar Piotr: Wertschöpfungsmanagement – Grundlagen und Verschwendung. Ingolstadt, 2012.
- Schröder, Jürgen; Tomanek, Piotr: Wert, Wertschöpfung und Verschwendung. In: Woratschek, H.; Schröder, J.; Eymann, T.; Buck, M. (Hrsg.): Wertschöpfungsorientiertes Benchmarking: Logistische Prozesse in Gesundheitswesen und Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015., S. 13–23.
- SCHRÖDER, M., 2005. Einführung in die kurzfristige Zeitreihenprognose und Vergleich der einzelnen Verfahren. In: P. MERTENS und S. RÄSSLER, Hg. Prognoserechnung. Heidelberg: Physica-Verlag, S. 7-37. ISBN 3-7908-0216-6.
- Schuh, G.; Potente, T.; Fuchs, S. (2012): Shifting Bottlenecks in Production Control. In: Hoda A. ElMaraghy (Hg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Bd. 54. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 505–511.
- Schuh, Günther; Blum, Matthias; Reschke, Jan; Birkmeier, Martin: Der Digitale Schatten in der Auftragsabwicklung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 1–2 (2016.a), S. 48–51.

7. Literaturverzeichnis

- Schuh, Günther; Potente, Till; Reuter, Christina; Hauptvogel, Annika: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Vogel-Heuser, B.; ten Hompel, M.; Bauernhansl, T. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017., S. 75–92.
- Schuh, Günther; Prote, Jan-Philipp; Molitor, Marco; Wlecke, Shari: Produktivitätsbaukasten 4.0. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 6 (2019.), S. 408–411.
- Schuh, Günther; Walendzik, Pia; Luckert, Melanie; Birkmeier, Martin; Weber, Anja; Blum, Matthias: Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 11 (2016.b), S. 745–748.
- Schulze, Felix; Dallasega, Patrick: Industry 4.0 Concepts and Lean Methods Mitigating Traditional Losses in Engineer-to-Order Manufacturing with Subsequent Assembly On-Site: A Framework. Procedia Manufacturing, (2020.), S. 1363–1370.
- Schwarz, J.: Durchlaufzeiten in der Werkstattfertigung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 12 (1991), S. 629–631.
- SCHWENKEN, J., J. SCHALLOW, D. SOLLIK, R. RICHTER und J. DEUSE, 2022. Identifikation und Prognose dynamischer Engpässe [online]. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 117(5), 294–299. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.1515/zwf-2022-1052
- Schwenken, Jörn; Schallow, Julian; Sollik, Damian; Richter, Ralph; Deuse, Jochen: Identifikation und Prognose dynamischer Engpässe. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 5 (2022), S. 294–299.
- Seitz, Matthias: Speicherprogrammierbare Steuerungen in der Industrie 4.0 Objektorientierter System- und Programmwurf, Motion Control, Sicherheit, Industrial IoT. 5. Hanser, München, 2021.
- Sengupta, Sandar; Das, Kanhan; VanTil, Robert P. (2008): A new method for bottleneck detection. In: Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (1), S. 1741–1745.
- Sgarbossa, Fabio; Romsdal, Anita; Oluyisola, Olumide Emmanuel; Strandhagen, Jan Ola: Digitalization in production and warehousing in food supply chains. In: The Digital Supply Chain: Elsevier, 2022, S. 273–287.
- Shahin, Mohammad; Chen, F. Frank; Bouzary, Hamed; Krishnaiyer, Krishnan: Integration of Lean practices and Industry 4.0 technologies: smart manufacturing for next-generation enterprises. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 5–6 (2020), S. 2927–2936.
- Sharafi, Armin (2013): Knowledge Discovery in Databases. Eine Analyse des Änderungsmanagements in der Produktentwicklung. Wiesbaden: Springer Fachmedien (Informationsmanagement und Computer Aided Team).
- SHARDA, R., 1994. Neural Networks for the MS/OR Analyst: An Application Bibliography [online]. Interfaces, 24(2), 116–130. ISSN 0092-2102. Verfügbar unter: doi:10.1287/inte.24.2.116

7. Literaturverzeichnis

- Shen, Miaomiao; Chen, Leilei: Production Bottleneck Shiftiness Study. In: 2010 International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization: IEEE, 2010, S. 213–216.
- Shen, Yan; Yang, Feng; Habibullah, Mohamed Salahuddin; Ahmed, Jhinaoui; Das, Ankit Kumar; Zhou, Yu; Ho, Choon Lim: Predicting tool wear size across multi-cutting conditions using advanced machine learning techniques. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Nr. 6 (2021), S. 1753–1766.
- Sheng Leng; Cuihua Chao; Fanglin Zou; Zhi Nie: Development on smart data collection and management in workshop based on the Internet of Things. In: 2015 IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN): IEEE, 2015, S. 272–276.
- Siepmann, David; Graef, Norbert: Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 17–82.
- Sihn, Wilfried; Sunk, Alexander; Nemeth, Tanja; Kuhlmann, Peter; Matyas, Kurt (2016): Produktion und Qualität. Organisation, Management, Prozesse. München: Carl Hanser Verlag.
- Sims, David: New realities in aircraft design and manufacture. *IEEE Computer Graphics and Applications*, (1994).
- Singh Rajawat, Anand; Bedi, Pradeep; Goyal, S. B.; Shukla, Piyush Kumar; Zaguia, Atef; Jain, Aakriti; Monirujjaman Khan, Mohammad: Reformist Framework for Improving Human Security for Mobile Robots in Industry 4.0. *Mobile Information Systems*, (2021), S. 1–10.
- SIVARAJAH, U., M.M. KAMAL, Z. IRANI und V. WEERAKKODY, 2017. Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods [online]. *Journal of Business Research*, 70, 263–286. ISSN 01482963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jbusres.2016.08.001
- Smyl, Slawek (2020): A hybrid method of exponential smoothing and recurrent neural networks for time series forecasting. In: *International Journal of Forecasting* 36 (1), S. 75–85. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.03.017.
- Soder, Johann: Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 85–102.
- Soder, Johann: Use Case Production. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 3–25.
- Song, Xiaofeng; Tan, Shili; Ding, Junjian: A Monitoring System for PLC Controlled Manufacturing System Based on Fieldbus. In: Kesheng, W.; Fang, M.; Wozny, M.; Kovacs, G. L. (Hrsg.): *Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in*

7. Literaturverzeichnis

- Product Design, Manufacturing, and Management: Springer US, 2006, S. 576–581.
- Soori, Mohsen; Arezoo, Behrooz; Habibi, Mohsen: Dimensional and geometrical errors of three-axis CNC milling machines in a virtual machining system. *Computer-Aided Design*, Nr. 11 (2013), S. 1306–1313.
 - Spath, Dieter; Ganschar, Oliver; Gerlach, Stefan; Hämmerle, Moritz; Krause, Tobias; Schlund, Sebastian: *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0*. Stuttgart, 2013.
 - Spath, Dieter; Ganschar, Oliver; Gerlach, Stefan; Hämmerle, Moritz; Krause, Tobias; Schlund, Sebastian (2013): *Produktionsarbeit der Zukunft. Industrie 4.0*. Stuttgart: IAO.
 - Stark, Rainer; Kind, Simon; Neumeyer, Sebastian: Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals*, Nr. 1 (2017), S. 169–172.
 - Stark, Rainer: *Industrie 4.0 and IoT Technologies*. In: Stark, R. (Hrsg.): *Virtual Product Creation in Industry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 507–553.
 - Steffen, Reiner: *Produktionsplanung bei Fließbandfertigung*. Gabler, Wiesbaden, 1977.
 - STELLWAGEN, E. und L. TASHMAN, 2013. ARIMA: The Models of Box and Jenkins. *Foresight: Int. J. Appl. Forecast.*, 28–33. *Foresight: Int. J. Appl. Forecast.*
 - Stich, Volker; Hering, Niklas: Daten und Software als entscheidender Wettbewerbsfaktor. *Industrie 4.0 Magazin: Zeitschrift für integrierte Produktionsprozesse*, (2015), S. 8–13.
 - STIER, W., 2001. *Methoden der Zeitreihenanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-41700-2.
 - Stockmann, Christian: *Untersuchung der Robustheit in Produktionssystemen: Konzeptionelles Verständnis, Bewertungsmethode und Managementansatz*. Logos Verlag, Berlin, 2021.
 - Strandhagen, Jo Wessel; Alfnes, Erlend; Strandhagen, Jan Ola; Swahn, Natalia: Importance of Production Environments When Applying Industry 4.0 to Production Logistics - A Multiple Case Study. In: *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*. Paris, France: Atlantis Press, 2016, S. 241–247.
 - Strandhagen, Jo Wessel; Buer, Sven-Vegard; Semini, Marco; Alfnes, Erlend: Digitalized Manufacturing Logistics in Engineer-to-Order Operations. In: Ameri, F.; Stecke, K. E.; von Cieminski, G.; Kiritsis, D. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems: Production Management for the Factory of the Future*. Cham: Springer Nature, 2019, S. 579–587.
 - Stütz, Sebastian (2011): *Kleine und mittlere Industrieunternehmen in der ökonomischen Theorie*. Lohmar: Josef Eul Verlag GmbH (Kleine und mittlere Unternehmen, 22).

7. Literaturverzeichnis

- Su, Xuan; Lu, Jingyu; Chen, Chen; Yu, Junjie; Ji, Weixi: Dynamic Bottleneck Identification of Manufacturing Resources in Complex Manufacturing System. *Applied Sciences*, Nr. 9 (2022), S. 4195–4215.
- SUBRAMANIYAN, M., A. SKOOGH, A.S. MUHAMMAD, J. BOKRANTZ, B. JOHANSSON und C. ROSER, 2020. A generic hierarchical clustering approach for detecting bottlenecks in manufacturing [on- line]. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 143-158. ISSN 02786125. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmsy.2020.02.011
- SUBRAMANIYAN, M., A. SKOOGH, H. SALOMONSSON, P. BANGALORE und J. BOKRANTZ, 2018. A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines [online]. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 533-544. ISSN 03608352. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cie.2018.04.024
- SUBRAMANIYAN, M., A. SKOOGH, J. BOKRANTZ, M.A. SHEIKH, M. THÜRER und Q. CHANG, 2021. Artificial intelligence for throughput bottleneck analysis – State-of-the-art and future directions [on- line]. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 734-751. ISSN 02786125. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmsy.2021.07.021
- Subramaniyan, Mukund; Skoogh, Anders; Bokrantz, Jon; Sheikh, Muhammad Azam; Thüerer, Matthias; Chang, Qing: Artificial intelligence for throughput bottleneck analysis – State-of-the-art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, (2021), S. 734–751.
- Subramaniyan, Mukund; Skoogh, Anders; Gopalakrishnan, Maheshwaran; Salomonsson, Hans; Hanna, Atieh; Lämkuill, Dan: An algorithm for data-driven shifting bottleneck detection. *Cogent Engineering*, Nr. 1 (2016), S. 1–19.
- Subramaniyan, Mukund; Skoogh, Anders; Salomonsson, Hans; Bangalore, Pramod; Bokrantz, Jon (2018): A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines. In: *Computers & Industrial Engineering* 125, S. 533–544.
- Tahmina, Tanjida; Garcia, Mauro; Geng, Zhaohui; Bidanda, Bopaya: A Survey of Smart Manufacturing for High-Mix Low-Volume Production in Defense and Aerospace Industries. In: Kim, K.-Y.; Monplaisir, L.; Rickli, J. (Hrsg.): *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: The Human-DataTechnology Nexus*. Detroit: Springer Nature, 2023, S. 237–245.
- Tamm, Gerrit; Tribowski, Christoph: *RFID*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- Tan, Jeffrey Too Chuan; Duan, Feng; Zhang, Ye; Watanabe, Kei; Kato, Ryu; Arai, Tamio: Human-robot collaboration in cellular manufacturing: Design and development. In: *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, S. 29–34.
- Tang, He: A new method of bottleneck analysis for manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, (2019), S. 21–24.

7. Literaturverzeichnis

- Taylor, Mark P.; Boxall, Peter; Chen, John J.J.; Xu, Xun; Liew, Angela; Adeniji, Adebayo: Operator 4.0 or Maker 1.0? Exploring the implications of Industrie 4.0 for innovation, safety and quality of work in small economies and enterprises. *Computers und Industrial Engineering*, (2020), S. 105486–105505.
- Techt, Uwe (2015): *Goldratt und die Theory of Constraints. Der Quantensprung im Management*. Stuttgart: ibidem.
- THEOCHARIDES, S., G. MAKRIDES, G.E. GEORGHIOU und A. KYPRIANOU, 2018. Machine learning algorithms for photovoltaic system power output prediction. In: 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON): IEEE, S. 1-6. ISBN 978-1-5386-3669-5.
- THOMAS, T.E., J. KOO, S. CHATERJI und S. BAGCHI, 2018. Minerva: A reinforcement learning-based technique for optimal scheduling and bottleneck detection in distributed factory operations. In: 2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS): IEEE, S. 129-136. ISBN 978-1-5386-1182-1.
- Thürer, Matthias; Stevenson, Mark: Bottleneck-oriented order release with shifting bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics*, (2018), S. 275–282.
- Tokola, Henri; Gröger, Christoph; Järvenpää, Eeva; Niemi, Esko: Designing Manufacturing Dashboards on the Basis of a Key Performance Indicator Survey. *Procedia CIRP*, (2016), S. 619–624.
- Tönnis, Marcus: *Augmented Reality*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- Tönshoff, Hans Kurt: *Werkzeugmaschinen: Grundlagen*. Springer, Berlin, 1995.
- van Kranenburg: "The Internet of Things: A critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID." Amsterdam, 2008.
- VARGHESE, J. und N. JAYASREE, 2021. Bottleneck Identification and Prediction in a Multi Job Manufacturing Plant. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 08(9), 82-85. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.
- VDI 2689: 2019: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.
- Verl, Alexander; Lechler, Armin: Steuerung aus der Cloud. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 235–247.
- Vogel-Heuser, Birgit; Diedrich, Christian; Broy, Manfred: Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik / Requirements on CPS from the Viewpoint of Automation. *auto*, Nr. 10 (2013), S. 669–676.
- Vogel-Heuser, Birgit: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 33–44.

7. Literaturverzeichnis

- von Lipinski, René; Richter, Markus; Reiff-Stephan, Jörg: Informationsgewinnung im cyberphysischen Produktionssystem. Wissenschaftliche Beiträge / Technische Hochschule Wildau, (2015.), S. 55–60.
- Wächter, Michael; Bullinger, Angelika: Gestaltung gebrauchstauglicher Assistenzsysteme für Industrie 4.0. In: Weisbecker, A.; Burmester, M.; Schmidt, A. (Hrsg.): Mensch und Computer 2015 – Workshopband: De Gruyter, 2015, S. 165–170.
- Wan, Jiafu; Chen, Baotong; Imran, Muhammad; Tao, Fei; Li, Di; Liu, Chengliang; Ahmad, Shafiq: Toward Dynamic Resources Management for IoT-Based Manufacturing. IEEE Communications Magazine, Nr. 2 (2018), S. 52–59.
- Wan, Jiafu; Tang, Shenglong; Li, Di; Imran, Muhammad; Zhang, Chunhua; Liu, Chengliang; Pang, Zhibo: Reconfigurable Smart Factory for Drug Packing in Healthcare Industry 4.0. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Nr. 1 (2019), S. 507–516.
- Wang, Chengen; Bi, Zhuming; Xu, Li da: IoT and Cloud Computing in Automation of Assembly Modeling Systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Nr. 2 (2014), S. 1426–1434.
- WANG, J.-J., J.-Z. WANG, Z.-G. ZHANG und S.-P. GUO, 2012. Stock index forecasting based on a hybrid model [online]. Omega, 40(6), 758-766. ISSN 03050483. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.omega.2011.07.008.
- WANG, J., Y. MA, L. ZHANG, R.X. GAO und D. WU, 2018. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications [online]. Journal of Manufacturing Systems, 48, 144-156. ISSN 02786125. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmsy.2018.01.003.
- Wang, Lizhe; Tao, Jie; Kunze, Marcel; Castellanos, Alvaro Canales; Kramer, David; Karl, Wolfgang: Scientific Cloud Computing: Early Definition and Experience. In: 2008 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications: IEEE, 2008, S. 825–830.
- Wang, X.; Ong, S.K.; Nee, A.Y.C.: Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface. Advanced Engineering Informatics, Nr. 3 (2016), S. 406–421.
- WANG, Y., Q. ZHAO und D. ZHENG, 2005. Bottlenecks in production networks: An overview [online]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 14(3), 347-363. ISSN 1004-3756. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11518-006-0198-3.
- Wang, Yongcai; Zhao, Qianchuan; Zheng, Dazhong (2005): Bottlenecks in production networks. An overview. In: Journal of Systems Science and Systems Engineering 14 (3), S. 347–363.
- Wang, Yongcai; Zhao, Qianchuan; Zheng, Dazhong: Bottlenecks in production networks: An overview. Journal of Systems Science and Systems Engineering, Nr. 3 (2005), S. 347–363.

7. Literaturverzeichnis

- Wannenwetsch, Helmut: Industrie 4.0, Produktion 4.0 und Einkauf 4.0. In: Wannenwetsch, H. (Hrsg.): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 571–602.
- Wannenwetsch, Helmut: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 4. Springer-Lehrbuch, Berlin, 2010.
- Warnecke, Hans-Jürgen: Der Produktionsbetrieb 2: Produktion, Produktionssicherung. 3. Springer-Lehrbuch, Berlin, 1995.
- Warnecke, Hans-Jürgen: Der Produktionsbetrieb: Eine Industriebetriebslehre für Ingenieure. Springer, Berlin, 1984.
- Weber, Marc-André; Jeske, Tim; Lennings, Frank: Nutzen der Digitalisierung für die Gestaltung produktiver Produktionsprozesse. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 6 (2018.a), S. 426–430.
- Weber, Marc-André; Jeske, Tim; Lennings, Frank: Nutzen der Digitalisierung für die Gestaltung produktiver Produktionsprozesse. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 6 (2018.b), S. 426–430.
- WEDEL, M., M. von HACHT, R. HIEBER, J. METTERNICH und E. ABELE, 2015. Real-time Bottleneck Detection and Prediction to Prioritize Fault Repair in Interlinked Production Lines [online]. Procedia CIRP, 37, 140-145. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.08.071.
- WEDEL, M., P. NOESSLER und J. METTERNICH, 2016. Development of bottleneck detection methods allowing for an effective fault repair prioritization in machining lines of the automobile industry [online]. Production Engineering, 10(3), 329-336. ISSN 0944-6524. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11740-016-0672-9.
- Wedel, Michael; Hacht, Michael von; Hieber, Ralf; Metternich, Joachim; Abele, Eberhard (2015): Real-time Bottleneck Detection and Prediction to Prioritize Fault Repair in Interlinked Production Lines. In: Procedia CIRP 37, S. 140–145.
- Weidemann, Björn; Sender, Jan: Produktivitätskennzahlen in der Fabrikplanung: Ein Ansatz zur kennzahlbasierten Kapazitätsplanung von Fabrikenressourcen am Beispiel der maritimen Industrie. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 3 (2014.), S. 113–116.
- WEIGEND, A.S., B.A. HUBERMAN und D.E. RUMELHART, 1992. Predicting Sunspots and Exchange Rates with Connectionist Networks. In: M. CASDAGLI, Hg. Nonlinear modeling and forecasting. Proceedings of the Workshop on Nonlinear Modeling and Forecasting held September, 1990 in Santa Fé, New Mexico. Redwood City, Calif.: Addison-Wesley, S. 395-432. ISBN 0-201-52764-2.
- Weitschat, Roman: Industrial Human-Robot Collaboration: Maximizing Performance While Maintaining Safety, Dissertation, Universität Rostock, 2019.
- Wenzel, Rüdiger: Industriebetriebslehre: das Management des Produktionsbetriebs; mit zahlreichen Fallbeispielen. Carl Hanser Verlag, München, 2001.

