

Systematische Literaturanalyse zur aktuellen Forschung in der Prozessmodellierung

Fachwissenschaftliche Projektarbeit

Vorgelegt von:

Witalij Baiz	(219537)	Maschinenbau
Tobias Heering	(217948)	Maschinenbau
Felix Ramge	(197552)	Wirtschaftsingenieurwesen

Ausgabedatum: 10.11.2023

Abgabedatum: 01.04.2024

Betreuerin: Dr.-Ing. Anne Antonia Scheidler

Technische Universität Dortmund

Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet IT in Produktion und Logistik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Stand der Technik	6
2.1	Prozessmodellierung	6
2.1.1	Modellierungssprache/-systematik	6
2.1.2	Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung	7
2.2	Domäne Produktion und Logistik	8
2.2.1	Grundlagen und Definition der Produktion	8
2.2.2	Grundlagen und Definition der Logistik	10
2.3	Process Mining	11
2.3.1	Begriffsbestimmung	11
2.3.2	Arten von Process Mining	11
2.3.3	Methodisches Vorgehen beim Process Mining	13
2.3.4	Leitsätze	14
2.4	Petri-Netze	16
2.4.1	Elemente eines Petri-Netzes	16
2.4.2	Erweiterungen des Petri-Netzes	17
2.5	Ereignisgesteuerte Prozessketten	19
2.5.1	EPK und ARIS-Konzept	19
2.5.2	Notation und Modellierung von eEPK	20
3	Strukturierte Literaturanalyse	23
3.1	Methodik	23
3.2	Definition des Untersuchungsumfangs	24
3.3	Konzeptionalisierung des Themas	24
3.4	Durchführung der Literaturrecherche	24
3.5	Literaturanalyse und Synthese	26
3.6	Zuordnung des Vorgehens	27
4	Ergebnisse der Literaturrecherche	28
4.1	Methodische Ansätze und Anwendungen von Process Mining (Heering)	28
4.2	Methodische Ansätze und Anwendungen von Petri-Netzen (Baiz)	39
4.3	Methodische Ansätze und Anwendungen von EPKs (Ramge)	49
5	Ergebnistabellen	56
6	Zusammenfassung und Fazit	58
7	Literaturverzeichnis	60
8	Anhang: Zuordnung von Schreibanteilen	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ebenen von Prozessmodellen (Liebetruth 2020).....	6
Abbildung 2: Struktur eines Arbeitssystems (Günther & Tempelmeier, 2004).....	8
Abbildung 3: Die drei Basis Varianten von Process Mining (van der Aalst 2012).....	11
Abbildung 4: Drei Basis Varianten von Process Mining und deren Input und Output (Daniel et al. 2012).....	12
Abbildung 5: Das L* life-cycle Model (Daniel et al. 2012).....	13
Abbildung 6: Elemente eines Petrinetzes (Long, 2023).....	16
Abbildung 7: Erweiterungen des Petri-Netzes (Long, 2023).....	17
Abbildung 8: Zuordnung von Methoden in das ARIS-Haus (Brell 2021).....	19
Abbildung 9: Entwicklung verschiedener EPK Notationen (Riehle et al. 2016).....	21
Abbildung 10: Notationselemente der eEPK (Gadatsch 2023).....	21
Abbildung 11: Grundform der eEPK in ARIS Toolset (Seidlmeier 2019).....	22
Abbildung 12: Modellierung mittels Process Mining und Petri Netzen (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).....	29
Abbildung 13: Beginn eines Szenarios (Roldán 2019).....	30
Abbildung 14: Ende eines Szenarios (Roldán 2019).....	30
Abbildung 15: Beispiel eines ETEOPP in einem Produktionsunternehmen (Schuh et al. 2020).....	31
Abbildung 16: Ausschnitt eines Ereignisprotokolls aus der Automobilindustrie (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	32
Abbildung 17: Automatische Abbildung eines Petri Netzes mit Hilfe von Process Mining (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	33
Abbildung 18: Punktediagramm, Prozessschritte pro Tag (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	33
Abbildung 19: Punktediagramm, Anzahl des Prozessschritte pro einer Autoproduktion (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	34
Abbildung 20: Prozessmodell welches mit Hilfe eines Fuzzy Miners generiert wurde (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	34
Abbildung 21: Statistische Evaluierung (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).....	35
Abbildung 22: Automatische Modellgenerierung (Tan et al. 2023).....	36
Abbildung 23: Beispiel im Falle der Confidence Intervall Methode (Rudnitskaia et al. 2020).....	37
Abbildung 24: Ereignisbasiertes Komponentenschema (Saraeian und Shirazi 2020).....	38
Abbildung 25: Simulationsprozess-Diagramm (Hanwen et al., 2020).....	39
Abbildung 26: PNMS-Konzept (Tavares & Silva, 2022).....	41
Abbildung 27: Setup-Modus (Tavares & Silva, 2022).....	42
Abbildung 28: Runtime-Modus (Tavares & Silva, 2022).....	42
Abbildung 29: Petri-Netz Darstellung 1 (Carlo Simon, 2018).....	44

Abbildung 30: Petri-Netz Darstellung 2 (Carlo Simon, 2018)	45
Abbildung 31: Petri-Netz Darstellung der Produktion (Carlo Simon, 2018)	45
Abbildung 32: Alternative Darstellung (Carlo Simon, 2018)	45
Abbildung 33: Resultierendes Petri-Netz	46
Abbildung 34: Ausschnitt EPK Modell einer Verschlussstation (Ashiwal et al. 2022)	49
Abbildung 35: Ebenen des KMU-Prozessmodells (Mahmood et al. 2018)	50
Abbildung 36: Ausführung und Verfeinerung von Dienstleistungen (Zhang und Chen 2021)	51
Abbildung 37: UML-Profil für atomare und komplexe EPKs (Amjad et al. 2018b)	52
Abbildung 38: Vorgehen bei der Modeltransformation (Khudori und Kurniawan 2019)	53
Abbildung 39: eEPCD eines Bahnhofsbetriebs (Xiaoshu et al. 2023)	54
Abbildung 40: Überblick über die Systematische Literaturanalyse (Amjad et al. 2018a)	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Taxonomie nach Cooper et al. 1988	24
Tabelle 2: Einschluss- und Ausschlusskriterien	25
Tabelle 3: Suchprotokoll SLA	26
Tabelle 4: Zuordnung des Vorgehens.....	27
Tabelle 5: Ergebnistabelle Process Mining (Heering)	56
Tabelle 6: Ergebnistabelle Petri-Netze (Baiz)	57
Tabelle 7: Ergebnistabelle Ereignisgesteuerte Prozessketten (Ramge).....	57
Tabelle 8: Zuordnung von Schreibanteilen	64

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Action-Design-Research
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
BPMN	Business Process Model and Notation
CPPS	Cyber-Physischen Produktionssystemen
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
eEPK	Erweiterte Ereignisgesteuerte Prozessketten
EQT	Elapsed Queue Time
ERP	Enterprise Resource Planning
ETEOPP	End to End Order Processing Prozessen
CPN	Coloured Petri net
GSPN	Generalized stochastic Petri net
PNML	Petri net management model
PNMS	Petri net management system
SLP	Systematic layout planning
SLR	Systematische Literaturrecherche (structured literature review)
SMS	Smart Manufacturing Systems
SPN	Stochastic Petri net
TCPN	Timed continuous Petri net
TDPN	Timed delay Petri net
TPN	Timed Petri net
VR	Virtual Reality

1 Einleitung

In dieser Projektarbeit widmen wir uns einer tiefgreifenden systematischen Literaturrecherche (SLR), nach der Methodik von vom Brocke et al. (2009), mit dem Ziel, die methodischen Ansätze und Anwendungen von Process Mining, Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK) und Petri-Netzen zu untersuchen. Diese Technologien spielen eine zunehmende Rolle in der Optimierung und Analyse von Geschäftsprozessen, insbesondere in den Bereichen Produktion und Logistik, die durch Komplexität und den Bedarf an Effizienzsteigerung gekennzeichnet sind. Die SLR dient dabei als Instrument, um den aktuellen Forschungsstand präzise abzubilden und die verschiedenen Anwendungsbereiche sowie die Entwicklungspotenziale dieser Technologien aufzuzeigen.

Im zweiten Kapitel haben wir uns eingehend mit dem Stand der Technik in den jeweiligen Themenbereichen auseinandergesetzt. Neben einer detaillierten Erörterung der Konzepte von Process Mining, EPK und Petri-Netzen haben wir die Begrifflichkeiten geklärt und die spezifischen Herausforderungen sowie Chancen in den Domänen Produktion und Logistik beleuchtet. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Prozessmodellierung, die als fundamentales Werkzeug zur Visualisierung, Analyse und Optimierung von Prozessabläufen dient.

Das dritte Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen, das wir im Rahmen der SLR angewandt haben. Diese detaillierte Darstellung ermöglicht nicht nur ein Verständnis der systematischen Herangehensweise bei der Recherche, sondern gewährleistet auch die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Durch eine klare Definition der Suchstrategien, Einschluss- und Ausschlusskriterien sowie Bewertungsmethoden legen wir die Grundlage für eine objektive und umfassende Analyse der relevanten Literatur.

Im vierten Kapitel präsentieren wir die Ergebnisse unserer Recherche zu den einzelnen Prozessmodellierungen. Dies umfasst eine detaillierte Ausarbeitung der identifizierten methodischen Ansätze, deren Anwendungen und die damit verbundenen Vorteile und Limitationen. Innovative Anwendungsbeispiele und Fallstudien illustrieren die praktische Relevanz dieser Modellierungstechniken und zeigen auf, wie sie zur Lösung realer Problemstellungen beitragen können. Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel bieten einen umfassenden Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von Process Mining, EPK und Petri-Netzen in der Praxis.

Im fünften Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse in einer übersichtlichen Tabelle zusammengefasst. Diese Zusammenfassung dient als Referenzpunkt für die schnelle Erfassung der Kernergebnisse und erleichtert den Vergleich der unterschiedlichen Prozessmodellierungstechniken.

Abschließend rundet das sechste Kapitel die Arbeit ab, indem die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und die Bedeutung der Prozessmodellierung für die Effizienzsteigerung und Optimierung von Geschäftsprozessen in der Produktion und Logistik hervorgehoben werden. Es bietet einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen im Bereich der Prozessmodellierung und unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Modellierungsmethoden und -Werkzeuge.

2 Stand der Technik

2.1 Prozessmodellierung

Die Basis eines jeden Prozessmodells ist die Prozessmodellierung. Hierbei ist ein Modell nur eine Abbildung der Realität. Für das Management und die Optimierung von Prozessen sind jedoch nicht alle Aspekte der Realität von Bedeutung (Liebetruth 2020).

Daher liegt es in der Verantwortung der Prozessmodellierung, eine Systematik für die Modellierung auszuwählen, die es ermöglicht, alle wesentlichen Aspekte so umfassend wie nötig darzustellen. Hierbei ist es auch legitim, gezielt einige Aspekte auszulassen, um die Komplexität zu reduzieren und das Prozessmanagement beherrschbar zu gestalten (Liebetruth 2005).

2.1.1 Modellierungssprache/-systematik

Eine Modellierungssprache oder -systematik verwendet eine zuvor definierte, bestimmte Notation, um die Realität zu beschreiben. Diese Notation legt, ähnlich wie in einer Sprache, eine Syntax fest. Das bedeutet, es werden formale Regeln festgelegt, die bestimmen, mit welchen Symbolen die verschiedenen Elemente von Prozessen dargestellt werden, welche Bedeutung diese Symbole haben und wie sie miteinander kombiniert werden können. Im Gegensatz dazu bestimmt die Semantik die Bedeutung der Symbole und somit, in welchem Detailgrad die Realität abgebildet wird. Die Semantik beeinflusst auch, auf welche Aspekte von Prozessen mit der jeweiligen Modellierungssprache besonderer Wert gelegt wird. In einer Modellierungssprache wird eine bestimmte Bedeutung einer Menge von Objekttypen zugeordnet, die bei der Modellierung verwendet werden können (Becker 2012). Zum Beispiel besteht eine ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) aus Funktionen, Ereignissen, Kanten sowie optionalen Objekttypen wie Stellen, Organisationseinheiten und Daten. Auf EPK's wird in Kapitel 2.5 genauer eingegangen. Ein Objekttyp kann in verschiedenen Sprachen unterschiedliche Symbole aufweisen (Becker 2012).

Bei der Wahl einer geeigneten Modellierungssystematik muss man sich also seiner Tragweite für das Prozessmanagement bewusst sein. Zunächst sollte sich auch die Frage gestellt werden welches Ziel verfolgt wird. Zudem ist die Ebene, auf der die Prozessmodellierung stattfinden soll, relevant für die Auswahl der Modellierungssystematik. In Abbildung 1 werden die Ebenen dargestellt und im darauffolgenden Abschnitt erläutert.

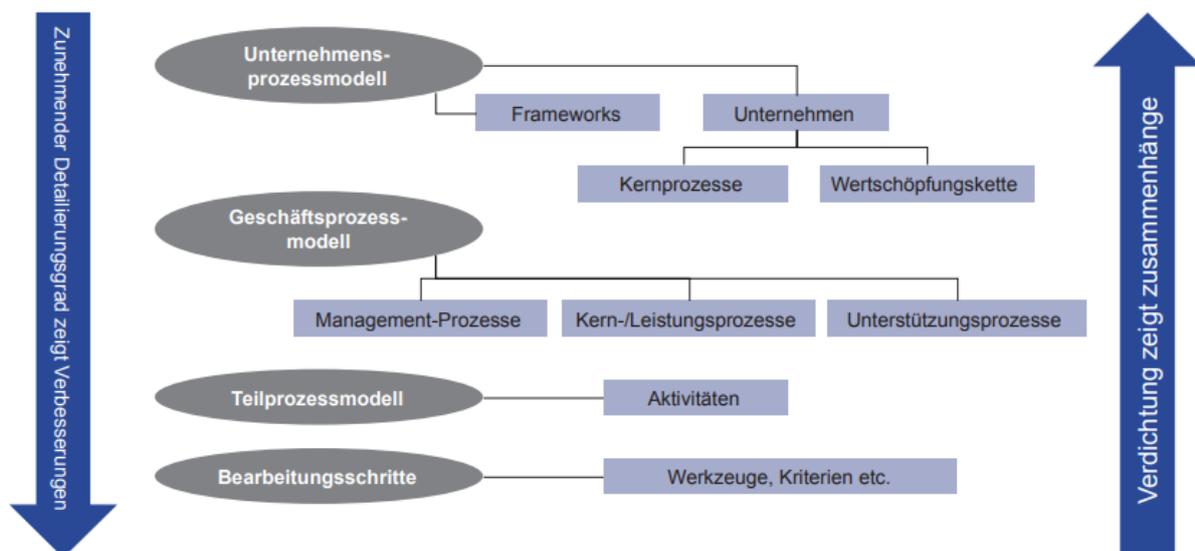


Abbildung 1: Ebenen von Prozessmodellen (Liebetruth 2020)

- Das obere Management, das für die Abstimmung der Unternehmensstrategie mit der gesamten Prozessleistung verantwortlich ist, benötigt eine ganzheitliche Sicht auf das Unternehmen. Daher sollte in diesem Kontext nur eine grobe Übersicht über die Prozesse und Teilprozesse bereitgestellt werden. Geeignete Systematiken können allgemeine Unternehmensprozessmodelle oder Prozesslandkarten sein, die Kern- und Unterstützungsprozesse unterscheiden, oder eine sehr allgemeine Wertkette (Liebetruth 2020).
- Prozessverantwortliche, welche für die Leistung einzelner Prozesse verantwortlich sind sollten eine umfassende End-to-End Sichtweise einnehmen. Für diese Personen sind Prozessmodelle interessant, welche die einzelnen in verschiedenen Detailgraden darstellen (Liebetruth 2020).
- Unmittelbar in den einzelnen Arbeitsschritten tätig sind die ausführenden Mitarbeiter und die untere Managementebene, diese überwachen auch die korrekte Umsetzung der einzelnen Aufgaben. In ihrem Tätigkeitsbereich sind Details wie Dokumente, Verantwortlichkeiten und Datenflüsse von Bedeutung, da sie direkt mit den entsprechenden Werkzeugen und Kriterien arbeiten (Liebetruth 2020).