7. Literaturverzeichnis

- WESKAMP, M., A. TAMAS, T. WOCHINGER und A. SCHATZ, 2014. Studie Einsatz und Nutzenpotenziale von Data Mining in Produktionsunternehmen. Ergebnisse [online] [Zugriff am: 19. August 2022]. Verfügbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Studie_DataMininginProduktionsunternehmen.pdf.
- WEST, N., J. GRIES, C. BROCKMEIER, J.C. GOBEL und J. DEUSE, 2021. Towards integrated Data Analysis Quality: Criteria for the application of Industrial Data Science. In: 2021 IEEE 22nd International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI): IEEE, S. 131-138. ISBN 978-1-6654-3875-9.
- WEST, N., M. SYBERG und J. DEUSE, 2022. A Holistic Methodology for Successive Bottleneck Analysis in Dynamic Value Streams of Manufacturing Companies. In: A.-L. ANDERSEN, R. ANDERSEN, T.D. BRUNOE, M.S.S. LARSEN, K. NIELSEN, A. NAPOLEONE und S. KJELDGAARD, Hg. Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems. Cham: Springer International Publishing, S. 612-619. ISBN 978-3-030-90699-3.
- West, Nikolai; Syberg; Marius; Deuse, Jochen: A Holistic Methodology for Successive Bottleneck Analysis in Dynamic Value Streams of Manufacturing Companies. In: Andersen, A.-L.; Andersen, R.; Stoettrup Schioenning Larsen, M.; Nielsen, K.; Napoleone, A.; Kjeldgaard, S. (Hrsg.): Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022., S. 612-619.
- White, K. Preston; Ingalls, Ricki G. (2019): Introduction to Simulation. In: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference 1, S. 12-23.
- WIDROW, B., D.E. RUMELHART und M.A. LEHR, 1994. Neural networks [online]. Communications of the ACM, 37(3), 93-105. ISSN 0001-0782. Verfügbar unter: doi:10.1145/175247.175257.
- Wiedermann, Norbert: Absicherungskonzepte für Industrie 4.0. Datenschutz und Datensicherheit - DuD, Nr. 10 (2015.), S. 652-656.
- Wiegand, Mario; Konrad, Benedikt; Jalali Sousanabady, Reza; Willats, Peter; Deuse, Jochen: Quantifizierung von Variabilität durch Big Data Technologien. Productivity Management, Nr. 5 (2014.), S. 35-38.
- Wiegand, Mario; Konrad, Benedikt; Sousanabady, Reza Jalali; Willats, Peter; Deuse, Jochen (2014): Quantifizierung von Variabilität durch Big Data Technologien. In: Productivity Management 19 (1), S. 34-38.
- WIENDAHL, H.-P. und M. HEGENSCHIEDT, 2012. Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: B. LOTTER und H.-P. WIENDAHL, Hg. Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 331-363. ISBN 978-3-642-29060-2.
- WIENDAHL, H.-P., K. WINDT, J. LOPITZSCH und M. SCHNEIDER, 2003. Managing bottleneck resources in production networks. In: H.S. JAGDEV, J.C. WORTMANN und H.J. PELS, Hg. Collaborative Systems for Production Management. Boston, MA: Springer US, S. 409-424. ISBN 978-1-4757-4791-1.

7. Literaturverzeichnis

- Wiendahl, Hans-Peter (2014): Betriebsorganisation für Ingenieure. 8. Aufl. München: Hanser.
- Wiendahl, Hans-Peter: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Hanser, München, 2020.
- WIK (2019): Künstliche Intelligenz im Mittelstand. Relevanz, Anwendung, Transfer. Bad Honnef: Begleitforschung Mittelstand-Digital WIK GmbH.
- Wildemann, Horst: Investitionsentscheidungsprozeß für numerisch gesteuerte Fertigungssysteme. 2. CW-Publikationen, München, 1985.
- Wildemann, Horst: Produktivität durch Industrie 4.0. 1. TCW, München, 2018.
- Wildemann, Horst: Produktivitätssteigerung in der Montage. Productivity Management, Nr. 5 (2012.), S. 39–42.
- WINKOWSKI, C., 2019. Classification of forecasting methods in production engineering [online]. Engineering Management in Production and Services, 11(4), 23-33. Engineering Management in Production and Services. Verfügbar unter: doi:10.2478/emj-2019-0030.
- WITTEN, I.H., 2011. Data mining. Practical machine learning tools and techniques [online]. 3rd ed. Burlington, MA: Morgan Kaufmann Publishers. ISBN 0080890369. Verfügbar unter: <https://learning.oreilly.com/library/view/-/9780123748560/?ar>.
- Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. 26. Vahlen, München, 2016.
- Wöhe, Günther; Döring, Ulrich: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25. Vahlen, München, 2013.
- Wolf, Patrick; Deuse, Jochen; Richter, Ralph: Einfluss und Ursachen von Variabilität in der kundenauftragsspezifischen Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Nr. 11 (2019.), S. 730–733.
- Wollert, Jörg: IO-Link: Für smarte Sensoren. Elektronik Basics, (2015.)
- WOLPERT, D.H. und W.G. MACREADY, 1997. No free lunch theorems for optimization [online]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1), 67-82. ISSN 1089778X. Verfügbar unter: doi:10.1109/4235.585893.
- Wu, Kan; Zheng, Meimei; Shen, Yichi: A generalization of the Theory of Constraints: Choosing the optimal improvement option with consideration of variability and costs. IIE Transactions, Nr. 3 (2020.), S. 276–287.
- Wu, Kan; Zhou, Yaoming; Zhao, Ning: Variability and the fundamental properties of production lines. Computers und Industrial Engineering, (2016.), S. 364–371.
- WUEST, T., D. WEIMER, C. IRGENS und K.-D. THOBEN, 2016. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications [online]. Production & Manufacturing Research, 4(1), 23-45. Production & Manufacturing Research. Verfügbar unter: doi:10.1080/21693277.2016.1192517.
- Xia, Luyao; Lu, Jianfeng; Zhang, Chenling; Wang, Sheng; Zhang, Hao: Development and Application of Workshop Virtual Monitoring System Based on Unity. In: 2019 IEEE 8th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS): IEEE, 2019., S. 928–933.

7. Literaturverzeichnis

- Xiaoying, Shuai; Huanyan, Qian: Design of Wetland Monitoring System Based on the Internet of Things. *Procedia Environmental Sciences*, (2011.), S. 1046–1051.
- Xu, Li da; He, Wu; Li, Shancang: Internet of Things in Industries: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Nr. 4 (2014.), S. 2233–2243.
- Xu, Li da; Xu, Eric L.; Li, Ling: Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, Nr. 8 (2018.), S. 2941–2962.
- Yang, Bailin; Sun, Shulin; Li, Jianyuan; Lin, Xianxuan; Tian, Yan (2019): Traffic flow prediction using LSTM with feature enhancement. In: *Neurocomputing* 332 (7), S. 320–327.
- Yang, Chen; Lan, Shulin; Shen, Weiming; Huang, George Q.; Wang, Xianbin; Lin, Tingyu: Towards product customization and personalization in IoT-enabled cloud manufacturing. *Cluster Computing*, Nr. 2 (2017.), S. 1717–1730.
- Yen, Chun-Tai; Liu, Yu-Chi; Lin, Chih-Chieh; Kao, Chih-Chiang; Wang, Wen-Bin; Hsu, Yu-Rong: Advanced manufacturing solution to industry 4.0 trend through sensing network and Cloud Computing technologies. In: *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): IEEE, 2014.*, S. 1150–1152.
- YU, C. und A. MATTA, 2014. Data-driven bottleneck detection in manufacturing systems: A statistical approach. In: *2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): IEEE, S. 710-715. ISBN 978-1-4799-5283-0.*
- Yu, Chunlong; Matta, Andrea (2016): A statistical framework of data-driven bottleneck identification in manufacturing systems. In: *International Journal of Production Research* 54 (21), S. 6317–6332.
- Yue, Xuejun; Cai, Hu; Yan, Hehua; Zou, Caifeng; Zhou, Keliang: Cloud-assisted industrial cyber-physical systems: An insight. *Microprocessors and Microsystems*, Nr. 8 (2015.), S. 1262–1270.
- Zhang, Chenlin; Lu, Jianfeng; Wang, Hui: Application of Augmented Reality Technology in Workshop Production Management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Nr. 012048 (2018.), S. 1–6.
- ZHANG, G., B. EDDY PATUWO und M. Y. HU, 1998. Forecasting with artificial neural networks [online]. *International Journal of Forecasting*, 14(1), 35-62. ISSN 01692070. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0169-2070(97)00044-7.
- ZHANG, G.P., 2012. Neural Networks for Time-Series Forecasting. In: G. ROZENBERG, T. BÄCK und J.N. KOK, Hg. *Handbook of Natural Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 461–477. ISBN 978-3-540-92909-3.
- Zhang, J.; Ong, S.K.; Nee, A.Y.C.: RFID-assisted assembly guidance system in an augmented reality environment. *International Journal of Production Research*, Nr. 13 (2011.), S. 3919–3938.
- ZHANG, M. und A. MATTA, 2018. Data-driven Downtime Bottleneck Detection in Open Flow Lines. In: *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE): IEEE, S. 1513-1518. ISBN 978-1-5386-3593-3.*

7. Literaturverzeichnis

- Zhang, Mengyi; Matta, Andrea: Models and algorithms for throughput improvement problem of serial production lines via downtime reduction. *IIE Transactions*, Nr. 11 (2020.), S. 1189–1203.
- Zhang, Xuqian; Zhu, Wenhua: Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Nr. 5 (2019.), S. 1–16.
- ZHAO, D., X. TIAN und J. GENG, 2014. A Bottleneck Detection Algorithm for Complex Product Assembly Line Based on Maximum Operation Capacity [online]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-9. ISSN 1024-123X. Verfügbar unter: doi:10.1155/2014/258173.
- Zhao, Dongping; Tian, Xitian; Geng, Junhau (2014): A Bottleneck Detection Algorithm for Complex Product Assembly Line Based on Maximum Operation Capacity. In: *Mathematical Problems in Engineering* 3 (1), S. 1–9.
- Zheng, J.M.; Chan, K.W.; Gibson, I.: Virtual reality. *IEEE Potentials*, Nr. 2 (1998.), S. 20–23.
- Zheng, Maokuan; Ming, Xinguo: Construction of cyber-physical system-integrated smart manufacturing workshops: A case study in automobile industry. *Advances in Mechanical Engineering*, Nr. 10 (2017.), S. 1–17.
- Zhong, Ray Y.; Xu, Xun; Klotz, Eberhard; Newman, Stephen T.: Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, Nr. 5 (2017.), S. 616–630.

8. Anlagen

Steckbriefe der PrEPFlow-Anwendungsfälle:

| Albrecht JUNG GmbH & Co. KG | |
|---|--|
| | |
| Branche: | Gebäudesystemtechnik |
| Tätigkeitsbereiche: | Insbesondere Montagetätigkeiten, ergänzt durch Beschriftung, Prüftätigkeiten, Verpackung, u.a. |
| Wertstrom: | <u>Automatisierte Steckdosenfertigung und manuelle Unterstützungsprozesse:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Fertigung von Steckdoseneinsätzen • Parallel-Fertigung von Abdeckungen • „Verheiratung“ von Einsatz und Abdeckung zur komplettierten Steckdose • Verpackung und Palettierung |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Manuelle, außerplanmäßige Umpriorisierungen („Feuerwehreinsätze“) • Keine Erfüllung der geforderten Stückzahlen • Mehrarbeit • Stress und ggf. Mitarbeiterunzufriedenheit |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Teilnehmer der Shopfloorrunde für den Bereich der Steckdosenfertigung: direkte Mitarbeiter, Schicht- und Produktionsleitung, IE, technischer Service • Kernanwender i. e. S. nicht vorhanden, da Durchführung des Engpassmanagements eher unregelmäßig und bei Bedarf |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsauftragsinformationen (Produkte, Materialien, Stückzahl, Fertigungsschritte) • Detailliertere Störinformationen |

8. Anlagen

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • (bis dato) keine Erhebung von Zeitstempeln für die einzelnen Arbeitsstationen innerhalb der Anlage • Im aktuellem System kaum Möglichkeiten zum Aufbau von Zwischenpuffern |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Harmonisierung der Produktion • Verbesserte Planbarkeit • Transparenz • Erreichung der Planstückzahlen ohne Überlastung • Reduktion von Störungen • Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für die zukünftige dritte Anlage |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Implementierungsaufwand für digitales Engpassmanagement bei gewissem Risiko/ Ungewissheit über den Nutzen • Akzeptanz durch Mitarbeiter und Betriebsrat (Digitalisierung) • Eine nachträgliche Pufferintegration an den bestehenden beiden Anlagen ist technisch kaum umsetzbar |

| Siemens AG | |
|---|--|
| Branche: | Elektronikfertigung |
| Tätigkeitsbereiche: | Kombination der Stufen SMT, X-Ray, Funktionstest Ca. 800 Endprodukte, aber Mehrfachverwendung im FBG Bereich |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> • Auftragsreihenfolge beeinflusst die Belastung der Stationen sehr stark → Glättung und Pull im Fokus |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Nachfolgeprozesse der SMT eher als Dienstleistungszentrum organisiert → unstetiger Produktfluss • Supermarktfüllstände nicht immer unter Kontrolle → Aktuell Ausnahmeprozess • Punktuelle Überlastung einzelner Fertigungsstufen → Kapazitätsplanung der Pools schwierig |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsaufträge per Prio freigegeben → Produktsteuerer für den Wertstrom • LOG - Kümmerer und Nachverfolger der Aufträge über den Prozess • Logik aktuell schon integriert im WSS → DBF Funktion integriert (MARS Tool) |

8. Anlagen

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> Steuerungslogiken nicht immer einheitlich → Scheduling in der einen oder anderen Situation nicht eindeutig |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> DLZ-Analysen → Historische Daten Auftragseingang – LIPLAS Planung und Wochenfreezing Ggf. auch auf Ebene Tester und AP bezogen darstellbar DVSA Daten – Pufferstände und Nachverfolgbarkeit des Produktes im Wertstrom |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> Aktuell: FBG Verfügbarkeit zu prüfen bevor Montagefreigabe erfolgt Best Case: Auftragsreihenfolgen anpassen und DLZ verkürzen Best Case: Stillstand in der Montage vermeiden Zukünftig: Kapazitätsplanung ausgerichtet an gemanageten Engpässen |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> Auswahl der geeigneten Datenquellen und Bewertung der Datenqualität Risiko von Fehlprognosen und ggf. Verschärfung der Situation |

| | |
|---|--|
| Südwestmetall – Verband der Metall- und Elektroindustrie Baden-Württemberg e. V. | |
| Branche: | Arbeits- und sozialpolitische Interessensvertretung |
| Tätigkeitsbereiche: | Arbeitskreise, Informationsveranstaltungen, Netzwerktreffen Beratung als Anschlussmöglichkeit durch kompetente Partner des Arbeitgeberverbandes |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> Verschiedene Wertströme (abhängig vom Partner) |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> Niederschwelliges und intuitiv bedienbares Analysetool für KMU |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> Erste Ansprechpartner für den Arbeitgeberverband sind Betriebsleiter und technische Leiter |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> k.A. |

8. Anlagen

| | |
|---|---|
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Kleinere und mittlere Unternehmen für die Problematik sensibilisieren und leichten Einstieg ermöglichen |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • k.A. |

| Bulten GmbH | |
|---|--|
| | |
| Branche: | Verbindungselemente für die Automobilindustrie |
| Tätigkeitsbereiche: | Von der Entwicklung bis zur Linienversorgung (FSP) |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> • Pressen (mit Rüsten), Vergüten (teilautomatisiert), Beschichten (automatisiert), Sortieren, Verpacken von Ware |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Manueller Planungsaufwand • Zusätzliche Rüstvorgänge und Transporte • Geänderte Personalplanung • Wartungsstau |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Sämtliche Planungsabteilungen (Materialplaner, Fertigungsplaner), autonome Fertigungsgruppen, Abteilungs- und Bereichsleiter |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Kundenbedarfe (Termin, Menge) • Produktionsaufträge (Termin, Menge) • OEE (Laufzeiten, Geschwindigkeit, Taktzeit) • Soll-/ Ist-Ausbringung • Personalstärke (Min/Max) • Störzeiten (geplante Wartungen, Ausfälle) |

8. Anlagen

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • HF-Bestände • MES in Planung zur automatisierten Erfassung |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Verlässlichere Planung bzw. höhere Planungssicherheit (Personal und Instandhaltung) • Optimierte Anlagennutzung/ Nutzungsgrad • Keine „Schnellschüsse“ in der Fertigung/ Prozesskette |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit und Akzeptanz bei allen Nutzern • Aufwand/ Nutzen unklar • Zusätzliche Software nötig (nicht im MRP System abbildbar) • Datenqualität |

| EBG group GmbH | |
|--|---|
| | |
| Branche: | Elektro Bauelemente |
| Tätigkeitsbereiche: | Manuelle Montage |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> • Schaltschrankbau • Kabelkonfektionierung • Mittig im Wertstrom angesiedelt |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Bestands- und Bedarfsabgleich (fehlende Übersicht) • Auftragssteuerung eventuell die Ursache? • Betriebsdatenerfassung • Mehrere Segmente greifen auf eine Vormontage zu; Mitarbeiter aus den nachgelagerten Segmenten greifen eigenständig auf Rohmaterial zu, um Wartezeiten zu verkürzen; einerseits nicht genügend Rohmaterialien für alle Mitarbeiter, andererseits wird Bestelllogik für Rohmaterial gestört |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der | <ul style="list-style-type: none"> • Produktionsleitung, Prozessoptimierung, IT, Arbeitsvorbereitung, Vorarbeiter |

8. Anlagen

| | |
|---|--|
| Engpassidentifikation und -prognose: | |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Aufträge und Auftragsgröße • Vergangene Bearbeitungszeiten • Planzeiten • Teilweise manuelle Datenaufnahmen |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Bessere Abstimmung der Segmente • Weniger Wartezeiten • Höherer Durchsatz |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Datenqualität • Ausreichende Datenmenge |

| Insta GmbH | |
|---|---|
| Branche: | Gebäudetechnik, SmartHome-Lösungen |
| Tätigkeitsbereiche: | Leiterplattenbestückung, Montage zu Endgeräten, Entwicklung |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> • SMD-Bestückung von Leiterplatten im Nutzen in weitgehend automatisierter Fertigungslinie mit integrierten Prüftoren, Nutzentrennen • THT-Fertigung und Endmontage vorrangig in Fertigungsinseln (direkte Verkettung) mit THT-Bestückung, Sichten, Prüfen, Montieren und Verpacken |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Viele manuelle Änderungen und Anpassungen bei der Auftragseinlastung, die mitunter auch zu nicht optimalen Produktmischen führen • Taktzeit über den Vorgabezeiten und kalkulierten Zeiten • Wartezeiten (Maschine, Personal) • Nichteinhaltung von Standards |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Viele Teilnehmer, sowohl auf Shopfloorebene als auch an den zuarbeitenden Bereichen (Order Fulfillment, Industrial Engineering, Technische Arbeitsvorbereitung der SMD, VSAs, VSMs, ggf. Einkauf) • Je nach „Art“ des Engpasses und potenzieller Folge unterschiedliche Akteure und Reaktionen |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Datenbasis, Verfügbarkeit und Aktualität stark abhängig vom Fertigungsschritt |

8. Anlagen

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> Teilweise verfügbar: BDE, MES, Pufferauslastung, Bestände, Zeitstempel, Materialkapazität, Arbeitssystemverfügbarkeit, Personalkapazität |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> Reduzierung von Unterbrechungen in der Fertigung Weniger „Brandlöschchen“ Ermöglichung der Einhaltung von Standards |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> Komplex durch viele verschiedene Produkte, Fertigung ist immer ein Produktmix → Kompromisslösung Risiko bzw. Voraussetzung: Materialverfügbarkeit Akzeptanz: durch Einschränkung der Steuerungsmöglichkeiten auf Shopfloor-Ebene |

| | |
|----------------------------|--|
| IPS Engineers GmbH | |
| | |
| Branche: | Beratung und Softwareunterstützung in den Bereichen Industrial Engineering, Lean Production, Digital Manufacturing und Industrial Data Science |
| Tätigkeitsbereiche: | Integration in ein Beratungsprojekt und potenziell Integration in die IT-Landschaft des Unternehmens |

8. Anlagen

| | |
|---|---|
| | Aufbau eines eigenständigen Softwaretools zur Optimierung von Wertströmen (inkl. Engpassprognose) |
| Wertstrom: | <ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Wertströme (abhängig vom Kunden) • Unterschiedliche Rückmeldestrukturen (IT-Systemlandschaften) • Fokus auf die diskrete Serienfertigung |
| Engpassproblemstellungen: | <ul style="list-style-type: none"> • Methodenunabhängige und an Datenstruktur anpassbare Analysemodule • Strukturiertes Beratungsangebot für das dynamische Engpassmanagement • Dynamische Betrachtung in unterschiedlichen Auflösungen • Wichtig: Verwendbarkeit für KMU auch ohne eine ausgereifte IT-Infrastruktur |
| Akteure und Kernanwender im Bereich der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Unternehmensabhängig mit Fokus auf Wertstrommanager und Produktionssteuerer • Ggf. IPS Engineers in beratender Funktion |
| Datenbasis: | <ul style="list-style-type: none"> • Punktuelle Verfügbarkeit von Daten ist gegeben • Vollständige Integration ist eher selten • Kombination von unterschiedlichen Datenquellen für die Identifikation und Prognose |
| Potenziale durch Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung eines „Produktes Engpassidentifikation und -prognose“ • Schnelle Analysefähigkeit in den Projekten zum Thema Engpass • Bereitstellung von angepassten Maßnahmen im Engpassmanagement (Diagnosefähigkeit) |
| Risiken und Hindernisse für die Anwendung der Engpassidentifikation und -prognose: | <ul style="list-style-type: none"> • Unwirtschaftlichkeit durch hohen Integrationsaufwand • Scheitern der Prognose aufgrund zu eingeschränkter Datenbasis • Fehlendes Wertstromverständnis und nicht angepasste Rollen im Unternehmen (speziell bei KMU) |

8. Anlagen



Maßnahmenkatalog zum Umgang mit dynamischen Engpässen

Forschungsprojekt

Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen mittels Maschinellem Lernverfahren (PrEPFlow, 21595 N)

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

Forschungseinrichtung

RIF Institut für Forschung und Transfer e.V.

Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20

44227 Dortmund

Veröffentlichungsdatum

20.06.2023

Version: 1.1

Stand: 03.07.2023



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Einordnung und Ziel des Maßnahmenkatalogs..... | 3 |
| Auflistung der Maßnahmen | 4 |
| Kategorisierung | 6 |
| Maßnahmenbewertung..... | 8 |
| Leiharbeit | 9 |
| Sonderschichten..... | 10 |
| Effektive Ressourcenbelegung | 11 |
| Taktausgleich | 12 |
| Schnelles Anlernen | 13 |
| Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung..... | 14 |
| Technische Optimierung am Engpass | 15 |
| Lokale Reihenfolgenoptimierung | 16 |
| Optimierung des Lagerhaltungssystems..... | 17 |
| Pufferflächen vergrößern..... | 18 |
| Wartungen schieben | 19 |
| Einrichtung einer Parallelstrecke | 20 |
| Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen | 21 |
| Springereinsatz | 22 |
| Herausgeber & Kontaktperson: | 23 |

Einordnung und Ziel des Maßnahmenkatalogs

Der Maßnahmenkatalog ist im Forschungsvorhaben „Prädiktion dynamischer Engpässe in gerichteten Materialflusssystemen (MFS) mittels Maschinellem Lernverfahren (PrEPFlow)“ in Arbeitspaket (AP) 4 eingeordnet. AP 4 nimmt eine besondere Rolle ein, da hier wertschöpfende Maßnahmen zur Verminderung von Kapazitätsverlusten durch dynamische Engpässe entwickelt und katalogisiert wurden. Gemäß der Engpassstheorie (Theory of Constraints) nach Goldratt werden nach der Identifikation von Engpässen Schritte zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Systems eingeleitet. Selbiges gilt für die Prognose von Engpässen, die in AP 3 des Forschungsvorhabens erstellt wurde. Eine Engpassidentifikation oder -prognose führt keinen unmittelbaren wirtschaftlichen Nutzen herbei, da sie lediglich Wissen über zukünftiges Materialflussverhalten bereitstellen. In enger Abstimmung mit den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss (PA) von PrEPFlow wurden Maßnahmen zur Prävention identifizierter und vorhergesagter Engpässe entwickelt. Hierzu wurden die Unternehmen in einer strukturierten Interviewstudie befragt. Neben der Abfrage möglicher Maßnahmen in der Studie, wurden im Vorhinein bereits aktiv weitere Möglichkeiten zur Verhinderung von Engpässen entwickelt. In Summe wurden alle Maßnahmen vom Projektteam generalisiert, sodass sie branchenunabhängig in den Unternehmen angewendet werden können. Zusätzlich wurden alle Maßnahmen in den Kategorien Mensch, Technik und Organisation sowie in die Einteilung nach der jeweiligen Pufferart (Kapazität, Bestand, Zeit) katalogisiert. In den PA-Unternehmen wurden außerdem die Engpass-Szenarien vor Ort besprochen, sodass die regelmäßige Anwendung der Maßnahmen im Katalog berücksichtigt wurde. Dementsprechend wurden aus allen Maßnahmen nur die 14 am häufigsten angewendeten Maßnahmen für den Katalog ausgewählt. Zuletzt wurden die Maßnahmen im PA bewertet, sodass der Katalog ebenfalls eine Bewertung der Maßnahmen nach den Kriterien *Zeit*, *Wirksamkeit*, *Handhabung* und *Kosten* berücksichtigt. Ergänzend wurden weitere hilfreiche Beschreibungen mit Potenzialen und Risiken sowie fortführender Literatur zu den Maßnahmen hinzugefügt. Mit der Veröffentlichung des IT-Werkzeugs wird der Maßnahmenkatalog auch der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Auflistung der Maßnahmen

In enger Abstimmung mit den Unternehmen des PA von PrEPFlow wurden Maßnahmen zur Prävention identifizierter und vorhergesagter Engpässe entwickelt. Hierzu wurde zunächst eine Recherche zu Maßnahmen durchgeführt. In Einzelinterviews wurden Personen aus den Unternehmen (n=9) strukturiert nach weiteren Maßnahmen befragt. Sowohl die recherchierten Maßnahmen, als auch die weiteren genannten Maßnahmen wurden vom Projektteam generalisiert und nach Ihrer Anwendungshäufigkeit von den Personen bewertet. Die folgende Tabelle listet alle identifizierten Maßnahmen der Interviewstudie nach ihrer Anwendungshäufigkeit auf.

Tabelle 1: Maßnahmenliste sortiert nach Anwendungshäufigkeit

| | |
|----|--|
| 1 | Leiharbeit |
| 2 | Sonderschichten |
| 3 | Effektive Ressourcenbelegung |
| 4 | Taktausgleich |
| 5 | Schnelles Anlernen |
| 6 | Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung |
| 7 | Technische Optimierung am Engpass |
| 8 | Lokale Reihenfolgenoptimierung |
| 9 | Optimierung des Lagerhaltungssystems |
| 10 | Pufferflächen vergrößern |
| 11 | Wartungen schieben |
| 12 | Einrichtung einer Parallelstrecke |
| 13 | Leistungsstarke Mitarbeiter am Engpass einsetzen |
| 14 | Springereinsatz |
| 15 | Vorlaufzeiten erhöhen |
| 16 | Lieferzeiten verlängern |
| 17 | „Frozen Zone“ einführen |
| 18 | Engpassversorgung mit 100 % Qualitätsteilen |
| 19 | Engpass besser austakten |
| 20 | Pausenzeiten optimieren |
| 21 | Kundentakt einführen |
| 22 | Instandhaltungsorganisation verbessern |
| 23 | „Eilmodus“ auf Anlagen fahren |
| 24 | Neue Maschine einsetzen |
| 25 | Motivationssteigernde Entlohnung |
| 26 | Engpassorientierte Auftragsfreigabe einführen |
| 27 | Losgröße reduzieren |
| 28 | Weniger Test-Batches produzieren |
| 29 | Mehr Mitarbeitende für Rüstprozess einsetzen |
| 30 | SMED-Workshops durchführen |

Beim Einsatz von Engpassmaßnahmen ist deren Wirkung zu überprüfen. Ein erfolgreicher Einsatz misst sich daran, dass im besten Fall der Engpass verschoben ist oder dessen Wirkung durch die Maßnahme abgeschwächt wurde (z. B. Ausbringungssteigerung). Eine Verschiebung kann dazu führen, dass sich der Engpass außerhalb des Materialflusssystem befindet. So kann der dynamische Engpass, auch aufgrund von Liefer- und Auftragsschwankungen, in einer Kunden- oder Lieferantenbeziehung entstehen, sodass die Wirkung der Maßnahmen im Materialflusssystem an Relevanz verliert. Infolgedessen sollte überprüft werden, ob

durchgeführte Maßnahmen ggf. zurückgenommen oder durch langfristige Maßnahmen substituiert werden können. Hierfür eignen sich in erster Linie kurzfristige Maßnahmen, die i. d. R. auch kurzfristig zurückgenommen werden können, wie bspw. „Springereinsatz“, „schnelles Anlernen“, und „Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen“. Wichtig ist hier, dass jeweils im Einzelfall abgewogen wird, ob eine Rücknahme sinnvoll ist. Maßnahmen, die sich weniger für eine Rücknahme eignen, sind z. B. indirekte Maßnahmen, wie „Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung“, oder langfristige Maßnahmen, wie „Technische Optimierungen“. Sollten Maßnahmen zurückgenommen werden, dann führt es dazu, dass die möglichen Risiken der einzelnen Maßnahmen verschwinden. Bspw. reduziert sich der entstandene Wartungsstau nach der Rücknahme der Maßnahme „Wartungen schieben“ dadurch, dass dieser anschließend systematisch abgearbeitet werden kann.

Kategorisierung

Insgesamt wurden 30 Maßnahmen in der Interviewstudie integriert. Damit die Auflistung der Maßnahmen übersichtlich wird, wurde eine Matrix mit zwei Einordnungskategorien erstellt. Zum einen wurden die Maßnahmen den Teilen *Mensch*, *Technik* und *Organisation* zugeordnet. Diese Einordnung orientiert sich an dem MTO-Konzept (Ulich, 1997) und der MTO-Analyse (Strohm & Ulich, 1997). Im MTO-Konzept wird die gegenseitige Abhängigkeit und das Zusammenwirken der drei Teile Mensch, Technik und Organisation erläutert (Ulich, 2013). Abbildung 1 stellt das MTO-Konzept dar. In den Flächen, die sich überlappen, wird das Zusammenwirken der drei Teile dargestellt. In der Kategorisierung der Maßnahmen werden nur eindeutige Zuordnungen zu den Teilen getroffen. Beispielsweise wurde die Maßnahme „Leiharbeit“ dem Teil Mensch zugeordnet.

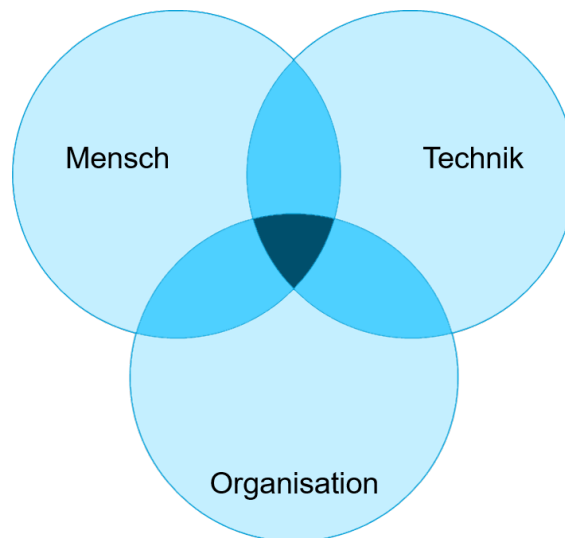


Abbildung 1: Dreiklang zwischen Mensch, Technik und Organisation (in Anlehnung an Ulich, 1997)

Als zweite Einordnungskategorie wird die Pufferart herangezogen. Zu den drei Pufferarten gehören *Bestands-*, *Kapazitäts-* und *Zeitpuffer*. *Bestandspuffer* sind zusätzliches Material innerhalb und außerhalb des MFS. Es wird von einem Umlaufbestand gesprochen, wenn sich der Materialpuffer innerhalb des MFS befindet. Befindet sich der Materialpuffer zwischen dem MFS und dem Zulieferer, dann wird von einem Rohmaterialbestand gesprochen. Der letzte Materialbestand ist ein Fertigwarenbestand, welcher sich zwischen MFS und Kunden befindet. Die Nutzung von Bestandspuffern ist direkt mit Kosten verbunden und deren Größe hängt mit der Variantenanzahl zusammen. Je früher sie im MFS eingesetzt werden, desto besser. Kapazitätspuffer eignet sich besonders gut, um irreguläre oder ungeplante Kundennachfragen zu befriedigen. Sie sind ein überschüssiges Produktionspotenzial im MFS, welche z. B. eine gewollte Unterauslastung des gesamten MFS sein kann. So können bspw. Störungen oder Materialmängel gepuffert werden. Unter Zeitpuffern wird der Verzug zwischen Kundennachfrage und Liefertermin verstanden. Zeitpuffer haben eine gute Anpassbarkeit. Ein Beispiel ist ein Puffer im Liefertermin, in dem dieser absichtlich nach hinten geschoben wird. In Bezug auf die Maßnahmen verfolgt die Einordnung verfolgt Idee, dass jede der Maßnahmen eine Art zusätzlicher Puffer im MFS ist. So wird z. B. die Maßnahme „Leiharbeit“ als Kapazitätspuffer kategorisiert.

Für die übersichtliche Kategorisierung wurden die 30 Maßnahmen in einer Matrix eingeordnet. Die Matrix findet sich in Abbildung 2.

| | Bestand | Kapazität | Zeit |
|---------------------|--|--|---|
| Mensch | | <ul style="list-style-type: none"> • Motivationssteigernde Entlohnung • Mehr Mitarbeitende für Rüstprozess einsetzen • Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung • Schnelles Anlernen • SMED-Workshops durchführen • Leiharbeit • Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen | |
| Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Pufferflächen vergrößern • Optimierung des Lagerhaltungssystems | <ul style="list-style-type: none"> • Technische Optimierung am Engpass • Engpassversorgung mit 100 % Qualitätsteilen • Einrichtung einer Parallelstrecke • Neue Maschine einsetzen • „Eilmodus“ auf Anlagen fahren | |
| Organisation | | <ul style="list-style-type: none"> • Kundentakt einführen • Pausenzeiten optimieren • Engpass besser austakten • Effektive Ressourcenbelegung • Sonderschichten • Weniger Test-Batches produzieren • Springereinsatz • Losgröße reduzieren • Instandhaltungsorganisation verbessern • Lokale Reihenfolgenoptimierung • Engpassorientierte Auftragsfreigabe einführen • Wartungen schieben • Taktausgleich | <ul style="list-style-type: none"> • Vorlaufzeiten erhöhen • Lieferzeiten verlängern • „Frozen Zone“ einführen |

Abbildung 2: Kategorisierungsmatrix für Maßnahmen im Umgang mit dynamischen Engpässen

Maßnahmenbewertung

Im Rahmen der dritten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses von PrEPFlow wurde ein Workshop zur Bewertung der Maßnahmen durchgeführt. In Kleingruppen haben die Teilnehmenden die TOP 14 Maßnahmen des Katalogs anhand der vier Kategorien *Zeit*, *Wirksamkeit*, *Handhabung* und *Kosten* bewertet. Jede Kategorie hat drei aufsteigende Ausprägungen. Tabelle 2 zeigt, welche Fragen die Teilnehmenden während der Bewertung beantworten mussten und wie sie dies beantworten konnten.

Tabelle 2: Bewertung der Engpass-Maßnahmen

| Kategorie | Frage | Ausprägungen | | |
|-------------|--|--------------|---------------|-------------|
| Zeit | Wie schnell wirkt die Maßnahme? | Langfristig | Mittelfristig | Kurzfristig |
| Wirksamkeit | Wie stark wirkt die Maßnahme auf den Engpass? | Gering | Mittel | Gut |
| Handhabung | Wie kompliziert ist der Einsatz dieser Maßnahme? Wie „hoch“ müssen die Kompetenzen sein? | Schwierig | Moderat | Einfach |
| Kosten | Wie teuer ist der Einsatz dieser Maßnahme? | Hoch | Mittel | Gering |

Um die Objektivität der Bewertung zu steigern, wurde nach den Workshops eine Umfrage mit Expert:innen durchgeführt. Sowohl die Ergebnisse des Workshop, als auch die Umfrageergebnisse wurden dann zu einer gemeinsamen Bewertung zusammengeführt (Abbildung 3). Insgesamt soll die Bewertung den Nutzenden eine grobe Hilfestellung geben, welche Maßnahme im Umgang mit ihrem dynamischen Engpass sinnvoll sein könnte.

| Maßnahme | Zeit | Wirksamkeit | Handhabung | Kosten |
|---|------|-------------|------------|--------|
| 1 Leiharbeit | ●●● | ●●● | ●●○ | ●○○ |
| 2 Sonderschichten | ●●● | ●●● | ●●○ | ●○○ |
| 3 Effektive Ressourcenbelegung | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 4 Taktausgleich | ●●○ | ●●○ | ●●○ | ●●○ |
| 5 Schnelles Anlernen | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 6 Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung | ●●○ | ●●● | ●●○ | ●●○ |
| 7 Technische Optimierung am Engpass | ●●○ | ●●● | ●○○ | ●○○ |
| 8 Lokale Reihenfolgenoptimierung | ●●● | ●●○ | ●●○ | ●●● |
| 9 Optimierung des Lagerhaltungssystems | ●●○ | ●●○ | ●○○ | ●○○ |
| 10 Pufferflächen vergrößern | ●●○ | ●●○ | ●●○ | ●●○ |
| 11 Wartungen schieben | ●●● | ●●○ | ●●● | ●●● |
| 12 Einrichtung einer Parallelstrecke | ●●○ | ●●● | ●●● | ●●○ |
| 13 Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen | ●●● | ●●● | ●●● | ●●● |
| 14 Springereinsatz | ●●● | ●●● | ●●○ | ●●○ |