2.1.2 Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung

Da es in der Prozessmodellierung viele Freiheiten für die Erstellung von Modellen gibt wurden Grundsätze entwickelt welche als Leitfaden für eine erfolgreiche Prozessmodellierung dienen sollen (Becker 2012). Im Folgenden werden die Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung vorgestellt und kurz erläutert. Somit kann sich auf dieses Wissen in den folgenden Kapiteln berufen werden.

Grundsatz der Richtigkeit:

Das Modell sollte die Realität korrekt abbilden. Zudem müssen die Regeln der jeweils verwendeten Notation eingehalten werden (Becker 2012).

Grundsatz der Relevanz:

Hierbei muss drauf geachtet werden, dass der passende Detaillierungsgrad bestimmt wird. Ein Prozessmodell sollte nicht unnötig viel Informationen darstellen, jedoch auch nicht zu wenig Informationen (Becker 2012).

Grundsatz der Wirtschaftlichkeit:

Es ist darauf zu achten, dass die Wirtschaftlichkeit einer Prozessmodellierung gewahrt ist. Somit soll mit der Modellierung nicht mehr Kosten entstehen, als wie sie einbringt im späteren Nutzen (Becker 2012).

Grundsatz der Klarheit:

Hiermit ist die Verständlichkeit des späteren Prozessmodells gemeint. Ein Prozessmodell kann noch so gut sein, wenn es die Personen, welche es nutzen müssen, nicht verstehen hat es keinen nutzen. Deshalb sollte sich im Vorfeld gut über die Darstellungsweise Gedanken gemacht werden (Becker 2012).

Grundsatz der Vergleichbarkeit:

Dieser Grundsatz zielt darauf ab Modelle, welche auf einer gleichen Modellierungsebene entstehen auch mit einem gleichen Detailgrad zu versehen. Da es sonst zu Missverständnissen der Nutzer kommen kann (Becker 2012).

Grundsatz des systematischen Aufbaus:

Dieser Grundsatz sagt aus, dass Prozessmodelle nicht isoliert betrachtet werden sollen, sondern mit anderen Informationen zusammen. Dies soll für eine einheitliche kohärente Sicht auf die Realität sorgen. Hierzu sollen die Input-Informationen eine konsistente Referenz zu einem Datenmodell aufweisen (Becker 2012).

2.2 Domäne Produktion und Logistik

Die Bereiche der Produktion und Logistik bilden das Rückgrat moderner Industriegesellschaften. In diesem dynamischen Umfeld stellen die Effizienz und Optimierung von Prozessen zentrale Herausforderungen dar, die durch Methoden der Daten- und Prozessmodellierung angegangen werden können. Diese Sektoren, charakterisiert durch komplexe Materialflüsse, vielschichtige Produktionsprozesse und weitreichende Lieferketten, erfordern eine ausführliche Planung, Steuerung und Überwachung, um die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

Im Rahmen dieses Abschnitts werden wir uns auf die grundlegenden Konzepte der Produktion und Logistik konzentrieren. Zunächst erfolgt eine Definition und Abgrenzung dieser beiden Begriffe und eine Erläuterung einiger Aspekte dieser zwei Bereiche.

2.2.1 Grundlagen und Definition der Produktion

Es gibt in der Literatur eine Vielzahl an Definitionen für die Begriffe der Produktion und Logistik. Nach Günther und Tempelmeier, versteht man unter Produktion, „die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nichtmateriellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen“ (Günther & Tempelmeier, 2004). Die Produktion wird im Allgemeinen als ein Wertschöpfungsprozess betrachtet, bei dem die qualitative Veränderung der Produkte im Mittelpunkt steht und wodurch eine Nutzenerhöhung angestrebt wird (Dyckhoff & Spengler, 2010). Wirtschaftseinheiten, die gemeinhin als „Betriebe“ bekannt sind, stellen in der Regel den Schauplatz für Prozesse der Wertschöpfung dar (Dyckhoff & Spengler, 2010). Der Prozess der industriellen Produktion besteht aus unterschiedlichen Segmenten, wobei jedes Segment einen spezifischen Teil des Herstellungsprozesses eines Produktes darstellt. Für einen reibungslosen Ablauf der Produktion ist es notwendig, organisatorische Strukturen zu schaffen und deren Interaktion zu koordinieren. Diese organisatorischen Strukturen werden auch als Arbeitssysteme bezeichnet (Günther & Tempelmeier, 2004).

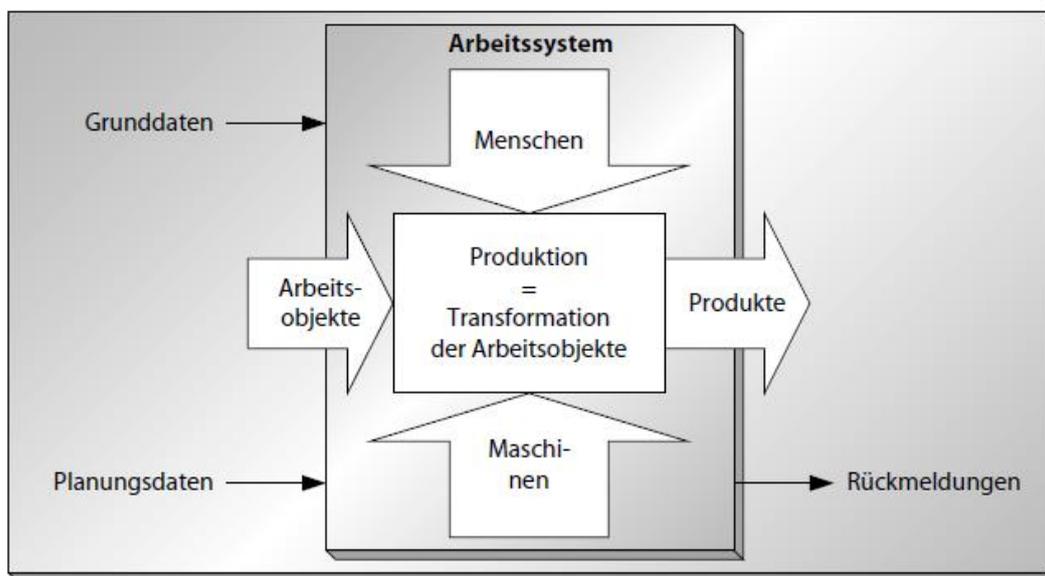


Abbildung 2: Struktur eines Arbeitssystems (Günther & Tempelmeier, 2004)

Ein solches Arbeitssystem besteht aus mehreren Komponenten:

- **Input** (Günther & Tempelmeier, 2004): Die Rohmaterialien, Zwischenprodukte und andere benötigte Materialien, bekannt als Arbeitsobjekte, bilden den wesentlichen physischen Input für das Arbeitssystem. Die Basisinformationen der Produktion geben Aufschluss über die strukturelle Beschaffenheit der Produkte und enthalten technische Details zur Fertigung und Montage. Die Planungsdaten konkretisieren, wie viele Produkt-Einheiten bis zu einem festgelegten Zeitpunkt fertiggestellt sein müssen und diese Vorgaben werden in Form von Produktionsaufträgen dokumentiert.
- **Output** (Günther & Tempelmeier, 2004): Im Produktionsprozess werden die Arbeitsobjekte physisch verarbeitet und erfahren dabei in der Regel eine Werterhöhung. Die Zeitpunkte, zu denen die Produktionsaufträge abgeschlossen sind und somit die Ressourcen des Arbeitssystems - wie Personal, Maschinen und Werkzeuge – wieder verfügbar sind, werden als Feedback an das System der Produktionsplanung und -steuerung weitergegeben.
- **Transformation** (Günther & Tempelmeier, 2004): Der Kernprozess der Produktion lässt sich als ein Transformationsvorgang auffassen, bei dem durch Einsatz von Produktionsfaktoren wie Personal und Maschinen eine Veränderung des Zustands und eine Wertsteigerung der Arbeitsobjekte stattfindet, was letztendlich zu ihrer Umwandlung in fertige Produkte führt.

Unternehmen und Betriebe folgen grundsätzlich einem Ziel, maximalen Gewinn zu erwirtschaften. Wertschöpfung stellt hierbei die Interpretation dessen dar. Es ist wichtig festzuhalten, welche Anforderungen erfüllt sein müssen, um eine Wertschöpfung zu erzielen:

- **Zeit** (Günther & Tempelmeier, 2004): Die Herstellung eines Produkts umfasst zahlreiche Schritte von der Beschaffung der Rohmaterialien bis hin zur Distribution des Endprodukts, welche eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Eine schnellere Durchführung dieser Schritte erhöht die Wertschöpfung. Das Ziel, den Prozess der Wertschöpfung zeitlich zu optimieren, spiegelt sich im Streben nach kürzeren Durchlaufzeiten wider. Dies kann erreicht werden, indem man unproduktive Tätigkeiten, die keine direkte Wertschöpfung hervorbringen, wie z.B. Transport und administrative Aufgaben reduziert und gleichzeitig die Produktionsinfrastruktur effizient gestaltet, um die Produktionsziele effektiver zu erreichen.
- **Qualität** (Günther & Tempelmeier, 2004): Die Effizienz eines Produktionssystems kann sowohl anhand quantitativer Faktoren als auch durch qualitative Merkmale bewertet werden. Bei technisch komplexen Produkten spielen Qualität und die damit verbundene Kundenzufriedenheit eine zunehmend entscheidende Rolle in der Wettbewerbsfähigkeit. Qualitätsaspekte in der Produktion zeigen sich durch niedrige Ausschussraten und besonders in Eigenschaften wie Zuverlässigkeit, Umweltfreundlichkeit und Langlebigkeit der Produkte. Das Qualitätsmanagement, das auf die Verbesserung der Produkt- und Produktionsprozessqualität abzielt, umfasst vielfältige Maßnahmen, von der Einhaltung von Standards bis hin zur kontinuierlichen Prozessoptimierung
- **Wirtschaftlichkeit** (Günther & Tempelmeier, 2004): Bei der Bewertung des Produktionsprozesses in wirtschaftlicher Hinsicht können die Ergebnisse auf Basis des Effizienzprinzips auf zwei verschiedene Arten gemessen werden:
 1. Nach dem Maximumprinzip soll mit einem festgelegten Wert an eingesetzten Ressourcen das höchstmögliche Ergebnis in Bezug auf den Wert der Produktion erzielt werden.
 2. Gemäß dem Minimumprinzip ist das Ziel, ein bestimmtes Produktionsziel mit dem geringstmöglichen Wert an Input zu erreichen.
- **Flexibilität** (Günther & Tempelmeier, 2004): Dieser Ausdruck bezieht sich auf die Kapazität eines Systems, sich an geänderte Rahmenbedingungen der Umwelt anzupassen. Um die Flexibilität eines Produktionssystems zu beschreiben, sind verschiedene Aspekte relevant: das Ausmaß der Anpassungen, die wirtschaftlichen

Konsequenzen der geplanten Änderungen und der Zeitraum, der für die Durchführung der Anpassungen erforderlich ist. Ein Produktionssystem wird als flexibel angesehen, wenn es fähig ist, sich innerhalb einer Zeitspanne an geänderte technologische, ökonomische, politisch-rechtliche und soziokulturelle Rahmenbedingungen anzupassen.

2.2.2 Grundlagen und Definition der Logistik

„Logistik ist der Prozess der Planung, Realisierung und Kontrolle des effizienten, kosten effektiven Fließens und Lagerns von Rohstoffen, Halbfabrikaten und Fertigfabrikaten und den damit zusammenhängenden Informationen vom Liefer- zum Empfangspunkt entsprechend den Anforderungen des Kunden“ (Pfohl, 2018). In einer abstrakten Interpretation beinhaltet sie auch die Überwindung räumlicher, zeitlicher und quantitativer Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage (Günther & Tempelmeier, 2004). Unter Angebot versteht man die Menge an Gütern, die für den Verkauf oder Tausch zur Verfügung stehen (Wohltmann 2018). Nachfrage beschreibt das Streben von Unternehmen, Güter zu erwerben (Piekenbrock 2018). In Logistikprozessen liegt der Fokus primär auf physischen Transferaktivitäten wie Transport, Umschlag und Lagerung. Als sogenannte TUL-Prozesse tragen sie zur Unterstützung des eigentlichen, produktiven Prozesses der Leistungserstellung bei (Heiserich et al., 2011). Transport bezeichnet die Überwindung räumlicher Distanzen oder die Ortsveränderung von Gütern unter Verwendung von Transportmitteln (Pfohl, 2018). Man unterscheidet hierbei zwischen innerbetrieblichen und außerbetrieblichen Transport (Pfohl, 2018). Innerbetrieblicher Transport bezieht sich auf den Transport innerhalb einer Produktionsstätte oder eines Lagers bzw. zwischen verschiedenen Teilen eines Lagerhauses. Außerbetrieblicher Transport hingegen umfasst den Transport von Gütern vom Lieferanten zum Kunden, den Warentransport zwischen verschiedenen Produktionsstätten oder Lagerhäusern eines Unternehmens, sowie die Logistikprozesse, die diese Orte miteinander verbinden. Das Umschlagen bezeichnet den Vorgang, bei dem Güter von einem Transportmittel auf ein anderes übertragen werden (Heiserich et al., 2011). Hierbei unterscheidet man ebenfalls zwischen außerbetrieblichen und innerbetrieblichen Umschlagvorgängen (Heiserich et al., 2011). Die innerbetrieblichen Vorgänge werden mit Hilfe von Fördertechnik oder Handhabungsgeräten durchgeführt. Bei außerbetrieblichen Umschlagprozessen ist es wichtig zu differenzieren, ob entweder Ladeeinheiten in unterbrochenen Transportketten aufgelöst und anschließend neu zusammengestellt werden oder ob die Ladeeinheiten im Rahmen des Verkehrs als komplette Transportgefäße, wie Container, umgeschlagen werden (Heiserich et al., 2011). Die Lagerung hat die Funktion, die zeitliche Differenz zwischen dem Zeitpunkt, zu dem ein Lieferant die Ware bereitstellt und dem Zeitpunkt, zu dem der Kunde die Ware benötigt, zu überbrücken (Heiserich et al., 2011). Man unterscheidet bei Lagern zwischen drei Arten (Heiserich et al., 2011). Lager fungieren als zentrale Punkte im logistischen Netzwerk und dienen als Mengenregulatoren (Puffer). Dies umfasst die Beschaffungslager vor der Produktion zur Vorratshaltung, Zwischenlager während der Produktion zur Entzerrung der Fertigungsprozesse und Absatzlager nach der Produktion zur Vorbereitung auf die Distribution. Logistik und das Konzept des Materialflusses sind eng miteinander verbunden und bilden zusammen ein Kernstück effizienter Produktions- und Distributionsprozesse innerhalb der Unternehmen. Unter Materialfluss versteht man die „Prozesskette aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie Lagern und Verteilen von Materialien und Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ (Krieger 2018).