Abbildung 3: Bewertungsmatrix

| | | |
|---------------------|---|----------------|
| Bezeichnung | Leiharbeit | Nr. 1.0 |
| Synonyme | Zeitarbeit, Personalleasing, Mitarbeitendenüberlassung, flexibler Mitarbeitendeneinsatz, Arbeitnehmendenüberlassung | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |

| | |
|--|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (mittel bis gut) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat) |
| Kosten | ● ○ ○ (hoch) |
| Ziel | |
| Ziel des Einsatzes von Leiharbeit ist der mittelfristige, flexible Puffer an Kapazität von Mitarbeitenden wodurch Ausbringungsverluste am Engpass reduziert werden können. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Leiharbeit ist die gegen ein Entgelt, zeitlich begrenzte Nutzung von Arbeitnehmenden über eine Leiharbeitsfirma. Die Leiharbeitenden sind bei der Leiharbeitsfirma angestellt und das Entgelt wird in der Regel an diese entrichtet. Im Gegensatz zu befristeten Arbeitsverhältnissen entfällt die zeitintensive Personalrekrutierung und die Arbeitskräfte sind sofort verfügbar. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Abfangen von Auftragsspitzen und Krankenzeiten - Flexibilitätsvorteile gegenüber Feststellungen |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Kaum Fachausbildung der Mitarbeitenden - Zeit zum Anlernen notwendig |
| Literatur | |
| Dudenhöffer, Büttner (2006): Der Wettbewerbsfaktor Zeitarbeit in der Automobilindustrie | |

| | | |
|---------------------|--|----------------|
| Bezeichnung | Sonderschichten | Nr. 2.0 |
| Synonyme | Mehrarbeit, Bedarfsdeckung ohne Personalbewegung | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |

| | |
|---|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (mittel bis kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (mittel bis gut) |
| Handhabung | ● ● ○ (schwierig bis moderat) |
| Kosten | ● ○ ○ (hoch) |
| Ziel | |
| Das Ziel von Sonderschichten ist die Kapazitätssteigerung zur Bewältigung von dynamischen Engpasssituationen. Ebenso wird die Sonderschicht zum Aufholen von Planrückständen verwendet. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Arbeitszeiten, die außerhalb der betriebsüblichen Arbeitszeiten anfallen und die dazu dienen, kurzfristige Bedarfsspitzen zu überbrücken, werden als Sonderschichten bezeichnet. Die Mehrarbeit wird im Bereich der Personalwirtschaft als internes Mittel zur Personalbeschaffung ohne Personalbewegung betrachtet. Vor der Planung von Sonderschichten müssen die vertraglichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Kapazitätsanpassungen ohne Neuanstellungen - Bereits Qualifiziertes Personal - Zusatzverdienstmöglichkeit für Stammpersonal |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Belastungssteigerung der Mitarbeitenden - Zusatzkosten und weniger Erholung bei Überstunden & Sonn- und Feiertagsarbeit |
| Literatur | |
| Hans Jung (2017): Personaleinsatzplanung. In: Personalwirtschaft, S. 235 | |

| | | |
|---------------------|---|----------------|
| Bezeichnung | Effektive Ressourcenbelegung | Nr. 3.0 |
| Synonyme | Ressourcenplanung, Kapazitätsplanung, Leistungsabstimmung | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Organisation | |

| | |
|--|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (mittel bis kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (mittel) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat) |
| Kosten | ● ● ○ (mittel bis gering) |
| Ziel | |
| Ziele der effektiven Ressourcenbelegung sind Vermeidung von Engpässen, Effizienzsteigerungen, gleichmäßige Auslastung, Flexibilität, Vermeidung von Überproduktion und das Erfüllen der Kundenanforderungen. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Die Ressourcenplanung bezieht sich auf das effektive Zusammenspiel zwischen Betriebsmitteln, Personal, Informationen und Zeit, um den Kundenanforderungen gerecht zu werden. Falls das Kapazitätsangebot vom Bedarf abweicht, stellen die Kapazitätsanpassung, der Kapazitätsabgleich oder die Fremdvergabe, Möglichkeiten der Kapazitätsabstimmung dar. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Vermeidung und Beseitigung von Engpässen und Überproduktion - Fristgerechte Erfüllung von Kundenanforderung |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Veränderungen in der Nachfrage - Eingangsinformationen |
| Literatur | |
| E. Gundogar, M. Sari, A. H. Kokcam (2016): Dynamic bottleneck elimination in mattress manufacturing line using theory of constraints | |

| | | |
|---------------------|----------------------|----------------|
| Bezeichnung | Taktausgleich | Nr. 4.0 |
| Synonyme | Taktzeitpuffer | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Organisation | |

| | | |
|---|--|-----------|
| Bewertung | | |
| Zeit | ● ● ○ | (mittel) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ | (mittel) |
| Handhabung | ● ● ○ | (moderat) |
| Kosten | ● ● ○ | (mittel) |
| Ziel | | |
| Das Ziel des Taktausgleichs ist es, mit einer Taktzeit zu planen, die unterhalb des Linientaktes liegt. So können Schwankungen und Störungen am Engpass durch den Taktausgleich ausgeglichen werden. | | |
| Kurzbeschreibung | | |
| Der Taktausgleich beschreibt die Differenz zwischen der vorgegebenen (Kundentakt/Linientakt) und der tatsächlichen Taktzeit. Ein geplanter, höherer Taktausgleich am Engpass kann als Kapazitätspuffer dienen. | | |
| Potenziale und Risiken | | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Kapazitätspuffer - Flexibilität des Taktausgleichs | |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Zu hohe Ausbringung - Schwierige Vorhersage des idealen Taktausgleichs - Erhöhte Kapazität notwendig | |
| Literatur | | |
| <p>M. Berger, T. N. Dang (2017): Funktionsbasierte Methode zur Optimierung der Taktzeit von Montageanlagen. In: Füge- und Montagetechnik Chemnitz, S. 87</p> <p>M. H. Pröpster (2015): Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus, S. 19</p> <p>C. Weiss (2000): Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontagelinien in der Automobilindustrie. Diss. Universität Karlsruhe</p> | | |

| | | |
|---------------------|--|----------------|
| Bezeichnung | Schnelles Anlernen | Nr. 5.0 |
| Synonyme | rapid on-boarding, Schnelle Einarbeitung/Qualifizierung/Schulung | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |

| | |
|--|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (mittel bis kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (mittel) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat) |
| Kosten | ● ● ● (mittel bis gering) |
| Ziel | |
| Durch schnelles Anlernen können in kurzer Zeit die personellen Kapazitäten erhöht werden. Positive Nebeneffekte sind eine längere Mitarbeitendenbindung an das Unternehmen und erhöhte Produktivität durch soziale Integration. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Schnelles Anlernen bezieht sich auf den Prozess, bei dem Mitarbeitende in kurzer Zeit neue Arbeitsabläufe erlernen und in der Lage sind, diese eigenständig auszuführen. Es besteht jedoch das Risiko, dass dieses schnelle Anlernen zu einem geringeren Verständnis der Prozesse führt, was möglicherweise zu Qualitätseinbußen führen kann. Um dieses Risiko zu minimieren, können Qualifizierungsmaßnahmen nachgeholt werden, sobald die Engpasssituation behoben ist. Die Einbindung neuer Mitarbeitenden in soziale Strukturen des Unternehmens ist ein wichtiger Faktor für die Erfolgsaussichten des schnellen Anlernens. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Schnellere Einsatzbereitschaft - Höhere Motivation und Produktivität der Mitarbeitenden durch Eigenverantwortung und Sozialisierung |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Geringere Qualifikation der Mitarbeitenden am neuen Arbeitsplatz - Qualitätsverluste und erhöhter Ausschuss - Höheres Unfallrisiko |
| Literatur | |
| K. Rollag, S. Parise, R. Cross (2005): Getting new hires up to speed quickly | |

| | | |
|---------------------|---|----------------|
| Bezeichnung | Ergonomische Arbeitsplatzgestaltung | Nr. 6.0 |
| Synonyme | Beanspruchungsreduktion, Betriebliche Gesundheitsförderung, Menschengerechte Gestaltung, Arbeitsplatz Ergonomie | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |

| | |
|--|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (mittel) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (mittel bis gut) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat) |
| Kosten | ● ● ○ (mittel) |
| Ziel | |
| Das Ziel von Ergonomischen Maßnahmen ist eine Produktivitätssteigerung der Mitarbeitenden durch Beanspruchungsreduktion und somit auch eine Zykluszeitsenkung am Engpass zu erzielen. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Eine Verbesserung der Ergonomie am Arbeitsplatz kann neben einer Produktivitätssteigerung (z.B. bessere Erreichbarkeit der Werkzeuge) auch Gesundheitliche Vorteile für Mitarbeitende (z.B. Haltungsschäden vermeiden) mit sich bringen und somit auch die direkten (Krankentage) als auch indirekten Kosten (Präsentismus, Rechtskosten, Qualitätsverlust usw.) senken. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Senkung der Zykluszeit durch erhöhte Produktivität - Erhöhte Zufriedenheit der Mitarbeitenden sowie Senkung der Begleitkosten wie z.B. Arbeitsunfähigkeitstage |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Investitionskosten bei gleichbleibender Produktivität |
| Literatur | |
| U. Daub, A. Ackermann, V. Kopp (2019): Ergonomie-Benefits: Kriterien zur Bewertung ergonomischer Maßnahmen in der Kosten-Nutzen-Analyse | |

| | | |
|---------------------|--|----------------|
| Bezeichnung | Technische Optimierung am Engpass | Nr. 7.0 |
| Synonyme | Nutzung von technischen Potenziale / Technische Verbesserungen | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Technik | |

| | |
|--|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (langfristig bis mittelfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (gut) |
| Handhabung | ● ○ ○ (schwierig) |
| Kosten | ● ○ ○ (hoch) |
| Ziel | |
| Durch technische Optimierungen am Engpass kann durch eine verkürzte Prozess- und damit Zykluszeit (bei gleicher Bearbeitungslosgröße) der Produktionstakt gesenkt werden. Die Hauptziele der technischen Optimierung zur Entschärfung des Engpasses sind eine Taktzeitreduzierung und die Minimierung von Ausfallzeiten. Weitere positive Nebeneffekte können Qualitätsverbesserungen und gesunkene Kosten sein. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Die technische Optimierung am Engpass bezieht sich auf die Verbesserung der Leistung einer Maschine, eines (Neben-)Prozesses oder eines Systems an der Stelle, an der die Leistung begrenzt ist. Dies kann durch die Verbesserung der Ausstattung oder die Änderung von Prozessparametern realisiert werden. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Dauerhafte Senkung der Prozesszeit - OEE-Steigerungen möglich - Qualitätssteigerung möglich → reduzierte Nacharbeit/Kosten |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Investitionskosten - Stillzeiten während der Optimierung - Unerwünschte Nebenwirkungen bei unsorgfältiger Planung - Integrationsschwierigkeiten von vor- und nachgelagerten Prozessen |
| Literatur | |
| T. Speicher, M. Berger (2019): Kennwertorientierte Synthese taktzeitoptimierter Bewegungsgesetze zur effizienten Prozessoptimierung | |

| | | |
|---------------------|--|----------------|
| Bezeichnung | Lokale Reihenfolgenoptimierung | Nr. 8.0 |
| Synonyme | Reihenfolgeplanung, Perlenkettenbildung, (Re)-Sequencing | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Organisation | |

| | |
|--|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (mittel bis kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (mittel) |
| Handhabung | ● ● ○ (schwierig bis moderat) |
| Kosten | ● ● ● (mittel bis gering) |
| Ziel | |
| Das Ziel dieser Maßnahme ist es, den Durchsatz am Engpass, durch eine Änderung der Produktionsreihenfolge zu erhöhen und Schwankungen der Prozesszeit zu minimieren. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Bei Auftragswarteschlangen stellt sich die Frage, in welcher Reihenfolge diese für den größtmöglichen Nutzen abgearbeitet werden sollten. Dies kann unter verschiedenen Gesichtspunkten wie z.B. der Rüstzeitoptimierung, gleichmäßiger Materialfluss oder Prioritätsregeln erfolgen, um vereinbarte Endtermine einzuhalten (Verzugsstrafe). | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Durchsatzerhöhung - Erhöhung der Termintreue - Glättung der Prozesszeiten |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Verzugskosten - Hoher Planungsaufwand |
| Literatur | |
| M. H. Pröpster (2015): Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus, S. 17 Günther Schuh (2006): Produktionsplanung und -steuerung, S. 54 | |

| | | |
|---------------------|---|----------------|
| Bezeichnung | Optimierung des Lagerhaltungssystems | Nr. 9.0 |
| Synonyme | Warehouse Optimization | |
| Pufferart | Bestand | |
| MTO-Einfluss | Technik | |

| | |
|---|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (mittel) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (mittel) |
| Handhabung | ● ○ ○ (schwierig) |
| Kosten | ● ○ ○ (hoch) |
| Ziel | |
| Ziel der Optimierung des Lagerhaltungssystems (LHS) ist es, eine gleichmäßige Auslastung der Ressourcen zu gewährleisten sowie die Nebenzeiten, Auftragsdurchlaufzeiten und die Leerfahrtenquote zu minimieren. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Die Maßnahmen können in technische und betriebliche/organisatorische Rahmenbedingungen klassifiziert werden. Der zeitliche Horizont wäre eine weitere Klassifizierungsmöglichkeit: Kurzfristig: Reihenfolgeplanung Mittelfristig: Neusortierung der Lagerbestände Langfristig: Lagerlayout | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | - Steigerung der Lagerleistung - Kostenreduzierung |
| Risiken | - Investitionskosten - Planungsaufwand - Anlaufphase |
| Literatur | |
| M. Ten Hompel, T. Schmidt (2010): Warehouse Management, S.125-135 | |

| | | |
|---------------------|---------------------------------|-----------------|
| Bezeichnung | Pufferflächen vergrößern | Nr. 10.0 |
| Synonyme | Entkopplungspuffer | |
| Pufferart | Bestand | |
| MTO-Einfluss | Technik | |

| | |
|---|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (mittel) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (mittel) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat) |
| Kosten | ● ● ○ (mittel) |
| Ziel | |
| Das Ziel einer Vergrößerung der Pufferflächen ist es, durch eine hohe Auslastung den Durchsatz des Engpasses zu erhöhen und Schwankungen auszugleichen. | |
| Kurzbeschreibung | |
| In einem Puffer werden Güter bereitgehalten, um Schwankungen im Materialfluss auszugleichen. Im Unterschied zum Lagern, schwankt der Bestand hierbei um einen Mittelwert. In Fertigungsprozessen können Puffer Stillstandszeiten reduzieren, indem sie blockierte und wartende Maschinenzuständen verhindern. Die optimale Puffergröße und Platzierung zu finden, ist ein Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, da sowohl Ausfallzeiten als auch lange Pufferverweilzeiten Kosten verursachen. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Hohe Auslastung & Ausgleich von Zeitschwankungen - Vermeidung von Produktionsunterbrechungen (Stillstandszeiten) von vor- und nachgelagerten Prozessen - Kurzfristige Reihenfolgeänderungen werden vereinfacht - Nachträgliche Qualitätskontrolle und Nacharbeit vor dem Engpass möglich (100% Qualitätsteile in EP) |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Kosten, Flächenbedarf & Organisationsaufwand steigen - Verlängerung der Prozesskette - Große Puffer erschweren die Identifikation von Problemen - Erhöhung der Durchlaufzeit |
| Literatur | |
| I. Meinhardt, F. Sunarjo, H.-G. Marquardt (2006): Methode zur Dimensionierung von Entkopplungspuffern in dynamischen Fertigungsprozessen | |

| | | |
|---------------------|--|-----------------|
| Bezeichnung | Wartungen schieben | Nr. 11.0 |
| Synonyme | Aufschieben von Wartungsarbeiten, Maintenance postponement, maintenance optimization | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Technik | |

| | |
|---|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ○ (gering) |
| Handhabung | ● ● ○ (moderat bis einfach) |
| Kosten | ● ● ○ (mittel bis gering) |
| Ziel | |
| Durch das Schieben von Wartungsarbeiten werden Produktionszeiten am Engpass vorgezogen und Maschinenstillstandszeiten in weniger kritische Phasen ausgelagert. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Das Aufschieben von Wartungsarbeiten ist ein Aussetzen der geplanten Wartungsarbeiten und anderen Instandhaltungsmaßnahmen zur kurzfristigen Erhöhung der Planbelegungszeit und damit auch der Netto-Produktionszeit. Bei überstrapazierter Anwendung dieser Maßnahme drohen Folgekosten durch eine Senkung der Overall Equipment Effectiveness (OEE). | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung der Netto-Produktionszeit - Kurzfristig anwendbar |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Geringerer Abnutzungsvorrat - Vorzeitiges Erreichen der Abnutzungsgrenze - Folgekosten durch verschlechterte Produkt & Prozessqualität - Erhöhter Ausschuss und dadurch zusätzliche Fertigungskapazitäten notwendig (OEE-Verringerung) |
| Literatur | |
| <p>Z. Zhang, L. Yang (2021): State-Based Opportunistic Maintenance With Multifunctional Maintenance Windows</p> <p>H. Biedermann, A. Kinz (2021): Agiles, lern- und wertschöpfungsorientiertes Instandhaltungsmanagement</p> <p>L. Li , Q. Chang , J. Ni, S. Biller (2009): Real time production improvement through bottleneck control, International Journal of Production Research</p> | |

| | | |
|---------------------|--|-----------------|
| Bezeichnung | Einrichtung einer Parallelstrecke | Nr. 12.0 |
| Synonyme | Parallel assembly line, Parallele Fertigungsstraße | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Technik | |

| | |
|--|---|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ○ (mittel) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (gut) |
| Handhabung | ● ● ① (moderat bis einfach) |
| Kosten | ● ① ○ (hoch bis mittel) |
| Ziel | |
| Die Einrichtung einer Parallelstrecke bewirkt eine Kapazitätserhöhung der Fertigungslinie. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Durch das Einrichten einer Parallelstrecke können mehrere Aufträge gleichzeitig bearbeitet werden, was zu einer höheren Ausbringung führt. Durch das erhöhte Kapazitätsangebot besteht die Möglichkeit, flexibler auf Auftragschwankungen zu reagieren. Zudem können Synergieeffekte genutzt werden. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Verwendung gemeinsamer Ressourcen - Flexibilitäts-, Kapazitätserhöhung |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Investitionskosten - Langfristige Maßnahme |
| Literatur | |
| H. Aguilar, A. García-Villoria, R. Pastor (2019): A survey of the Parallel Assembly Lines Balancing Problem | |

| | | |
|---------------------|---|-----------------|
| Bezeichnung | Leistungsstarke Mitarbeitende am Engpass einsetzen | Nr. 13.0 |
| Synonyme | High-Performer | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Einfluss | Mensch | |

| | |
|--|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ① (mittel bis gut) |
| Handhabung | ● ● ① (moderat bis einfach) |
| Kosten | ● ● ① (mittel bis gering) |
| Ziel | |
| Die Einbeziehung der leistungsstärksten Mitarbeitenden an Engpässen führt zur optimalen Nutzung begrenzter menschlicher Kapazitäten und ermöglicht dadurch eine Anpassung der Taktzeiten. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Die Leistungsfähigkeit von Arbeitnehmenden ist oft stark variabel. Eine Analyse von Leistungsdaten oder die Verwendung von Erfahrungswerten kann dazu beitragen, leistungsstarke Mitarbeitende zu identifizieren und gezielt an Engpässen einzusetzen, um die Durchsatzrate zu erhöhen. Gleichzeitig wird jedoch die Taktzeit an der unkritischen Arbeitsstation erhöht. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Durchsatzerhöhung durch eine Verringerung der Zykluszeit - Taktausgleich durch das Verschieben von Leistungsmerkmalen |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Leistungseinbußen durch Einarbeitungszeit - Senkung der Zufriedenheit der Mitarbeitenden bei Arbeitsplatzwechsel |
| Literatur | |
| E. M. Goldratt (1990): Theory of Constraints | |
| U. Techt (2007): Produktivitätssteigerung: Den Engpass in fünf Schritten überwinden | |

| | | |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Bezeichnung | Springereinsatz | Nr. 14.0 |
| Synonyme | Springer, Jumper, Personalreserve | |
| Pufferart | Kapazität | |
| MTO-Analyse | Organisation | |

| | |
|---|--|
| Bewertung | |
| Zeit | ● ● ● (kurzfristig) |
| Wirksamkeit | ● ● ● (mittel bis gut) |
| Handhabung | ● ● ● (moderat bis einfach) |
| Kosten | ● ● ○ (mittel) |
| Ziel | |
| Ziel des Springereinsatzes ist es, kurzfristig durch einen Kapazitätsüberschuss eine Taktzeitreduzierung zu erzielen oder einen Taktzeitabfall auszugleichen, sodass der Ausbringungsverlust durch einen Engpass reduziert wird. | |
| Kurzbeschreibung | |
| Springer sind eingeplante Personalüberschüsse, welcher in der Produktion genutzt werden können, um an einzelnen Arbeitsstationen kurzfristig die Kapazität zu erhöhen oder auszugleichen. Hierdurch kann kurzfristig eine Taktzeitreduzierung oder ein Taktzeitausgleich entstehen, sodass eine Arbeitsstation schneller produziert. Personen, die als Springer eingesetzt werden, zeichnen sich durch ein erhöhtes Fachwissen und hohe Flexibilität aus (z.B. Vorarbeitende, Meister:innen, Teamleitende), sodass sie jederzeit eine neue Arbeitsaufgabe bewerkstelligen können. | |
| Potenziale und Risiken | |
| Potenziale | <ul style="list-style-type: none"> - Taktzeitreduzierung bei Engpassstationen möglich - Ausgleich von Taktzeitabfällen z.B. durch Ausfall von Mitarbeitende oder Verteilzeiten - Kurzfristig einsetzbar |
| Risiken | <ul style="list-style-type: none"> - Zusätzliche Personalkosten - Erhöhtes Fachwissen und erhöhte Flexibilität notwendig |
| Literatur | |
| Reinhart, Teubner, Dollinger, Vernim (2018): Mitarbeiterorientiertes Produktionsmanagement. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Tu, J.; Zhang, L. (2022): Performance analysis and optimisation of Bernoulli serial production lines with dynamic real-time bottleneck identification and mitigation. In: International Journal of Production Research 60, S. 3989-4005 | |

Herausgeber & Kontaktperson:

RIF Institut für Forschung und Transfer e.V.