2.3 Process Mining

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik von Process Mining, mit einem Schwerpunkt auf den verschiedenen Arten (Discovery, Conformance, Enhancement), dem methodischen Vorgehen und grundlegenden Leitsätzen. Von der Analyse bis zur Optimierung bietet Process Mining ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. Diese kurze Einführung bietet einen Einblick in die Kernaspekte, die die Grundlage für die nachfolgende Vertiefung legen.

2.3.1 Begriffsbestimmung

Der Begriff Prozess Mining kommt ursprünglich aus der Wirtschaftsinformatik und setzt sich aus Ansätzen des Workflow-Managements, des Data Mining und des Geschäftsprozessmanagements zusammen (Peters 2019).

In den letzten Jahren hat sich Process Mining zu einem neuen aufstrebenden Forschungsfeld entwickelt, dabei ist das Ziel die Entdeckung, Abbildung und Verbesserung von realen Prozessen. Hierzu werden Daten aus sogenannten Ereignisprotokollen (*event logs*) ausgelesen und analysiert (van der Aalst 2012).

Die Grundlage für Process Mining ist ein Ereignisprotokoll. Dieses besteht aus einzelnen geordneten Ereignissen welche im Laufe des Prozesses aufgezeichnet und aufgelistet werden. Zudem werden in der Regel zusätzliche Informationen gespeichert, wie zum Beispiel die Uhrzeit oder die Größe einer Bestellung (van der Aalst 2012).

2.3.2 Arten von Process Mining

Process Mining lässt sich grundlegend in drei Verschiedene Arten aufteilen. Dies sind Prozesserkennung (Process Discovery), Konformitätsprüfung (Conformance Checking) und Prozessverbesserung (Process Enhancement). Im Folgenden werden die drei Ansätze erläutert.

Prozesserkennung (Process Discovery):

Die Prozesserkennung beschreibt die Erstellung eines Prozessmodells. Dieses Modell wird mit Hilfe eines Ereignisprotokolls (Event-Logs) erstellt, welches alle Daten erfasst, die während des gesamten Prozesses gesammelt wurden. Dabei werden vorherige Informationen bei der Erstellung des Modells nicht genutzt (van der Aalst 2012).

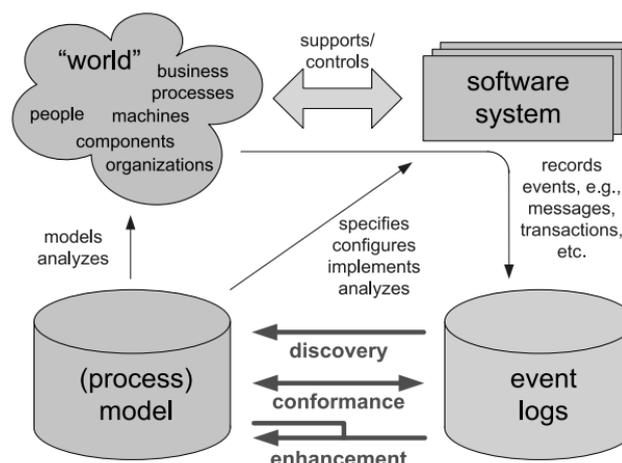


Abbildung 3: Die drei Basis Varianten von Process Mining (van der Aalst 2012)

Konformitätsprüfung (Conformance Checking):

Die zweite Art ist die Konformitätsprüfung (conformance), hierbei wird ein Ereignisprotokoll mit einem bereits vorhandenen Prozessmodell verglichen. Dabei ist das Ziel zu prüfen, ob die Realität mit den Prozessmodell übereinstimmt (van der Aalst 2012).

Prozessverbesserung (Process Enhancement):

Bei der dritten Art handelt es sich um die Verbesserung (enhancement). Die zu Grunde liegende Idee ist es ein bereits bestehendes Prozessmodell zu erweitern oder zu verbessern. Hierzu werden die im Analyseprozess des Ereignisprotokolls gewonnen Erkenntnisse genutzt, um Optimierungsmöglichkeiten aufzudecken und zu nutzen. Durch das Hinzufügen von Zeitstempeln innerhalb des Ereignisprotokolls ist es zudem möglich ein besseres Verständnis des Prozesses zu erlangen (van der Aalst 2012).

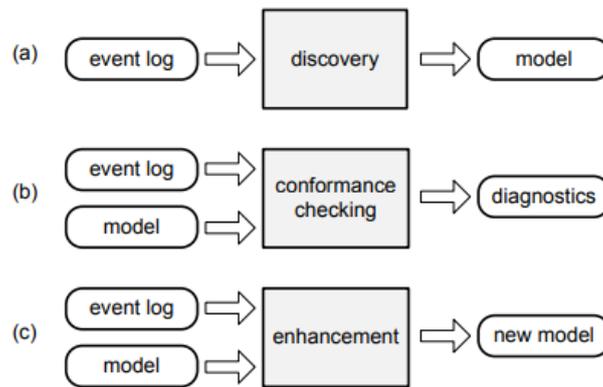


Abbildung 4: Drei Basis Varianten von Process Mining und deren Input und Output (Daniel et al. 2012)

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, benötigen die verschiedenen Arten von Process Mining unterschiedliche Inputs. Es wird deutlich, dass bei der Prozesserkennung lediglich ein Ereignisprotokoll benötigt wird, um ein Modell des Prozesses zu erstellen. Die Konformitätsprüfung und die Prozessverbesserung hingegen benötigen zusätzlich noch ein Modell des Prozesses. Somit ist klar zu erkennen, diese beiden Arten auf der Prozesserkennung aufbauen.

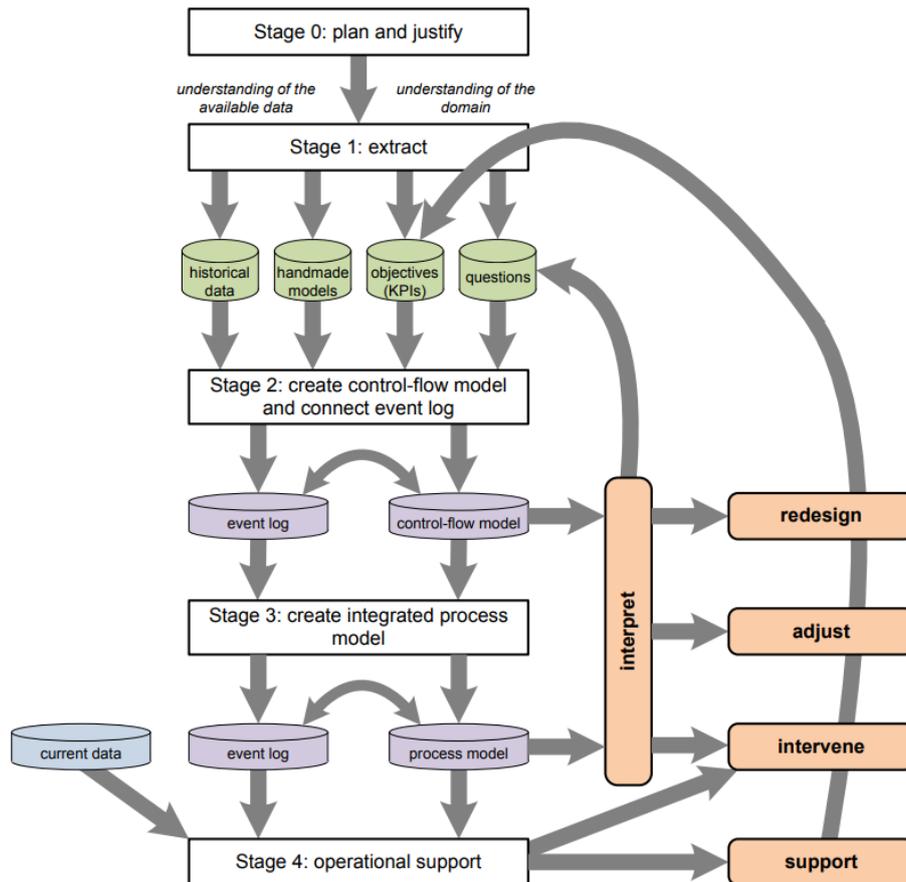


Abbildung 5: Das L* life-cycle Model (Daniel et al. 2012)

2.3.3 Methodisches Vorgehen beim Process Mining

Da beim Process Mining zumeist ganze Prozesse analysiert werden sind Projekte dieser Art sehr aufwendig und kleinschrittig. Um diesen Projekten jedoch eine Art Leitfaden zu geben, wurde der „L* life-cycle“ (Abbildung 5) entwickelt. Dies ist ein Modell, welches ein Process Mining-Projekt in fünf Stufen unterteilt (Daniel et al. 2012). Diese werden im Folgenden erläutert damit bei der Auswertung der Literaturrecherche eventuell Neuerungen erkannt werden können.