Joseph-von-Fraunhofer-Straße 20

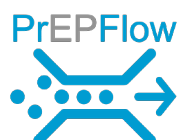
44227 Dortmund

joern.schwenken@aps.rif-ev.de

Forschungsprojekt PrEPFlow

www.rif-ev.de

Erstellt am: 20.06.23



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

DATA-DRIVEN APPROACH FOR DIAGNOSTIC ANALYSIS OF DYNAMIC BOTTLENECKS IN SERIAL MANUFACTURING SYSTEMS

Nikolai West

Institute of Production Systems
Technical University Dortmund
Dortmund, Germany

RIF Institute for Research and Transfer e.V.
Work and Production Systems
Dortmund, Germany

nikolai.west@tu-dortmund.de
0000-0002-3657-0211

Jörn Schwenken

Institute of Production Systems
Technical University Dortmund
Dortmund, Germany

RIF Institute for Research and Transfer e.V.
Work and Production Systems
Dortmund, Germany

joern.schwenken@ips.tu-dortmund.de
0000-0003-2549-9664

Jochen Deuse

Institute of Production Systems
Technical University Dortmund
Dortmund, Germany

University of Technology Sydney
Advanced Manufacturing
Sydney, Australia

jochen.deuse@ips.tu-dortmund.de
0000-0003-4066-4357

ABSTRACT

A variety of established approaches exist for the detection of dynamic bottlenecks. Furthermore, the prediction of bottlenecks is experiencing a growing scientific interest, quantifiable by the increasing number of publications in recent years. Neglected, on the other hand, is the diagnosis of occurring bottlenecks. Detection methods may determine the current location of a bottleneck, while predictive approaches may indicate the location of an upcoming bottleneck. However, mere knowledge of current and future bottlenecks does not enable concrete actions to be taken to avoid the bottlenecks, nor does it open up any immediate advantage for manufacturing companies. Since small and medium-sized companies in particular have limited resources, they cannot implement improvement measures for every bottleneck that occurs. Due to the shifts of dynamic bottlenecks, the selection of the most suitable stations in the value stream becomes more difficult. This paper therefore contributes to the neglected field of bottleneck diagnosis. First, we propose two data-driven metrics, relative bottleneck frequency and relative bottleneck severity, which allow a quantitative assessment of the respective bottleneck situations. For validation purposes, we apply these metrics in nine selected scenarios generated using discrete event simulation in a value stream with a serial manufacturing line. Finally, we evaluate and discuss the results.

Keywords Bottleneck analysis · Dynamic bottlenecks · Shifting bottlenecks · Bottleneck detection · Bottleneck diagnosis · Throughput · Theory of constraints · Discrete event simulation

1 Introduction

The diagnosis of throughput-limiting bottlenecks is essential for manufacturing companies that want to maintain a high degree of production efficiency. According to the **Theory of Constraints (TOC)**, every system is inevitable limited by a bottleneck, which must be identified and optimized to improve the systems overall output [1]. Since the TOC is considered universally applicable, its rules apply to manufacturing systems as well. TOC has been the subject of on-going research efforts for several decades. In all but the most simple manufacturing systems, bottlenecks are not static, but change dynamically [2]. A particular challenge arises due to this shifting behavior of manufacturing bottlenecks. Due to the increasing demand for flexibility and due to the rising complexity in interconnected value streams, the variability in modern value streams increases as well. Shifting behavior is considered an important underlying principle for dealing with manufacturing bottlenecks. Thus, most scientific work has primarily dealt with two questions:

- **Detection:** Where is the bottleneck at this moment?
- **Prediction:** Where is the bottleneck going to be next?

Several methods exist to detect the current location of a bottleneck [3]. These methods are either based on a momentary snapshot of the current conditions of the manufacturing system or they are based on an averaged evaluation of a given period of past system behavior [4]. Due to its good applicability for dynamic bottlenecks [5], we are going to apply the **Active Period Method (APM)** in this paper [2]. APM considers the station with the longest active operating time as the current bottleneck. We further elaborate the usage of the method in **Section 2.2**.

Due to the emerging capabilities in analyzing large volumes of data using machine learning and artificial intelligence, research in recent years mainly aims to predict the future location of a bottleneck. The evolving possibilities of intelligent and data-driven analyses are being used for this purpose. Even though the research field is still rather young, there are several promising approaches for making data-driven predictions of future bottleneck events [6, 7, 8]. Similar to detection, such bottleneck prediction requires data-driven diagnostic tools to evaluate different scenarios. As such, we emphasize the need for bottleneck diagnosis, which has been neglected so far.

- **Diagnosis:** What are the effects of occurring bottlenecks?

The remainder of this paper is organized as follows. First, we introduce fundamentals of Bottleneck Analysis (**Section 2**). We discuss a holistic model, bottleneck detection with AMP and the universal need for bottleneck diagnosis. Then, we propose two statistical metrics for bottleneck diagnosis and explain the calculations for bottleneck frequency and severity (**Section 3**). To validate these metrics, we apply them in a number of simulations. For this purpose, we outline the nine selected scenarios in the next chapter (**Section 4**). At last, we present the results of the application (**Section 5**) and discuss the results with a brief outlook on follow-up work (**Section 6**).

2 Fundamentals

2.1 Four steps of a holistic Bottleneck Analysis

Bottleneck Analysis is a complex process that requires a well-structured methodology to ensure that all necessary tasks are completed in a successive and goal-oriented manner. Within this paper, we follow a holistic model for Bottleneck Analysis to distinguish four major steps: Bottleneck detection, diagnosis, prediction, and prescription [4]. **Figure 1** depicts the four steps in the context of actionable and anticipative results.

The first step, **Bottleneck Detection**, is akin to descriptive analytics and fulfills a declarative task during Bottleneck Analysis. It involves the concise determination of the current bottleneck in the manufacturing system, based on information about the system's status. To identify bottlenecks, different methods may be applied, such as machine states, buffer level, or process times [3, 9]. We propose using a Momentary Value Method to identify bottlenecks in real-time, as they can identify a bottleneck at any point in time, whereas Average Value Methods rely on arbitrary periods of system observations [5].

The second step, **Bottleneck Diagnosis**, originates from diagnostic analysis and primarily addresses an assessment task during Bottleneck Analysis. The goal of this step is to evaluate and assess the cause and effect of observed bottlenecks [4]. The diagnosis of bottlenecks is the focus of this paper and will be explained in more detail later on. Our main goal is to standardize future work by developing two simple metrics to quantify bottleneck impacts. In the past, diagnosis was usually either neglected or performed based on qualitative estimates that included consultation with experts of the manufacturing system.

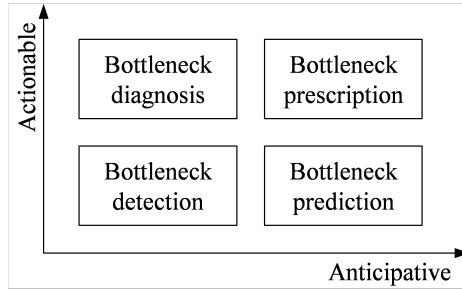


Figure 1: Depiction of the four steps for Bottleneck Analysis in the context of actionable and anticipative results [4]

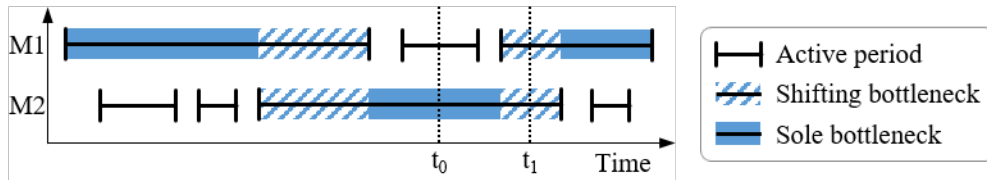


Figure 2: Exemplary visualization of the active periods for two stations $M1$ and $M2$ with a shifting bottleneck [2]

The third step, **Bottleneck Prediction**, relates to predictive analytics and fulfills an anticipatory task during Bottleneck Analysis. Its goal is to determine the future performance within complex manufacturing systems. The prediction step requires prior implementation of a real-time bottleneck detection system and can be achieved by predicting future machine states, buffer level, and numeric forecast of the development of interdeparture time variances. However, further research is necessary to develop prediction methods for Bottleneck Analysis.

Lastly, the fourth step, **Bottleneck Prescription**, is similar to prescriptive analytics and fulfills a preemptive task during Bottleneck Analysis. It involves using intelligent system control to mitigate bottlenecks, such as bottleneck-centered production control systems. Although most approaches consider systems that are geared to past system states, we suggest using Bottleneck Diagnosis and Prediction to ensure that the system is up-to-date and responsive to changing conditions.

In conclusion, the four steps help to manage and utilize the potential of Bottleneck Analysis in manufacturing. The holistic model may still be novel, but it has been included in a number of works in the past years [10]. For a more extensive review of the bottleneck literature, we refer to the excellent literature review in [11]. For this paper, we conclude that Bottleneck Analysis is a continuous process that requires constant attention to ensure the efficient operation of a manufacturing system.

2.2 Bottleneck detection using the longest active period

The method presented below is one possible approach to detect bottlenecks. As mentioned in the introduction, there are several different methods to detect bottlenecks. For a detailed comparison of the methods, we therefore refer to [5] and [12].

The Active Period Method (APM) is a method used for bottleneck detection in manufacturing systems. According to the APM, a bottleneck is the station in the value stream that has been working the longest without interruptions. This duration is then called the active period of the station. A station is considered active if it is processing products as defined by the production program. On the other hand, a station is considered to be inactive if it is waiting due to buffer-related starvation or blockage [2, 13]. A station is blocked if the downstream buffer is filled to the maximum. Likewise, a station is starved if the upstream buffer is empty and cannot supply another part or product to the next station. APM also incorporates shifting states of a bottleneck to determine whether a station is the sole bottleneck or a shifting bottleneck. Shifting behavior occurs at the overlap of the current and the subsequent bottleneck. Figure 2 shows an illustrative example of the active periods for two stations $M1$ and $M2$. Here, at t_0 the station $M2$ is the sole bottleneck. While at t_1 both $M1$ and $M2$ have become shifting bottlenecks [2].

Summarizing, the main advantage of APM is that it is easy to apply and requires neither extensive analysis nor complex mathematical modeling. In addition, as a non-invasive method, APM does not require shutting down the manufacturing system to collect data. Overall, APM is a simple and useful method to detect bottlenecks in manufacturing systems [5].

2.3 On the need for metrics for bottleneck diagnosis

While both bottleneck detection and prediction receive considerable attention in the scientific discourse, bottleneck diagnosis has been widely neglected. Nevertheless, some approaches to performing a diagnosis do exist. In an early work, [14] propagate a simple visual evaluation for the Bottleneck Analysis to determine the effects of the bottleneck stations. Using an average-based performance metric, such as the utilization, it was then possible to quantify the bottleneck effect of individual stations. In a promising paper, [15] use a clustering-based approach to prioritize maintenance activities. Through the unsupervised approach, maintenance practitioners are provided with information on the maintenance-related diagnostic insights into bottlenecks. [16] include a diagnostic examination in their digital twin based framework for throughput bottlenecks. This is intended to prepare manufacturing companies for the digital transformation and to enable them to ‘utilize the wealth of enterprise information’. Common to all previous approaches is a lack of a metric to easily compare bottleneck effects. Two such metrics are developed in this paper and further elaborated in **Section 3**.

As shown in **Figure 1**, both bottleneck detection and prediction have a limited degree of actionability. In contrast, a targeted diagnosis of existing bottlenecks opens up the possibility of prioritizing measures to reduce the overall effects of bottlenecks. This is especially relevant in scenarios characterized by dynamic bottlenecks and a finite amount of resources:

- **Dynamic behavior:** Since any station can become the bottleneck in systems with dynamic shifting, the focus of improvement activities must be changed on a regular basis.
- **Finite resources:** Since the resources that are available for improvement are limited, the activities must be concentrated on the stations most heavily affected by bottleneck behavior.

Summarizing, a successful bottleneck diagnosis is a critical step in improving the performance of a system or process, and it is essential for organizations that want to remain competitive and efficient in today’s fast-paced business environment.

3 Metric proposal

As previously mentioned, the focus of this paper is on two simple metrics for evaluating bottleneck behavior. The metrics are intended to enable users to evaluate detected bottlenecks in order to select improvement measures in a targeted manner and maximize the impact of these measures. Therefore, both metrics are used in deterministic calculations that we explain next.

3.1 Relative bottleneck frequency

We refer to the first metric used to diagnose bottlenecks as **relative bottleneck frequency** or rbf . This metric uses the intuitive approach of determining how often an individual station or machine occurs as a bottleneck during the period under consideration. This simple idea builds on the fundamental assumption of TOC that there can only be one bottleneck at any given time. Let S be a station in a manufacturing system. Then rbf_S represents the relative bottleneck frequency for S . The analysis takes place for a defined period of time t of a fixed length n . At each point in time t_i , the current bottleneck of the entire system needs to be determined. Conceptually, there are no restrictions in the choice of methods as long as they clearly identify a single station as a bottleneck for each time point. Then, we can determine how often S appears as a bottleneck during t . We call this value the (total) bottleneck frequency bf_S . It is calculated as the quotient of the number of times at which S is the bottleneck during t and n , the total length of t . **Equation 1** and **Equation 2** show the mathematical calculation of the relative bottleneck frequency.

$$\mathbf{S} = \sum_{0 < i < n} \begin{cases} 1 & : \text{if } S \text{ is bottleneck at } t_i, \\ 0 & : \text{else.} \end{cases} \quad (1)$$

$$rbf_S = \frac{bf_S}{n} \quad (2)$$

The following applies to the value range rbf_S in $(0, \dots, 1)$. During bottleneck diagnosis, rbf has to be determined for each S . The higher rbf_S , the more frequently S occurs as bottleneck. The case of rbf having a value of 1 implies a static bottleneck on S , while an rbf_S of 0 corresponds to S never becoming a bottleneck. In addition, the sum of the rbf_S of all stations in the value stream under consideration must always add up to 1.

3.2 Relative bottleneck severity

While relative bottleneck severity is well suited to evaluate an observation period, it fails when examining individual points in time. This dilemma is already known from the detection of bottlenecks. Here, momentary value methods in particular prove useful because, in contrast to average value methods, they do not require any information about past system states. For this reason, we propose a second metric, the **relative bottleneck severity** or rb_s , that is based only on the current system state.

Like rbf , rb_s is determined for each station S in the value stream. The determination of the severity is based on the respective characteristic of the selected bottleneck detection method. For the purpose of illustration, we will explain the calculation of rb_s using the APM as an example. To apply the APM, the duration of the active operating period of all stations is known at each point in time. We refer to this duration as bs_S for each S . Since the bottleneck station is characterized by the longest active operating period, we refer to this value as bs_{BN} .

$$rb_{sS} = \frac{bs_S}{bs_{BN}} \quad (3)$$

rb_s has the same range of values as rbf of $(0, \dots, 1)$, but the sum of rb_{sS} for all stations S can be greater than 1 (**Equation 3**). The station occurring as the bottleneck at the time t_i of the analysis has an rb_s value of 1, because $bs_S=bs_{BN}$ must always be valid for this station. The rb_s value of the other stations then indicates the severity of their current impact on the bottleneck. The closer the rb_s value is to 1, the more severe is the impact on the system.

While we have explained the calculation of rb_s for APM only, in principle other detection methods can also be used to determine rb_s . For example, the interdeparture time variance that relies on the stations' current processing times [3] or an adaption of the bottleneck walk that considers the current buffer level before and after each station could be utilized as well.

4 Simulation scenarios

To demonstrate the usability of the two metrics rbf and rb_s , we apply them in nine exemplary scenarios in this section. We generated the manufacturing data ourselves using a discrete event simulation. In order to obtain comprehensible results from the metrics, we apply them in simple flow lines with seven fully interlinked stations. We separate nine scenarios in three main categories ($S1$, $S2$, $S3$), each consisting of three scenarios.

- **S1:** No station receives an increased process time pt , instead the variability var of the process times is changed in each scenario by 25% ($S1-1$, $S1-2$ and $S1-3$).
- **S2:** One station receives an additional increase of 12.5% to its average process time, and we change the location of this station in each scenario ($S2-1$, $S2-2$ and $S2-3$).
- **S3:** Two stations receives an additional increase of 12.5% to their average process times, and we change the location of these stations in each scenario ($S3-1$, $S3-2$ and $S3-3$).

To be able to represent the scenarios in later representations we use a simplified notation. A '□' corresponds to a simple station, while a '■' corresponds to a station with additional process time. Buffers between stations are represented by a '—'.

Table 1 shows the nine scenarios in our simplified notation. Furthermore, the simulation required several assumptions. We set the process time pt of every station to 2.00. Every modified station ■ in all scenarios of $S2$ and $S3$ then has a pt of 2.25. Furthermore, the maximum capacity of all buffers is set to 5 units and the system's boundaries as set to infinite, providing an unlimited supply of parts and demand for products. Each simulation scenario is run 10 times. The simulation receives a settling time of 2,000 time steps, which are then removed from the analysis. Each scenario corresponds to a one-week observation period with 10,080 individual observations each.

The simulation scenarios are implemented using `simpy` (v4.0.1), a library for discrete event simulation in Python [17]. The raw data of the 90 simulation runs (from nine scenarios with ten simulation runs each) on which the analysis is

Table 1: Tabular representation of the nine scenarios in the simplified value stream notation

| Name | Scenario | |
|------|---------------------------------|-------------|
| | Setup of the manufacturing line | Variability |
| S1-1 | □-□-□-□-□-□-□ | Low |
| S1-2 | □-□-□-□-□-□-□ | Medium |
| S1-3 | □-□-□-□-□-□-□ | High |
| S2-1 | □-■-□-□-□-□-□ | Medium |
| S2-2 | □-□-□-■-□-□-□ | Medium |
| S2-3 | □-□-□-□-□-■-□ | Medium |
| S3-1 | □-□-■-□-■-□-□ | Medium |
| S3-2 | □-■-□-□-□-■-□ | Medium |
| S3-3 | ■-□-□-□-□-□-■ | Medium |

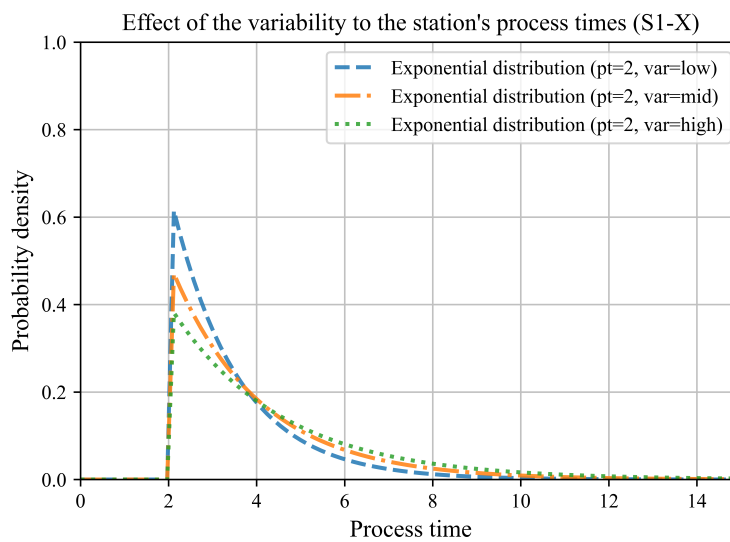


Figure 3: Visualization of the effect of the process time distribution and the applied variability

based, as well as the code used to produce the following results, can be found in the publicly available project repository for this paper.

https://github.com/nikolaiwest/2023_bottleneck_diagnosis_arxiv

To achieve a realistic system behavior, variability must be applied to the stations' process times. For this purpose, we use an exponential distribution, since it most closely corresponds to stations affected by failure or delay. **Figure 3** and **Figure 4** serve to illustrate the exponential distribution of the process times. An increase in variability leads to a more frequent occurrence of longer process times. This corresponds to effective downtime due to unforeseen influences. Naturally, the 12.5% increase in process times leads to a tendency for process times to shift towards longer times. The expected times are always higher than they would be without the process time addition. While we do not anticipate a dominant bottleneck in *S1*, we expect that in *S2* and *S3*, the ■ stations will increasingly stand out as bottlenecks.

5 Results

First, we consider the evaluation of the relative bottleneck frequencies. For this purpose, **Figure 5**, **Figure 6** and **Figure 7** show the three scenarios of the main categories, averaged for ten simulation runs. As expected, in no scenario of group *S1* does a station have a higher tendency to show bottleneck behavior. Despite process times influenced by variance, the *rbf* for the three scenarios is about 0.15 for all seven stations which reflects a random spread.

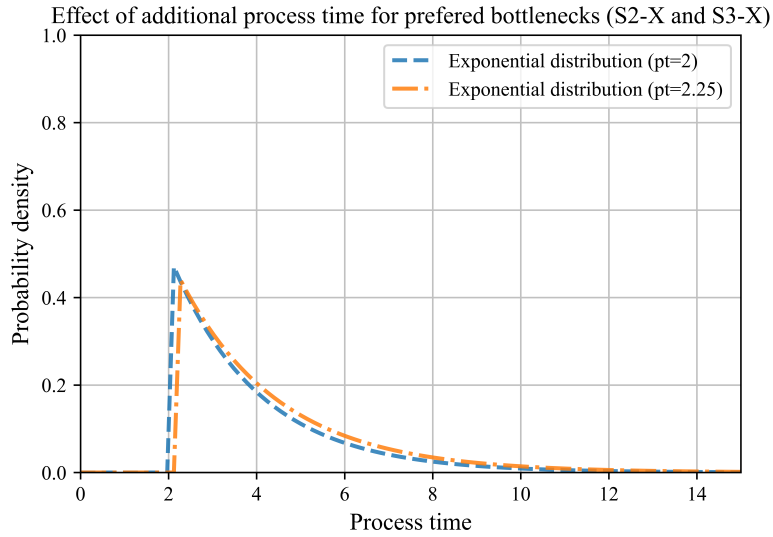


Figure 4: Visualization of the effect of the additional process time for targeted bottleneck stations

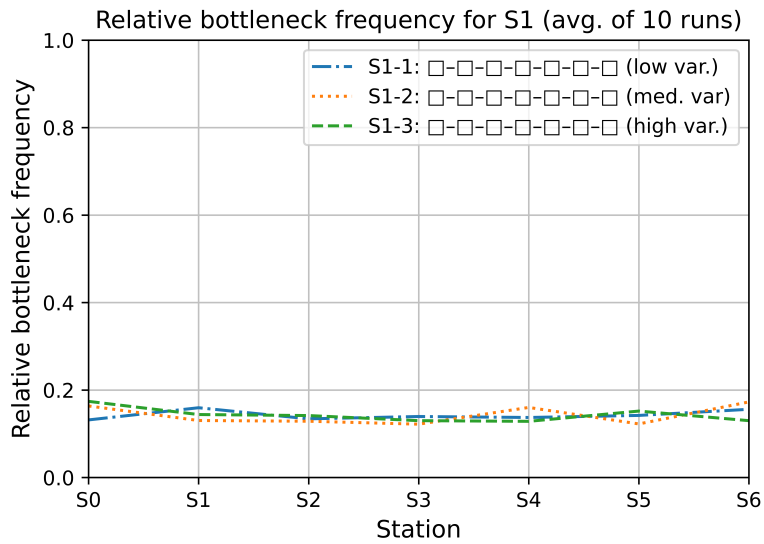


Figure 5: Relative bottleneck frequency for S1-1, S1-2 and S1-3

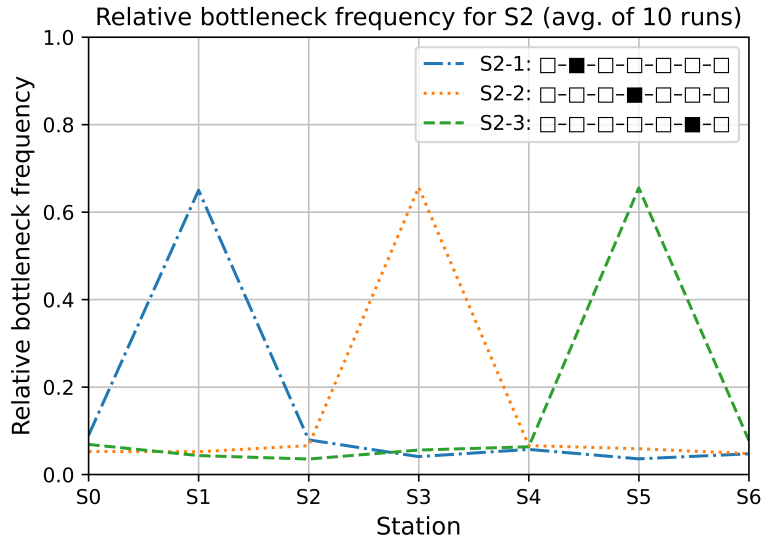


Figure 6: Relative bottleneck frequency for S2-1, S2-2 and S2-3

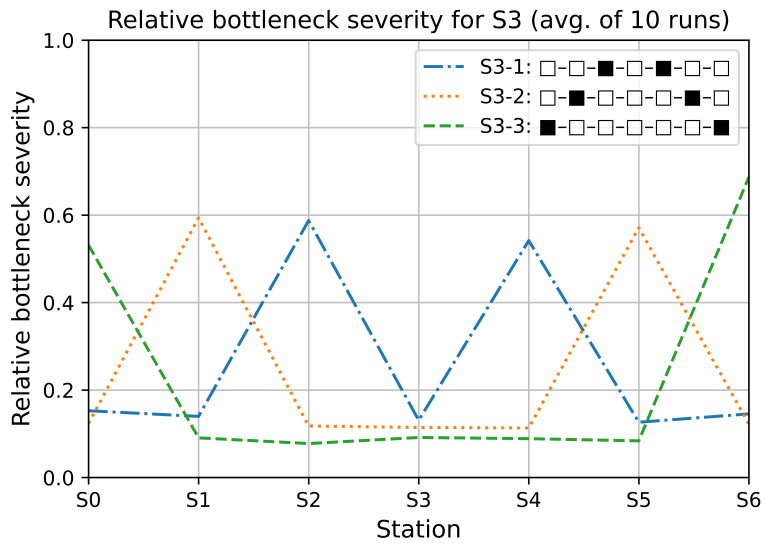
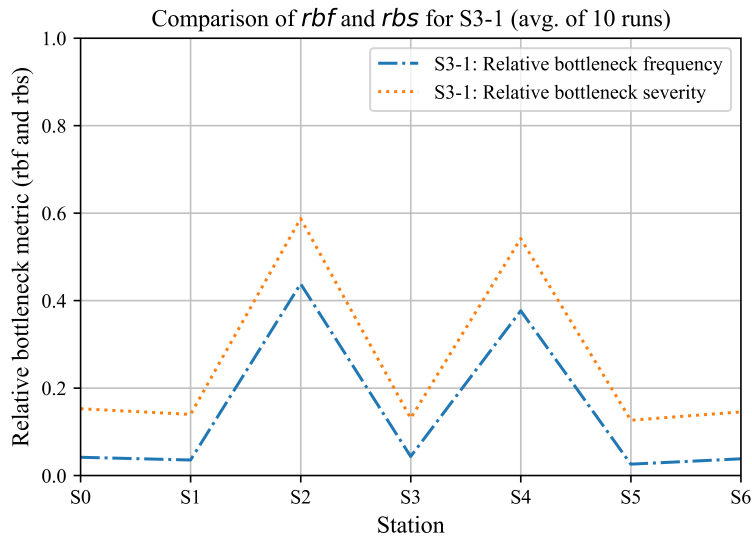


Figure 7: Relative bottleneck frequency for S3-1, S3-2 and S3-3

Figure 8: Exemplary comparison of rbf and rbs for $S3-1$

The case is different for the six scenarios of the groups $S2$ and $S3$. Again, we show the average results from ten simulation runs, each with 10,000 steps. Here, the stations, marked by ■, with additional process time can be frequently identified as bottlenecks on the basis of rbf . Consequently, $S1$ is highlighted in $S2-1$, $S3$ in $S2-2$, and $S5$ in $S2-3$. With a value of about 0.65, the three stations in $S2-1$, $S2-2$ and $S2-3$ show the corresponding station as a bottleneck. Similarly, both modified stations in $S3-1$, $S3-2$, and $S3-1$ are characterized by equally frequent bottlenecks. Since there are two alternating bottlenecks, the rbf value of 0.4 is, as expected, below the value of systems with only one main bottleneck. Overall, we summarize that both the expected hypotheses about the system behavior have been met and the rbf metric contributes to a clear detection and quantitative of the bottleneck stations.

We refrain from visualizing all nine scenarios for the corresponding rbs values in this paper for reasons of space. The metric values behave quite similar and can be viewed in the published project repository. Instead, we show a single exemplary comparison for scenario $S3-1$ in **Figure 8**. The rbs is continuously above the rbf , but just so marks the two stations $S2$ and $S4$, changed to $S3-1$, as bottlenecks. In this averaged representation over the entire period, rbs is very similar to rbf .

The benefit of the rbs becomes apparent when viewed in individual time steps. **Figure 9** shows a period of a bottleneck shift taking place. For the sake of clarity, we limit the visualization to stations $S3$ to $S6$. At a time of about 997, the current bottleneck shifts from $S4$ to $S6$. Thus, the rbs of $S4$ drops to 0 and the rbs of $S6$ changes to 1. The other stations change relative to the rbs of $S6$. Consequently, in a consideration in momentary terms, $S4$ becomes the best target for immediate improvement measures up to time of 997, while $S6$ is already emerging as the successor bottleneck, marked by a comparatively high rbs value.

6 Conclusion

With rbf and rbs , two novel metrics for the diagnosis of dynamic bottlenecks were proposed in this paper. The metrics extend the field of bottleneck research, which has mainly been characterized by a focus on bottleneck detection and prediction. The metrics provide by a simple and practical way to quantify bottleneck behavior of a manufacturing system. While relative bottleneck frequency can be used to evaluate long-term periods of observation, the relative bottleneck severity allows for an examination of current points in time. The code underlying the simulation and the subsequent evaluations for the calculation of the active periods, relative bottleneck frequency and relative bottleneck severity were made freely publicly available.

With regard to a promising possibility for the development of bottleneck metrics, we note at this point the not yet given possibility for the monetary evaluation of occurring bottlenecks. Only by determining availability losses in near-real time monitoring, it is possible to evaluate the monetary costs of bottleneck behavior. This provides an important argument when constructive or organizational improvement measures have to be selected and granted to deal with the bottlenecks. Thus, in a continuation of metrics for evaluating bottleneck states, a monetary quantification of throughput

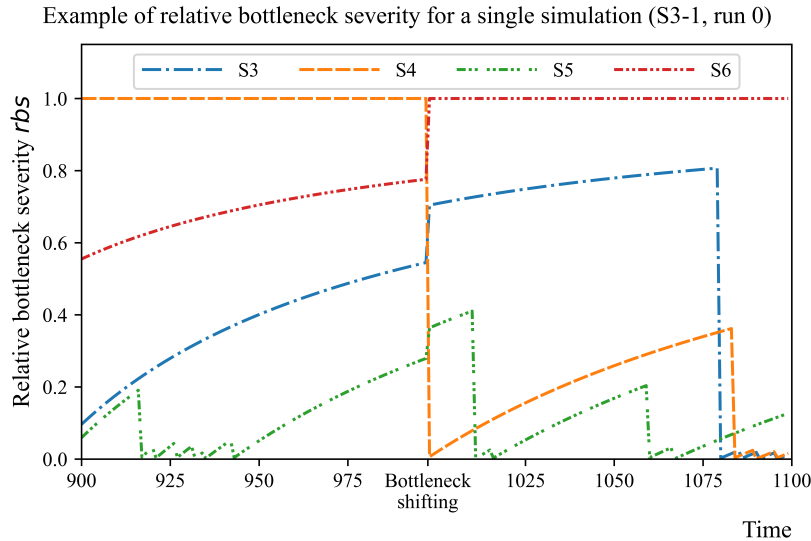


Figure 9: Exemplary view of the rbs in S3-1 for a time interval between 900 and 1100

losses due to bottleneck events should be considered. This allows a consideration of the potential costs for the remedial measures of the bottlenecks and the costs due to the throughput losses that occur.

Finally, we emphasize the untapped potential of bottleneck prescription. To implement intelligent system, which reacts independently to occurring bottlenecks with appropriate measures, a data-driven way for the evaluation of bottleneck conditions is required. Since such a system must also operate under resource constraints, the question of prioritizing emerging bottlenecks also arises here. In times of an increasing demand for sustainable and resource-efficient manufacturing systems, we foresee that the field of Bottleneck Analysis will continue to gain importance in the future.

Acknowledgments

This paper is part of the project ‘Prediction of dynamic bottlenecks in directed material flow systems using machine learning methods’ (PrEPFlow, 21595), which is funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), through the Working Group of Industrial Research Associations (AIF). It is carried out on behalf of the German Logistics Association e.V. (BVL) and it is part of the program for promotion of joint industrial research and development (IGF) based on a resolution of the German Bundestag.

References

- [1] E. M. Goldratt and J. Cox. *The Goal: Excellence in Manufacturing*. North River Press Inc., Croton-on-Hudson, NY, 1984.
- [2] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka. Shifting bottleneck detection. In *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pages 1079–1086, 2002.
- [3] C. E. Betterton and S. J. Silver. Detecting bottlenecks in serial production lines: A focus on interdeparture time variance. *International Journal of Production Research*, 50(15):4158–4174, 2012.
- [4] N. West, M. Syberg, and J. Deuse. A holistic methodology for successive bottleneck analysis in dynamic value streams of manufacturing companies. In A.-L. Andersen et al., editors, *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems*, pages 612–619. Springer Nature Switzerland, Cham, CH, 2022.
- [5] N. West, J. Schwenken, and J. Deuse. Comparative study of methods for the real-time detection of dynamic bottlenecks in serial production lines. In H. Fujita, Philippe Fournier-Viger, M. Ali, and Y. Wang, editors, *Advances and Trends in Artificial Intelligence: Theory and Practices in Artificial Intelligence*, pages 3–14. Springer Nature Switzerland AG, Cham, CH, 2022.

- [6] S. Lin, J. Liu, and S. Li. Production bottleneck prediction of multi-variety and small batch production workshop. *Journal of Physics: Conference Series*, 2187(012057):1, 2022.
- [7] E. Rocha and M. J. Lopes. Bottleneck prediction and data-driven discrete-event simulation for a balanced manufacturing line. *Procedia Computer Science*, 200:1145–1154, 2022.
- [8] van Bui, N. T. Le, H. van Nguyen, J. Kim, and Y. M. Jang. Multi-behavior with bottleneck features lstm for load forecasting in building energy management system. *Electronics (MDPI)*, 10(1026):1–19, 2021.
- [9] C. Yu and A. Matta. A statistical framework of data-driven bottleneck identification in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 54(21):6317–6332, 2016.
- [10] E. Mahmoodi, M. Fathi, and M. Ghobakhloo. The impact of industrie 4.0 on bottleneck analysis in production and manufacturing: Current trends and future perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 174(108801):1–16, 2022.
- [11] M. Subramaniyan, A. Skoogh, J. Bokrantz, M. A. Sheikh, M. Thürer, and Q. Chang. Artificial intelligence for throughput bottleneck analysis: State-of-the-art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 60:734–751, 2021.
- [12] D. Zhao, X. Tian, and J. Geng. A bottleneck detection algorithm for complex product assembly line based on maximum operation capacity. *Mathematical Problems in Engineering*, 258173:1–9, 2014.
- [13] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka. Detecting shifting bottlenecks. In *International Symposium on Scheduling*, pages 1–4, 2002.
- [14] J. Zhou, J. X. Deng, P. L. Huang, Z. Q. Liu, and X. Ai. Integrated analysis method: Visual modelling, simulation, diagnosis and reduction for bottleneck processes of production lines. *Iranian Journal of Science and Technology*, 30(B3), 2006.
- [15] M. Subramaniyan, A. Skoogh, A. S. Muhammad, J. Bonkrantz, B. Johansson, and C. Roser. A data-driven approach to diagnosing throughput bottlenecks from a maintenance perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 150(106851):1–14, 2020.
- [16] M. Kumbar, A. H. C. Ng, and S. Bandaru. A digital twin based framework for detection, diagnosis and improvement of throughput bottlenecks. *Journal of Manufacturing Systems*, 66:92–106, 2023.
- [17] Team SimPy. *SimPy: Documentation*. Release 4.0.2.dev1+g2973dbe.

Multivariate time series forecasting for multi-step prediction of throughput bottlenecks using Long Short-Term Memory networks

^[1,2]Nikolai West, ^[1,3]Jochen Deuse

^[1]Institute of Production Systems, Technical University Dortmund, Dortmund, Germany

^[2]RIF Institute for Research and Transfer e.V., Work and Production Systems, Dortmund, Germany

^[3]University of Technology Sydney, Advanced Manufacturing, Sydney, Australia

nikolai.west@tu-dortmund.de, jochen.deuse@ips.tu-dortmund.de

Abstract—Manufacturing companies require an effective approach to predicting bottlenecks in order to proactively initiate improvement actions that prevent throughput losses before they occur. This paper presents a novel method for predicting dynamic bottlenecks in manufacturing systems. The approach is based on multivariate prediction of multi-step bottleneck activity, using buffer levels and past bottleneck behavior. A Long Short-Term Memory network is used to accomplish the prediction. The approach is presented descriptively using a simulated manufacturing system consisting of five stations and six buffers. The discrete event simulation, all generated manufacturing data, as well as the full code of the analysis, are made freely available in the documentation for this paper. The exemplary application of the case study shows that the proposed approach is effective in predicting future bottleneck locations. In a ten-fold cross-validation, the prediction achieves an average ratio of 95.23% correctly predicted bottlenecks for a forecasting horizon of 30 steps. To make the results comparable and generally usable, four comprehensive benchmarks are presented with approaches that do not use Machine Learning methods. To summarize the research, the paper provides a contribution to the manufacturing industry by enabling proactive decision-making for process improvement and optimization.