Stufe 0: plan and justify

Zum Start jedes Process Mining-Projekts müssen die Ziele, die während der Projektlaufzeit erreicht werden sollen, definiert werden (Daniel et al. 2012).

Stufe 1: extract

In dieser Stufe müssen die benötigten Daten festgelegt werden. Dies erfordert ein gutes Verständnis der zur Verfügung stehenden Daten. Hierzu werden meist Experten der betreffenden Domäne zu Rate gezogen (Daniel et al. 2012).

Stufe 2: create control-flow model and connect event log

Durch die Verknüpfung von dem Ereignisprotokoll mit der Datenflussmodell entsteht das erste Prozessmodell. Um dieses zu erhalten können Prozessentdeckungstechnik verwendet werden. Dieses vorläufige Prozessmodell benötigt jedoch noch einiges an Arbeit, um die gewünschten Ergebnisse auch zu erzielen (Daniel et al. 2012).

Stufe 3: create integrated process model

In dieser Phase werden die Daten weiterhin bearbeitet und so abgestimmt, dass das Prozessmodell immer mehr Informationen liefert. Wenn der Prozess gut strukturiert ist, ergeben sich sogar teils neue Perspektiven, welche wiederum offene Fragen klären können, aber auch neue Fragen aufwerfen (Daniel et al. 2012).

Stufe 4: operational support

Mit Hilfe des bereitgestellten Prozessmodells kann wiederum der betriebliche Ablauf unterstützt werden. Somit entsteht ein Kreislauf, welcher darauf konzipiert ist, die Prozesse während des ganzen Lebenszyklus stetig zu verbessern (Daniel et al. 2012).

2.3.4 Leitsätze

Neben dem in Kapitel 2.1.3 behandelten L* life cycle wurden auch sechs Leitsätze formuliert, welche während des Process Minings berücksichtigt werden sollten, um gängige Fehler zu vermeiden. Für den kommerziellen Gebrauch sind einige dieser Leitsätze relevanter als andere. Dies liegt meist an der Verwendung von kommerzieller Process Mining-Software.

Leitsatz 1: Die Ereignisse sind fundamentale Informationsträger

Die Basis eines jeden Process Mining Algorithmus sind Daten von Ereignissen/Vorgängen. Dabei können die Daten aus den unterschiedlichsten Quellen stammen. Die Herkunft der Daten ist hierbei gar nicht so entscheidend, viel wichtiger ist die Qualität der Daten (Daniel et al. 2012). Kriterien für die Qualität von Ereignisdaten sind:

- Belastbarkeit (Integrität)
- Korrektheit
- Vollständigkeit
- Definierte Bedeutung (Semantik)
- Datenschutz
- Datensicherheit
- Transparenz

Um eine genaue Beschreibung der Qualität zu erhalten, wird eine Unterteilung in Reifegrade genutzt (Daniel et al. 2012). Diese wird hier jedoch nicht näher erläutert, da sie keine Änderung in der Methodik hervorruft.

Leitsatz 2: Die Extraktion von Ereignisdaten basiert auf konkreten Fragestellungen

Die Erkundung von Prozessen während des Process Minings erlaubt es zwar immer wieder neuen Fragestellungen zu entwickeln. Jedoch sollte sich am Anfang definiert werden aus welchem Objekt die Daten extrahiert und analysiert werden. Zunächst besteht die Frage welcher Prozess analysiert werden soll und welcher Detailgrad vom späteren Modell gefordert ist. Des Weiteren muss man schauen in welchem Reifegrad die jeweiligen Daten vorliegen. Somit trieb die zu Anfangs definierte Fragestellung maßgeblich die Anwendung des Process Mining (Daniel et al. 2012).

Leitsatz 3: Parallelität, Entscheidung und andere elementare Kontrollflusskonzepte werden unterstützt

Kontrollflussspezifikationen sind in erster Linie für die Prozessmodellierung entscheidend. Somit sollte die genutzte Software elementare Pattern, wie parallele Ausführungen (AND-Splits/Joins), aber auch Entscheidungen (XOR-Splits/Joins) und Schleifen unterstützen. Dies ist bei den meisten kommerziell genutzten Tools auch der Fall (Daniel et al. 2012).

Leitsatz 4: Ereignisse beziehen sich auf Modellelemente

Für die Überprüfung und Verbesserung von bestehenden Prozessmodellen ist es maßgeblich, dass die Ereignisprotokolle gut aufbereitet sind. Ist dies nicht der Fall so kann es dazu kommen, dass nicht eindeutige Beziehungen zwischen Elementen entstehen (Daniel et al. 2012).

Leitsatz 5: Modelle sind zweckmäßige Abstraktionen der Realität

Die bei dem Process Mining entstehenden Modelle stellen jeweils eine Sicht der Realität dar. Indem der Fokus auf die Modellelemente verändert wird, kann sich auch die Sicht auf die Realität ändern. Somit kann es von Nöten sein mehrere Sichten zu erstellen, um genügend Informationen zu sammeln. Bei einer hohen Anzahl an Attributen zu den jeweiligen Ereignissen im Ereignisprotokoll ist es möglich, dass die Process Mining-Tools es dem Anwender erlauben zwischen verschiedenen Betrachtungen zu wechseln (Daniel et al. 2012).

Leitsatz 6: Process Mining ist ein kontinuierlicher Prozess:

Process Mining wird als „historische“ Abstraktion der Realität aufgefasst. Der Grund dafür ist der Fakt, dass die jeweiligen Prozessmodelle mit Ereignisprotokollen aus der Vergangenheit entstanden sind. Somit ist ein wichtiger Schritt die kontinuierliche Erneuerung der Prozessmodelle (Daniel et al. 2012).

2.4 Petri-Netze

Petri-Netze, ausgehend von Endlichen Automaten in den 1960er Jahren von Carl Adam Petri entwickelt (Petri, 1962.), stellen mathematische Darstellungen für zustandsdiskrete Systeme dar. Ihr ursprünglicher Zweck war die Darstellung paralleler Prozesse in Automaten. Heutzutage finden Petri-Netze jedoch eine breite Anwendung, insbesondere bei der Darstellung komplexer Systeme mit stochastischen Eigenschaften und komplexen Abhängigkeiten. Petri-Netze finden Anwendung in einer breiten Palette anderer Fachgebiete, beispielsweise in der Produktion (Itter, 1989) oder der Logistik (Carlo Simon et al., 2021). Petri-Netze dienen als äußerst flexibles grafisches und mathematisches Modellierungswerkzeug mehrerer Systeme. Sie sind besonders geeignet für Systeme, die als nebenläufig, asynchron, verteilt, parallel, nicht deterministisch und stochastisch charakterisiert werden (Murata, 1989). Aufgrund ihrer simplen grafischen Darstellung dienen Petri-Netze als ein visuelles Kommunikationswerkzeug, ähnlich zu Netzwerken, Blockdiagrammen und Flussdiagrammen (Murata, 1989). In mathematischer Hinsicht ermöglichen Petri-Netze die Berücksichtigung von Zustandsgleichungen, algebraischen Gleichungen und anderen mathematischen Modellen, die das Verhalten des Systems beschreiben (Murata, 1989).