Keywords—Active period method, bottleneck prediction, long short-term memory networks, time series forecasting.

I. INTRODUCTION

Data science tools and methods have a long tradition in predicting various metrics and events in manufacturing, such as the wear-related behavior of technical equipment in maintenance [1]. This area is often referred to as *Predictive Maintenance* and its potential is undisputed due to numerous successful implementations in the manufacturing industry. A closely related approach in terms of the data analytical challenges is the *Bottleneck Prediction*. While this is not yet as widespread as predictive maintenance, it also has significant potential to save resources in the manufacturing industry [2]. In order to achieve long-term production efficiency, companies must ensure flexibility with regard to high product variety, while at the same time handling the increasing complexity of production planning and control.

For state-of-the-art manufacturing companies facing these challenges, Bottleneck Prediction is of particular relevance. According to the *Theory of Constraints*, the performance of any system is inevitably limited by exactly one bottleneck [3]. Only measures to reduce this bottleneck's effect provide an effective way to increase systemic output since any measure taken on any other section in the value stream do not increase the overall throughput.

The dynamic nature of bottlenecks in manufacturing

presents additional difficulties in dealing with them. Instead of being confined to only one station, the bottlenecks in manufacturing systems often switch between different locations. This behavior is called *Shifting Bottlenecks* and is caused by variability-related effects in all but the most simplistic real-world systems [4]. Various approaches exist in the literature for a real-time identification of bottlenecks that can account for dynamic behavior, which we briefly discuss in **Chap. II**.

In practice, identifying a bottleneck is not sufficient to achieve any improvements of efficiency. Just as in Predictive Maintenance, the identification constitutes only as a reactive measure. E.g. wear-related equipment failure is accompanied by losses in availability and throughput. The same applies to the occurrence of bottlenecks: The presence of a bottleneck is inevitably associated with a limitation of the entire system due to the fundamental assumption of TOC. Any corrective measures to a bottleneck after its identification is therefore always a reactive one. Maintenance has shown that such predictive measures can have a significant advantage over all reactive responses. To achieve a similar benefit for the field of bottleneck analysis, the objective of this paper is to contribute to the development of a method for the prediction of dynamic bottlenecks.

The remainder of this paper is organized as follows. First, we describe the relevant fundamentals of modern bottleneck analysis (**Chap. II**). In this respect, we address a holistic model that divides the tasks of bottleneck analysis into four steps. In addition, we also present a brief summary of the most important scientific work on bottleneck prediction from recent years. Then, we introduce the design of the simulation, on which further work is based (**Chap. III**). In addition to the layout of the simulated manufacturing system, we present in particular the selected parameterization of the discrete event simulation model and the resulting data later used for the bottleneck prediction. We then explain our approach to predicting dynamic bottlenecks using a machine-learning model (**Chap. IV**). Using a simple example, we outline our considerations for the use of buffer levels and present two analysis scenarios with different input data for model training. We then present the results of the modeling and compare the two analysis scenarios with four custom benchmarks (**Chap. V**). The approach of the second scenario scores best and manages to correctly predict a bottleneck for a forecasting horizon of 30 steps with an average ratio of 95.23%. Finally, we present a brief summary of our work and consider next steps and further research needs in the field of bottleneck analysis (**Chap VI**).

II. FUNDAMENTALS

A. Steps of holistic bottleneck analysis

Bottleneck analysis involves several tasks that have varying objectives and for which different approaches have been proposed. The degree of maturity of the respective research areas of these tasks varies significantly. In the following, we enumerate the four key steps of a holistic bottleneck analysis [5]. The four steps categorize the tasks required in the process in a successive manner and have already been addressed and further refined in promising related research [6].

- **Bottleneck detection:** As the first step, it determines the current location of the bottleneck in the manufacturing system. It can utilize different metrics, such as machine states, buffer levels or process times, and allows for a concise determination of the bottleneck. Approaches are subdivided into momentary value methods and average value methods, according to the respective aggregation.
- **Bottleneck diagnosis:** As the second step, it utilizes the knowledge of bottleneck locations from the first step to assess the frequency and severity of bottleneck behavior to the manufacturing system. In addition to examining the effects, this step also includes a cause analysis of the bottlenecks, for which past system data is combined with experience-based knowledge.
- **Bottleneck prediction:** As the third step, it involves the prediction of future bottleneck locations. A prerequisite is the implementation of an appropriate bottleneck detection that provides the data basis for predicting future system behavior. As a field of research, it can be described as not yet fully explored, which is why it is attracting a considerable degree of attention in the ongoing scientific discourse.
- **Bottleneck prescription:** As the fourth step, it culminates all previous results in an independent and self-improving control system. Based on predicted bottlenecks, it enables not only periodization but also initiation of remedial measurements. Due to the high complexity and relative novelty of this step, no proven approaches to its implementation exist yet and the need for research is to be considered substantial.

To summarize, these four steps enable a holistic bottleneck analysis. Since the steps are arranged in a successive manner, completion of the previous steps is expected before the respective next step can be addressed. However, since the focus in this paper is the third step, the bottleneck prediction, we cover the previous two steps only rudimentarily.

We leverage the *Active Period Method* (APM), already mentioned in the introduction, as the detection method in this paper. APM relies on the assumption that the station with the longest period of uninterrupted activity is the bottleneck. Since all other stations are more often blocked by subsequent buffers filled to the maximum as a result of the bottleneck, or starved by lack of replenishment from previous stations, their active operational periods are correspondingly shorter. For an in-depth investigation for the usage of bottleneck detection methods in serial manufacturing lines, including APM, we refer to [2]. Additionally, for a detailed description of more methods for bottleneck detection we refer to [7–9].

B. Related contributions on bottleneck prediction

Bottleneck prediction helps to anticipate the future location of a bottleneck so that measures can be taken proactively before it causes any drop in throughput. In the following, we provide an overview of how research on bottleneck prediction has unfolded in the past few years. The selection is build upon [5] and takes into account the review of [10]. For better orientation, **Table 1** summarizes the relevant contributions.

Table 1. Overview of related work on bottleneck prediction

| | Data | Method |
|------|---|-------------|
| [11] | Blockage and starvation times | ARMA |
| [12] | Utilization, buffer level, cycle times | ANFIS |
| [13] | Buffer level for shifting behavior | Probability |
| [14] | Machine states on a shift basis | ARIMA |
| [15] | Machine states, cycle time, product mix | LSTM |
| [10] | Utilization | LSTM |
| [16] | Blockage and starvation times | GAT |

LI ET AL. (2011) propose an approach based on time-series prediction that uses an *Autoregressive Moving Average* (ARMA) model to predict the future blockage and starvation states of machines [11]. On a simulation with 17 stations, they succeed with 97.38% accuracy in predicting the bottleneck in the next shift, i.e. in an eight-hour period. CAO ET AL. (2012) use an *Adaptive Network-based Fuzzy Inference System* (ANFIS) to incorporate a variety of simulation data, such as utilization rate, buffer level and cycle times, in the bottleneck prediction [12]. Their artificial neural network uses one-hot encoding and an n-input-1-output setup to predict the station numbers of future bottlenecks by utilizing a softmax layer, performing with about 90% accuracy. ROSER ET AL. (2017) developed an approach that determines the likeliness of a bottleneck shift based on the currently available material in the systems' buffers [13]. The approach extends APM by a wandering observation method, which allows a determination of shifting probabilities of bottlenecks, based on buffer levels.

SUBRAMANIYAN ET AL. (2018) predict the active period of machines, but use an *Auto-Regressive Integrated Moving Average* (ARIMA) method [14]. In an automotive use case with 13 stations, condensed machine states from 315 shifts allow a bottleneck prediction with an accuracy of 89.2%. LAI ET AL. (2018) utilize a *Long Short-Term Memory* (LSTM) network with two layers to predict bottlenecks in a complex, dynamic multi-job manufacturing system [15]. In direct comparison with ARMA, LSTM improves the bottleneck prediction that is based on cycle and blockage times. LIN ET AL. (2022) propose another LSTM-based prediction method that relies on an integrated temporal unidirectional and spatial bidirectional structure [10]. With the help of this model, it is possible to accurately predict the utilization in different simulation scenarios with eight to 12 stations. LAI ET AL. (2023) develop an interpretable modeling framework that utilizes spatial and temporal dynamics to predict bottlenecks by leveraging *Graph Attention Networks* (GAT) [16].

Finally, we would also like to highlight the recent work by ROCHA AND LOPES (2022) that provides a comprehensive comparison of eleven prediction methods [17]. Their approach relies on the prediction of process times, with *Random Forest* (RF) and *Multi-Layer Perceptron* (MLP) emerging as the most suitable methods.

III. STUDY DESIGN

A. Layout of the manufacturing value stream

The success of past work is often difficult to compare due to the specificity of the respective use cases. Often, performance metrics are used to evaluate the prediction without providing any reference to the real detection of bottlenecks. In addition, the quality of a correct forecasting depends to a very high degree on the actual dynamics of the considered systems. For this reason, we will demonstrate the approach presented in this paper with the help of a simple and illustrative example. We also provide the entire source code for analysis [18].

In this chapter, we will therefore first present the design of the case study before introducing our approach for bottleneck prediction with LSTM in the next section (**Chap. IV**). Our goal is to create a comprehensible and assessable bottleneck prediction that unmistakably demonstrates the potential and that can serve as a template for practical implementations.

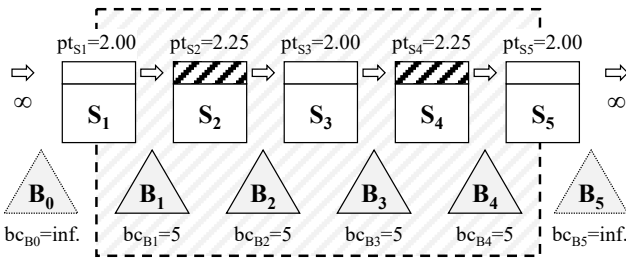


Figure 1. Visualization of the simulated manufacturing line

Figure 1 shows the layout chosen for the manufacturing simulation. The flow line consist of five fully interlinked work stations S_i that are interconnected by a total of six buffers B_i . For each S_i , a process time pt_{S_i} is specified and each B_i is constrained a maximum capacity bc_{B_i} . The boundaries of the system are unrestricted, which corresponds to an unlimited supply of material for S_1 and unlimited customer demand for S_5 .

B. Parameterization of the simulation

To create a scenario in which dynamic bottlenecks occur, adjustments we made for pt_{S_2} and pt_{S_4} . While the base value of the process times for all stations is 2.00, S_2 and S_4 received an addition of 12.5% so that the respective pt is 2.25. These adjustments enforce a shifting behavior of bottlenecks, especially between S_2 and S_4 .

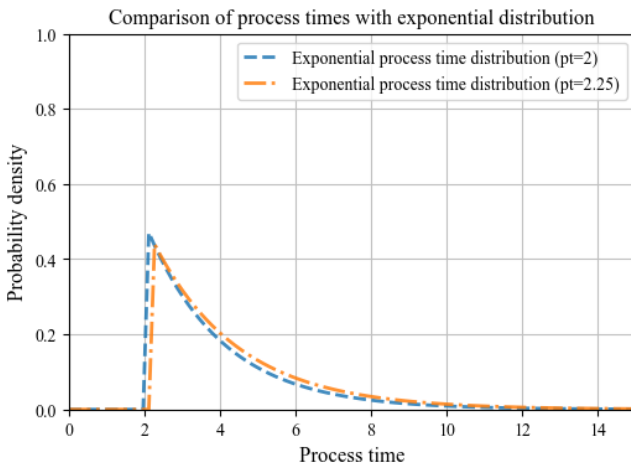


Figure 2. Process time distribution in the simulation.

Without the introduction of variability, the systemic behavior remains deterministic and does not correspond to any real manufacturing data. For this reason, we introduced an exponential distribution to the base pt of 2.00 and 2.25, respectively. **Figure 2** illustrates the resulting probability distribution of process times. While a low and consistent pt is often the rule in manufacturing, random events may cause significant delays. This distribution corresponds to the observable behavior and was thus chosen for the simulation.

The simulation was created using the Python library SIMPY [19] and the entire simulation data as well as the created simulation can also be found in the project repository [18].

C. Simulated data for the prediction

Table 2 shows a summary of the data. First, the length of a simulation was set to 10,000 steps. To ensure robustness, we performed 1,000 simulations. The simulations provide the events in the value stream, i.e. primarily the completion of orders at stations, as well as the respective level of each buffer. In accordance to APM, we determined the active periods of the stations and derived the information on the locations of the bottlenecks.

Table 2: Summary of the simulation data

| Data set | Amount | Lengths |
|--|--------|---------|
| Simulation events events_10k_S2-S4+25%_XXX.csv | 1.000 | 10.000 |
| Buffer level buffer_10k_S2-S4+25%_XXX.csv | 1.000 | 10.000 |
| Active periods active_periods_10k_S2-S4+25%_XXX.csv | 1.000 | 10.000 |

Figure 3 illustrates an exemplary section of a simulation. The data was arbitrarily selected from the first recording. The upper diagram shows the buffer levels of B_1 to B_4 . The values are discrete and range from zero to the selected bc_{B_i} of 5. In this visualization, but also in the further course of the analysis, we refrain from using B_0 and B_5 . Due to the assumption about the system boundaries, these buffers have predetermined values and do not provide additional insight into the dynamics in the system. Next, the middle diagram depicts the respective active periods of S_1 to S_5 . The curve progressions have a saw blade shape. Values always increase continuously before falling back to zero after an interruption of the active period. Finally, the lower diagram shows the respective bottleneck. Since a bottleneck is determined by the longest active period, any bottleneck shift corresponds to a saw blade tip of the active period from the middle diagram.

The relative percentage of occurrence as bottleneck of each station provides a better understanding of the dynamics of the system. As such, we determined the ratios for all stations as an average of the 1,000 simulations. With regard to the entire simulation, S_2 and S_4 occur with the greatest frequency as bottlenecks with 44.13% and 41.22% of the time, respectively. The other stations appear correspondingly less frequently as bottlenecks, with 5.41% for S_1 , with 5.50% for S_3 and with 3.72% for S_5 .

These values help to determine a numeric target for the bottleneck prediction. A naive prediction that always expects S_2 to be the bottleneck would achieve an average accuracy of about 44%. Thus, to provide additional value, the prediction in this system must perform better than said naive approach.

Exemplary visualisation of the results for the first 300 simulation steps of dataset '000'

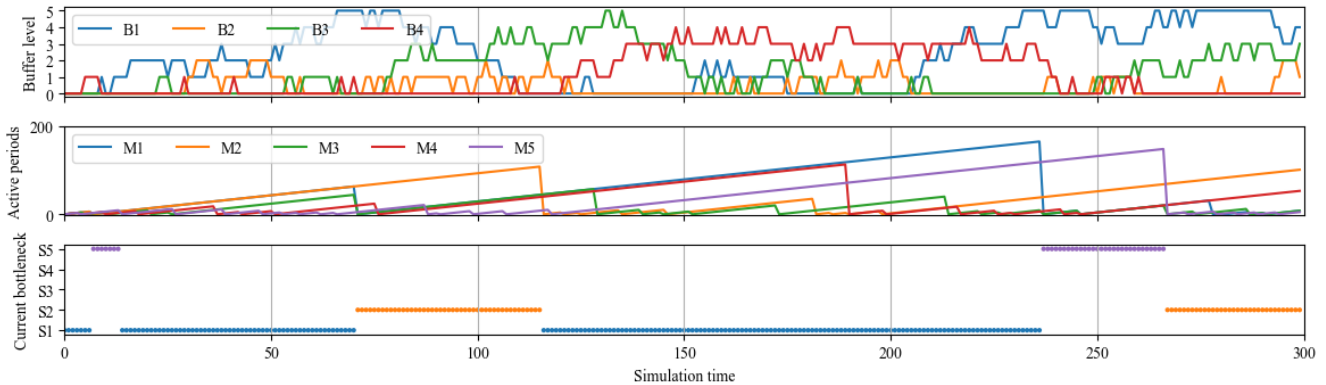


Figure 3. Exemplary visualization of the simulation results for the first 300 steps of dataset number '000'

IV. APPROACH

A. Introduction of LSTM networks for bottleneck prediction

As introduced in **Chap. II**, LSTMs have enabled various accomplishments in bottleneck prediction [10, 15]. In this paper, we refrain from a mathematical description of the functionalities of LSTM networks and restrict ourselves to a practical explanation of the core concepts. For further information, we refer to the referenced works in **Table 1**.

LSTM are a type of *Recurrent Neural Network* (RNN) that are specifically designed to overcome the vanishing gradient problem that occurs with traditional RNNs [20]. The key difference between LSTM and traditional RNN is that the former utilizes a memory block to store information, which comprises one or more memory cells and three adaptive, multiplicative gating units shared by all cells in the. The three gates are the input gate, forget gate, and output gate, which are responsible for controlling the flow of information into, out of, and within the memory block [21]. The input gate of an LSTM network is trained to learn what information should be stored in the memory from the historical data, while the forget gate is used to learn how long the information should be stored. The output gate is trained to learn when to read the memory out. This makes LSTM networks particularly useful for time-series forecasting, as they can selectively remember or forget information from the past based on its relevance to the current prediction [22]. As a result, LSTM networks can effectively model the long-term dependencies that are often present in time series, making them ideal for bottleneck prediction [20]. However, one disadvantage of LSTMs is that they can be computationally expensive to train, especially when dealing with large datasets or complex models. Therefore, in the provided documentation [18], there are already trained models that can be used to reproduce the prediction more quickly.

B. Approach for bottleneck prediction using buffer levels

Our declared goal is to predict future bottleneck behavior using an LSTM network. Since we have chosen the APM as most suitable bottleneck detection method, the investigation of the respective buffer levels is the logical choice. That said, the following approach is based on the simple hypothesis that the trends and developments of buffer levels allow us to gain insight into the future of a bottleneck's location:

- For one, we expect that a *continuous decline* in material of the buffer in front of the bottleneck will indicate an upcoming *starvation* of the respective station, which in turn is accompanied by a bottleneck shift.
- We also expect that *approaching the maximum capacity* of a buffer will signal an imminent *blockage* of the respective upstream station. If said station is the current bottleneck, a bottleneck shift is expected to happen soon.

The hypothesis led to the developed LSTM for bottleneck prediction. To provide a better illustration of the models input structure, **Figure 4** displays exemplary data from the study, which we will use to further outline our approach.

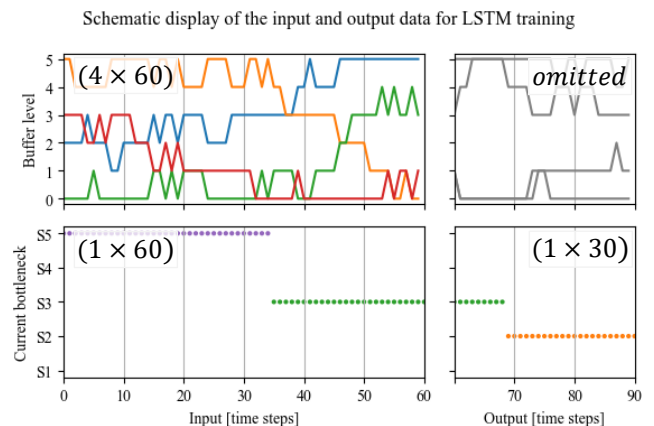


Figure 4. Schematic display of the available input and output data from the simulations for bottleneck prediction

First, a period has to be defined as input for the prediction. In the example in **Figure 4**, as well as in the later analysis in **Chap. V**, an interval of 60 simulations steps was chosen, which may correspond to the next hour in a real application, for example. Additionally, a forecasting horizon has to be chosen as well. As shown, we have chosen 30 steps for this, which could correspond, for example, to a forecast of half an hour. We have based these values on the distribution of process times (see **Figure 2**). Since the level progression of multiple buffers is available, the LSTM network has to take these multivariate inputs (4×60). Knowledge about future buffer levels has no direct value for the bottleneck prediction (*omitted*). Instead, we utilize the station numbers as categorical output values (1×30). In order for the

categorical values to be used in the LSTM, we use one-hot encoding to encode the stations to be predicted. Since there are five stations, the predicted bottleneck has five possible outcomes and the output layer is a one-dimensional vector of length 150. In addition, information on past bottlenecks is also available at the time of prediction (1×60). This information has a very high degree of potential knowledge, since future bottlenecks are directly dependent on past bottlenecks. To determine the impact of this addition, we consider two scenarios in the following chapter.

- **Scenario 1:** Prediction without past bottleneck states in the training data (*input shape* = $[4 \times 60]$)
- **Scenario 2:** Prediction including past bottleneck states in the training data (*input shape* = $[5 \times 60]$)

We expect the forecast of the Scenario 2 $[5 \times 60]$ to be better than of Scenario 1 $[4 \times 60]$ due to the additional information.

C. Further assumptions for model parameterization

The same modeling parameterization was chosen for both scenarios. The Python-based library KERAS, which is built on the machine learning platform TENSORFLOW, was used to create the model (in Version 2.4.0). With two hidden layers that consist of densely connected 64 neurons, the model can still be described as comparatively simple. The activation functions were set to *tangent hyperbolic*, and *Adam* was chosen as optimizer with a typical learning rate of 0.0001. To focus on the bottleneck prediction, we refrain from an in-depth description of the model, but instead refer to the documentation [18] for more details (see *prediction.py*).

V. RESULTS AND DISCUSSION

A. Results of the bottleneck prediction

This chapter now presents the results of the two analysis scenarios. To do this, we will first look at the course of the training, with **Figure 5** showing an exemplary training run.

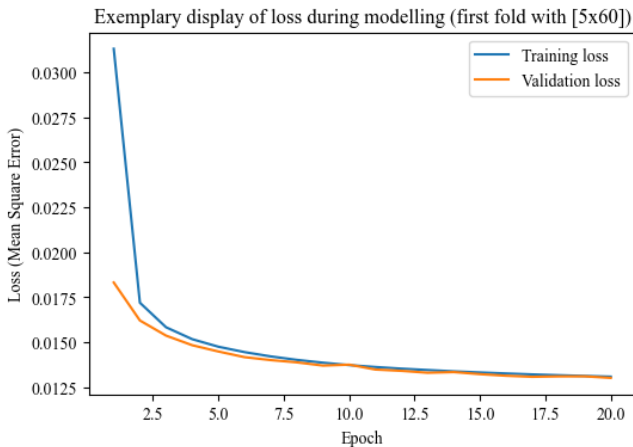


Figure 5. Exemplary visualization of the loss values during training of the first fold with the $[5 \times 60]$ input data

The training was conducted for a total of twenty epochs and the *Mean Squared Error* (MSE) was used as the loss measure. In the visualization, the effects of the training can be seen well. After the twenty epochs, there was either no more improvement or the validation loss started to decrease due to overfitting. Based on the low MSE, we summarize that the model achieves a stable result comparatively fast.

The ability to recognize the current bottleneck is crucial to prove the success of the approach. Since the results may vary due to the stochastic nature of the modelling, we perform a *ten-fold cross validation*. In this validation method, a data set is divided into ten random parts. Nine parts are used to train the model, while the tenth part is used for testing or validation. In this way, ten results are obtained, mitigating stochastic deviations [23]. **Figure 6** displays the results of this approach for both scenarios, with and without the bottleneck information in the training data (Scenario 1 and 2).

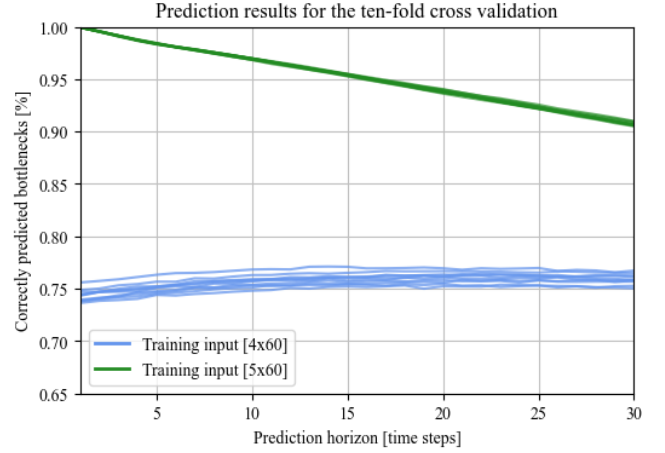


Figure 6. Results of the bottleneck prediction of all ten folds for each of the two selected scenarios

First, consider the set of curves for the ten predictions of Scenario 1 (4×60). For each of the thirty steps in the forecast horizon, the model has designated exactly one station as a bottleneck. **Figure 6** shows the percentage of bottlenecks correctly predicted at each step of the prediction horizon. For all ten folds, the percentage value is comparatively stable at about 75%. There are no significant deviations or outliers and all prediction results are within a few percentage points of each other. Interestingly, the trajectories show a slight trend toward upward curvature. At the beginning of the forecast horizon, the worst prediction accuracy is achieved at about 74%. In contrast, slightly better accuracies can be achieved in the middle and end of the prediction horizon with about 77%. To summarize, the approach of Scenario 1 succeeds in predicting the bottleneck in about three-quarters of all cases.

As postulated in **Chap. IV**, predictions from Scenario 2 (5×60) achieve even better results. Again, a tenfold cross-validation was performed, but in this case, the outcomes were much closer. Starting from nearly 100% correctly predicted bottlenecks in the first point of the prediction horizon, the percentage decreases in an approximately linear fashion. The prediction then reaches the lowest percentage in the last step of the prediction horizon of 30 steps and at about 91% correctly predicted bottlenecks. Such a progression seems natural and was to be expected: With each step into the future of the prediction horizon, the difficulty to make a correct prediction increases, which is made more difficult by unforeseeable events. In our study, an unexpectedly high process time due to the exponential distribution would constitute such an irregular event. Due to the high percentage of correct predictions, the application of Scenario 2 can be considered successful.

Now, it was said at the beginning of **Chap. III** that any evaluation of a bottleneck prediction depends to a large degree on the specific circumstances of the particular use

case. For this reason, we conduct an in-depth examination of the results based on several benchmarks in the next section.

B. Discussion of results with benchmarking

As benchmarking, we now outline four approaches to ensure a better assessment of the results of the bottleneck prediction.

- **Random:** As there are five stations in the study, there are five possible specifications for the bottleneck prediction. As the simplest approach, the random benchmark selects a station number as the bottleneck for each point of the prediction horizon without any further considerations.
- **Only S2:** By the study design, it was determined that bottlenecks were more common at station S2. With 12.5% additional process time, the station limits the entire system more frequently and has a correspondingly higher probability of occurring as bottleneck. We addressed this behavior at the end of **Chap. III** and we now incorporate it in a benchmarking approach that only predicts S2 for the entire prediction horizon.
- **Only S4:** The approach is analogous to ‘Only S2’, but here S4, the second station with additional process time, is predicted as bottleneck during the entire horizon.
- **Last bottleneck:** The aforementioned benchmarking approaches are comparatively naive, since they do not use implicit knowledge about the system behavior. In this approach, the last bottleneck in each training data set is used as a prediction for the next steps. Since shifting bottlenecks do occur, but are comparatively infrequent, this approach has a reasonably high chance to correctly forecast the prediction horizon.

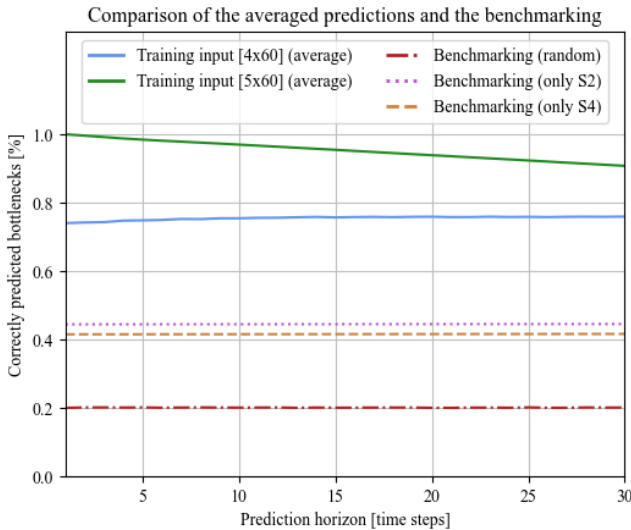


Figure 7. Comparison of the prediction results for Scenario 1 and 2 and three benchmarking approaches

Figure 7 again shows the prediction result of the Scenarios 1 and 2, whereby for the sake of clarity only the averaged result of the ten cross-validations is displayed. In addition, the figure shows the predictions of the three benchmarks ‘random’, ‘only S2’ and ‘only S4’. The Scenario 1 and 2 predictions are unchanged, again showing a nearly constant percentage in Scenario 1 of about 75% and a roughly linear decline in Scenario 2. Of the three benchmarks displayed, ‘random’ shows the worst performance. In accordance with probabilistic chance, the proportion of values correctly predicted as bottlenecks is only 20%. The

percentage of correctly predicted bottlenecks with the benchmarks ‘only S2’ and ‘only S4’ is about twice as high. Again, the accuracy is constant over the entire prediction horizon. It corresponds well to the bottleneck frequencies of 41% and 44% for S2 and for S4 that were anticipated.

Based on an examination of these three benchmarks, it can be said that the predictions made represent a good forecast. In the visualization, however, we have not yet shown the fourth benchmarking ‘last bottleneck’ because it is very close to Scenario 2. **Figure 8** therefore shows an enlarged section comparing the results of ‘last bottleneck’ to Scenario 2.

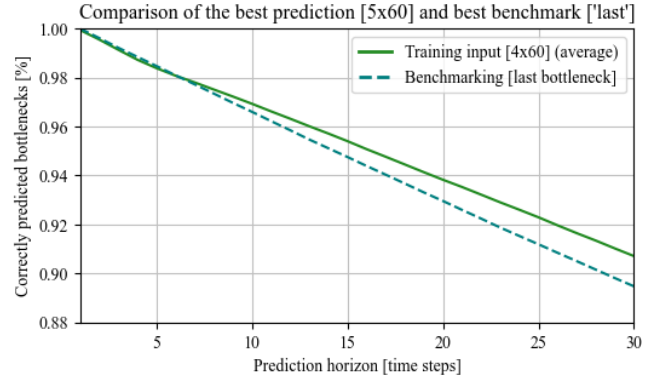


Figure 8. Comparison of Scenario 2 and the benchmarking approach ‘last bottleneck’

The comparison in **Figure 8** shows that the benchmarking achieves results comparable to those of Scenario 2. It also shows a linear slope that begins with an almost perfect prediction for the first point of the prediction horizon. As for Scenario 2, the ratio of correctly predicted bottlenecks declines with an increasing prediction horizon, dropping to around 89%. Thus, the accuracy of Scenario 2’s prediction is better than the results of the benchmarking, starting at a horizon of 5 steps. Towards the end of the prediction horizon, the results of Scenario 2 are about 2% better than the benchmark ‘last bottleneck’. The results of scenario 2 can thus still be considered good, but the comparison with this still relatively simple benchmarking has shown that a mere consideration of the proportion of correctly predicted bottleneck states can be a deceptive measure.

Table 3: Summary of the respective prediction results (averaged for the entire prediction horizon)

| Approach | Correct predictions [%] |
|-----------------------------|-------------------------|
| Scenario 1 | 0.7541 |
| Scenario 2 | 0.9523 |
| Benchmark ‘random’ | 0.1999 |
| Benchmark ‘only S2’ | 0.4440 |
| Benchmark ‘only S4’ | 0.4188 |
| Benchmark ‘last bottleneck’ | 0.9463 |

Table 3 concludes by summarizing all predictions. The table shows the percentage of average predicted bottlenecks in each case. As discussed, the three benchmarks ‘random’, ‘only S2’ and ‘only S4’ perform the worst. With an average ratio of correct predictions of 75.41%, Scenario 1 reaches an acceptable result. With 94.64% and 95.23% respectively, the benchmark ‘last bottleneck’ and Scenario 2 achieve by far the best results, with Scenario 2 performing marginally better.

VI. CONCLUSION

In summary, the presented approach enables the prediction of dynamic bottlenecks and fulfills the initially formulated objective. While LSTMs have been used for bottleneck forecasting in the past, the innovation of this contribution lies in the method used to predict future bottlenecks. Instead of predicting manufacturing metrics of the production system, the approach achieves a straightforward forecast of the bottlenecks through a corresponding output layer. The direct comparison of the predictions from Scenario 2 to the results of the benchmark ‘last bottleneck’ showcase this benefit.

However, the measure used to determine prediction quality can be improved in future work. In this paper, the percentage of correctly predicted bottlenecks was used as a measure, which typically indicates an accuracy of the prediction. However, the high value achieved by the benchmark ‘last bottleneck’ shows that application cases should be treated more like analysis tasks with unevenly distributed classes. For example, **Figure 8** has shown that ‘last bottleneck’ can achieve an average prediction accuracy of about 89% after 30 steps into the future. At the same time, this implies that only in about 11% of all training data has one (or more) bottleneck shift occurred. This emphasizes the advantage of Scenario 2, which only improved the prediction rate by a few percent.

These observations, particularly when a bottleneck shift takes place, are of the utmost importance for production planning and control. In further works on bottleneck prediction, we plan to incorporate a suitable ‘class weight’ that accounts for the fact that bottlenecks behave rather statically in certain intervals.

Lastly, the simplified example of the case study should be mentioned. In the simulation, there is a directed material flow of a completely interlinked flow line. In addition, only one product variant was manufactured. The application serves as a proof-of-concept and must be transferred to more complex manufacturing systems. If this is successful, bottleneck prediction may achieve a similar level of popularity as Predictive Maintenance that we discussed at the beginning.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is part of the project ‘Prediction of dynamic bottlenecks in directed material flow systems using machine learning methods’ (PrEPFlow, 21595), which is funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), through the Working Group of Industrial Research Associations (AIF). It is carried out on behalf of the German Logistics Association e.V. (BVL) and it is part of the program for promotion of joint industrial research and development (IGF) based on a resolution of the German Bundestag.

REFERENCES

- [1] R. Wöstmann, A. Barthelmey, N. West, and J. Deuse, “A retrofit approach for predictive maintenance,” in *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, T. Schüppstuhl, K. Tracht, and J. Roßmann, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, pp. 94–106.
- [2] N. West, J. Schwenken, and J. Deuse, “Comparative study of methods for the real-time detection of dynamic bottlenecks in serial production lines,” in *Lecture Notes in Computer Science, Advances and trends in artificial intelligence: Theory and practices in artificial intelligence*, H. Fujita, P. Fournier-Viger, M. Ali, and Y. Wang, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 3–14.
- [3] Eliyahu M. Goldratt, *The Goal: Excellence in manufacturing*. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1984.
- [4] C. Roser, M. Nakano, and M. Tanaka, “Shifting bottleneck detection,” *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, no. 1, pp. 1079–1086, 2002.
- [5] N. West, M. Syberg, and J. Deuse, “A holistic methodology for successive bottleneck analysis in dynamic value streams of manufacturing companies,” in *Towards sustainable customization: Bridging smart products and manufacturing systems*, 2022, pp. 612–619.
- [6] E. Mahmoodi, M. Fathi, and M. Ghobakhloo, “The impact of Industry 4.0 on bottleneck analysis in production and manufacturing: Current trends and future perspectives,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 174, p. 108801, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108801.
- [7] Y. Wang, Q. Zhao, and D. Zheng, “Bottlenecks in production networks: An overview,” *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 347–363, 2005, doi: 10.1007/s11518-006-0198-3.
- [8] C. E. Betterton and S. J. Silver, “Detecting bottlenecks in serial production lines: A focus on interdeparture time variance,” *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 15, pp. 4158–4174, 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.596847.
- [9] C. Yu and A. Matta, “A statistical framework of data-driven bottleneck identification in manufacturing systems,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 21, pp. 6317–6332, 2016, doi: 10.1080/00207543.2015.1126681.
- [10] L. Ma, T. Qu, M. Thürer, Z. Wang, M. Yuan, and L. Liu, “An integrated spatial-temporal neural network for proactive throughput bottleneck prediction in high-variety shops with complex job routings,” *International Journal of Production Research*, pp. 1–13, 2022, doi: 10.1080/00207543.2022.2148769.
- [11] L. Li, Q. Chang, G. Xiao, and S. Ambani, “Throughput bottleneck prediction of manufacturing systems using time series analysis,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, no. 2, 2011, doi: 10.1115/1.4003786.
- [12] Z. Cao, J. Deng, M. Liu, and Y. Wang, “Bottleneck prediction method based on improved adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) in semiconductor manufacturing system,” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 1081–1088, 2012, doi: 10.1016/S1004-9541(12)60590-4.
- [13] C. Roser *et al.*, “Bottleneck prediction using the active period method in combination with buffer inventories,” in *IFIP Advances in Information and Communication Technology, Advances in production management systems: The path to intelligent, collaborative and sustainable manufacturing*, H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, and D. Kiritsis, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 374–381.
- [14] M. Subramaniyan, A. Skoogh, H. Salomonsson, P. Bangalore, and J. Bokrantz, “A data-driven algorithm to predict throughput bottlenecks in a production system based on active periods of the machines,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 125, pp. 533–544, 2018, doi: 10.1016/j.cie.2018.04.024.
- [15] X. Lai, H. Shui, and J. Ni, “A two-layer long short-term memory network for bottleneck prediction in multi-job manufacturing systems,” *Proceedings of the International Manufacturing Science and Engineering Conference*, vol. 12, no. 1, 2018, doi: 10.1115/MSEC2018-6678.
- [16] X. Lai, T. Qiu, H. Shui, D. Ding, and J. Ni, “Predicting future production system bottlenecks with a graph neural network approach,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 67, no. 1, pp. 201–212, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.01.010.
- [17] E. M. Rocha and M. J. Lopes, “Bottleneck prediction and data-driven discrete-event simulation for a balanced manufacturing line,” *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 1145–1154, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.314.
- [18] N. West, *Project repository*, 2023. [Online]. Available: github.com/nikolaiwest/2023-bottleneck-prediction-icrcet
- [19] Team SimPy, *SimPy Documentation: Release 4.0.2.dev1+g2973dbe*, 2020.
- [20] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, “Long short-term memory,” *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [21] F. A. Gers, N. N. Schraudolph, and J. Schmidhuber, “Learning precise timing with LSTM recurrent networks,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 3, no. 1, pp. 115–143, 2002, doi: 10.1162/153244303768966139.
- [22] Y. Hua, Z. Zhao, R. Li, X. Chen, Z. Liu, and H. Zhang, “Deep learning with long short-term memory for time series prediction,” *Neural and Evolutionary Computing*, no. 1, pp. 1–9, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1810.10161.
- [23] V. Cerqueira, L. Torgo, and I. Mozetic, “Evaluating time series forecasting models: An empirical study on performance estimation methods,” *arXiv:1905.11744v1*, no. 1, 2019.