Petri-Netze stellen eine flexible und mächtige grafische Modellierungstechnik dar, die sich vor allem für die Analyse und auch Modellierung von Systemen mit parallel ablaufenden und verteilten Prozessen eignet. Sowohl Personen, die sowohl in der Anwendung als auch in der Forschung tätig sind, können von der Verwendung von Petri-Netzen profitieren, da sie sich in den letzten Jahren als effektives Mittel der Kommunikation etabliert haben.

2.4.1 Elemente eines Petri-Netzes

Im Folgenden betrachten wir einmal die Komponenten von Petri-Netzen und erläutern ihre Rollen im Modell.

Ein Petri-Netz besteht im Allgemeinen aus vier Grundelementen, welche sich nochmals in statisch und dynamisch einteilen lassen (Gromeleit & Fiege, 1999):

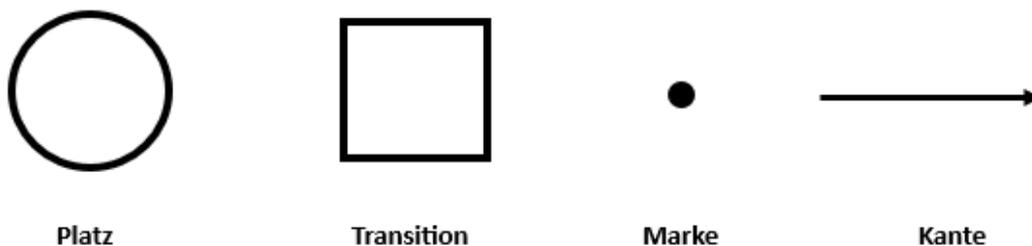


Abbildung 6: Elemente eines Petrinetzes (Long, 2023)

- **Plätze:** Die erste Komponente beschreibt die *Plätze*. Grafisch werden diese als Kreise oder auch Ellipsen dargestellt. Ein Platz modelliert stets eine passive Komponente des Systems und repräsentiert somit statische Zustände von Prozessen (Reisig, 2010). Plätze können Marken enthalten. Jeder Platz besitzt vordefinierte Kapazitäten, welche die maximale Anzahl an Marken angeben, welche innerhalb des Platzes existieren dürfen.
- **Transitionen:** Die zweite Art von Knoten eines Petri-Netzes sind die sogenannten Transitionen. Grafisch werden diese als Rechtecke abgebildet. Transitionen modellieren eine aktive Komponente des Systems, konkret bedeutet dies die Modellierung dynamischer Umwandlung von Informationen (Reisig, 2010). Innerhalb

Petri-Netze haben sich als äußerst vielseitiges Modellierungsinstrument bewiesen und werden in unterschiedlichsten Kontexten eingesetzt. Je nach Anwendungsbereich stehen verschiedene Arten von Petri-Netzen zur Verfügung, die sehr spezifische Eigenschaften aufweisen. Eine eingehende Betrachtung einiger unterschiedlicher Typen liefert einen konkreten Einblick in die Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit dieser Modellierungsmethode.

Zeitbehaftete Petri-Netze (engl. Timed Petri nets, TPN):

Eine Schwachstelle der ursprünglichen Petri-Netze war, dass das Konzept der Zeit in der Modellierung der Systeme nicht berücksichtigt wurde. Zeitbehaftete Petri-Netze integrieren die zeitliche Dimension in ihre Modellierung. Im Gegensatz zu klassischen Petri-Netzen, die Ereignisse und Zustände ohne Berücksichtigung von Zeit erfassen, erlauben zeitbehaftete Petri-Netze die Modellierung und Analyse von Prozessen, bei denen zeitliche Abläufe eine wichtige Rolle spielen. Es gibt drei Möglichkeiten, um die Zeit in Petri-Netze einzubinden, dies umfasst eine Manipulation der Schaltzeit, der Haltezeit der Marken und der Aktivierungszeit (Bowden, 2000). Jede Transition bekommt eine Zeitverzögerung zugewiesen. Wird eine Transition aktiviert, so wird erst eine Marke weitergegeben, bis die festgelegte Zeitspanne verstrichen ist. Im Falle der Haltezeit werden Marken in zwei Kategorien unterteilt, verfügbar und nicht verfügbar (Bowden, 2000). Verfügbare Marken werden genutzt, um Transitionen zu aktivieren, nicht verfügbare hingegen nicht. Schaltet eine Transition, erfolgt das Entfernen und Erzeugen einer Marke simultan. Die erzeugten Marken sind jedoch nicht verfügbar, um die nachfolgenden Transitionen zu aktivieren, bis sie sich für eine angegebene Zeit an diesen Transitionen aufgehalten haben (Bowden, 2000). Die dritte Möglichkeit umfasst das Nutzen einer Aktivierungszeit. Das Schalten der Transition erfolgt sofort, die Zeitverzögerung zeichnet sich in diesem Fall jedoch dadurch aus, dass die Transitionen erst schalten, bis sie für einen bestimmten Zeitraum aktiviert waren (Bowden, 2000).

Farbige Petri-Netze (engl. Coloured Petri nets, CPN):

Farbige Petri-Netze werden zu den High-Level Petri-Netzen gezählt (Jensen, 1989). Im Gegensatz zu den Marken in klassischen Petri-Netzen, welche anonym und schwarz dargestellt werden, sind die Marken bei den farbigen Petri-Netzen unterschiedlich farbig. Die Marken können Informationen tragen und sind unterscheidbar. Abhängig davon, welche Farbe einer Marke zugewiesen wurde, treten diverse Zustände auf (Long, 2023).

Stochastische Petri-Netze (engl. Stochastic Petri Net, SPN):

Stochastische Petri-Netze wurden im Jahr 1980 eingeführt. Die stochastischen Petri-Netze ergänzen das Ursprungsmodell um einen zeitlichen Faktor via einer exponentiell verteilten Schaltverzögerung zwischen der Aktivierung und dem Schalten einer Transition (Sultanow, 2006). Ein stochastisches Petri-Netz ist ein Petri-Netz, in dem jeder Transition eine exponentiell verteilte Variable zugewiesen wird, welche die Zeitverzögerung zwischen der Aktivierung und dem Schalten der Transition ausdrückt. In dem Fall, dass mehrere Transitionen gleichzeitig aktiviert werden, schaltet die Transition mit der kürzesten Zeitverzögerung (Murata, 1989).

Verallgemeinerte stochastische Petri-Netze (engl. Generalized Stochastic Petri net, GSPN):

Eine entsprechende Erweiterung, die auf den stochastischen Petri-Netzen basiert, ermöglicht sowohl die Berücksichtigung zeitbehafteter als auch zeitloser Transitionen. Diese Erweiterung wird als verallgemeinertes stochastisches Petri-Netz bezeichnet (Sultanow, 2006). Zeitbehaftete Transitionen bleiben weiterhin mit einer exponentiell verteilten Schaltdauer assoziiert. Zeitlose Transitionen hingegen schalten unmittelbar nach Aktivierung, ohne dabei Zeit zu verbrauchen (Wang, 1998).

2.5 Ereignisgesteuerte Prozessketten

Die Methode der Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK) wurde Anfang der neunziger Jahre in einer Zusammenarbeit zwischen Forschern der Universität Saarland und der SAP AG entwickelt (Keller et al. 1992). Es handelt sich dabei um eine Modellierungssprache, welche zur Darstellung und Analyse von Geschäftsprozessen verwendet wird. Aufgrund der Integration in das lange Zeit marktführende ERP-System SAP R/3 und seiner Anwendungsfreundlichkeit hat sich die EPK sehr stark verbreitet (Gadatsch 2023). Sie ist immer noch ein beliebter Ansatz zur Geschäftsprozessmodellierung, allerdings ist Business Process Modeling Notation (BPMN) mittlerweile die dominante Modellierungssprache. (Khudori et al. 2020; Entringer et al. 2021, 2021; Freund und Rücker 2019).

Die EPK ist eine der Hauptkomponenten der Architektur Integrierter Informationssysteme (ARIS), weshalb diese im Folgenden Abschnitt beschrieben wird.

2.5.1 EPK und ARIS-Konzept

August Wilhelm Scheer entwickelte das ARIS-Konzept im Jahr 1992 am Institut für Wirtschaftsinformatik an der Universität des Saarlandes (Scheer 1991). Das Ziel des Konzepts bestand darin, eine gemeinsame Sprache für IT und Management zu etablieren. Es wurde angestrebt, Fragen zur Organisation, Funktionalität der benötigten Daten und Leistungserbringung eines Geschäftsprozesses separat zu betrachten, um die Komplexität zu reduzieren. Gleichzeitig sollte es möglich sein, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen statischen Sichten in einer dynamischen Sicht, der Prozess- oder Steuerungssicht, darzustellen. Abbildung 8 zeigt das sogenannte ARIS-Haus mit den relevanten Sichten, Konzepten und möglichen Methoden (Scheer 2013).

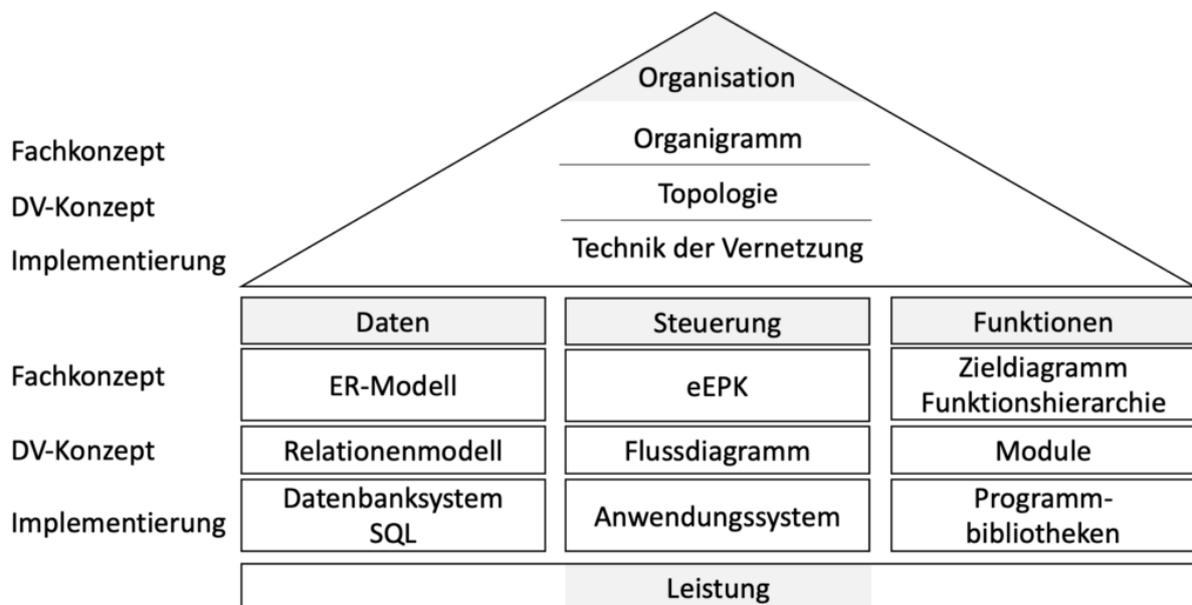


Abbildung 8: Zuordnung von Methoden in das ARIS-Haus (Brell 2021)

ARIS unterscheidet vier sekundäre Sichten: die Organisationssicht, die Datensicht, die Funktionssicht und die Leistungssicht. (Gadatsch 2023)

Organisationssicht: Beschreibt die Aufbauorganisation eines Unternehmens. Es werden Organigramme verwendet, welche die hierarchischen Beziehungen abbilden.

Datensicht: Zeigt die für die Modellierung relevanten Informationsobjekte und deren Beziehungen zueinander auf. Es werden erweiterte Entity-Relationship-Diagramme eingesetzt.

Funktionssicht: Umfasst in strukturierter Form betriebliche Aktivitäten. Hierzu werden Funktionsbäume genutzt, welche die relevanten betriebswirtschaftlichen Funktionen und deren Beziehungen zueinander auf unterschiedlichen Aggregationsstufen abbilden.

Leistungssicht: Beschreibt die Produkte eines Unternehmens, d. h. die materiellen und immateriellen Leistungen, einschließlich der Geldflüsse. Die Beschreibung erfolgt mithilfe eines Produktmodells.

Steuerungssicht: Wird mittels ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK) dargestellt. Sie stellt eine Verbindung zwischen den Elementen der einzelnen Sichten her und verknüpft die Operations-, Daten- und Funktionssicht.

Die fünf Sichten des ARIS-Hauses werden in drei Beschreibungsebenen unterteilt, nämlich Fachkonzept, DV-Konzept und Implementierung (Gadatsch 2023). Diese Unterteilung betont die schrittweise Durchführung von Projekten.

Auf der Fachkonzept-Ebene werden der Ist-Zustand und der Soll-Zustand in formalisierten Modellen beschrieben. Diese Modelle dienen als Ausgangspunkt für eine konsistente Umsetzung in eine informationstechnische Anwendung (Gadatsch 2023). Das DV-Konzept überträgt die Inhalte des Fachkonzepts in die Welt der Datenverarbeitung. Hier wird die organisatorische Beschreibung der Zustände in die Sprache der Informationstechnik übersetzt (Gadatsch 2023). Auf der Implementierungsebene wird das DV-Konzept konkret durch Hardware- und Software-Komponenten realisiert. Hier werden die Pläne und Konzepte in tatsächliche IT-Systeme umgesetzt (Gadatsch 2023).

ARIS bietet verschiedene Modellierungssprachen und Werkzeuge, um Geschäftsprozesse in unterschiedlichen Aspekten zu erfassen. EPK kann als eine spezifische Modellierungstechnik innerhalb des ARIS-Frameworks verwendet werden (Becker et al. 2009).

2.5.2 Notation und Modellierung von eEPK

In Abbildung 8 wird innerhalb des ARIS-Hauses auf eine spezifische Form der EPK-Modellierung namens eEPK (erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette) verwiesen. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung der ursprünglichen EPK-Notation, mit der Möglichkeit Anwendungssysteme, organisatorische Einheiten und Informationsflüsse abzubilden (Becker et al. 2009). Diese Form der EPK-Modellierung ist am bekanntesten, vor allem im Unternehmenskontext und bildet die Grundlage für alle weiteren EPK-Notationen seit 1993 (Riehle et al. 2016). Wenn der Begriff „EPK“ verwendet wird, ist häufig die „eEPK-Notation“ gemeint.

Abbildung 9 zeigt die Vielzahl der Varianten, die sich aus der ursprünglichen eEPK-Notation entwickelt haben. Deren Einordnung ist allerdings kein Bestandteil dieser Arbeit und es sei hier auf Riehle et al. 2016 verwiesen. Die ursprüngliche EPK-Notation umfasste im Kern die Elemente Funktion, Ereignis, Kontrollfluss (gerichtete Kanten) und Konnektoren (Gadatsch 2023).

Es handelt sich um eine semi-formale Modellierungssprache mit einer Mischung aus grafischen Elementen und natürlicher Sprache (Becker et al. 2009). Die Symbole der heute aktuellen eEPK-Notation können in Abbildung 10 nachvollzogen werden.

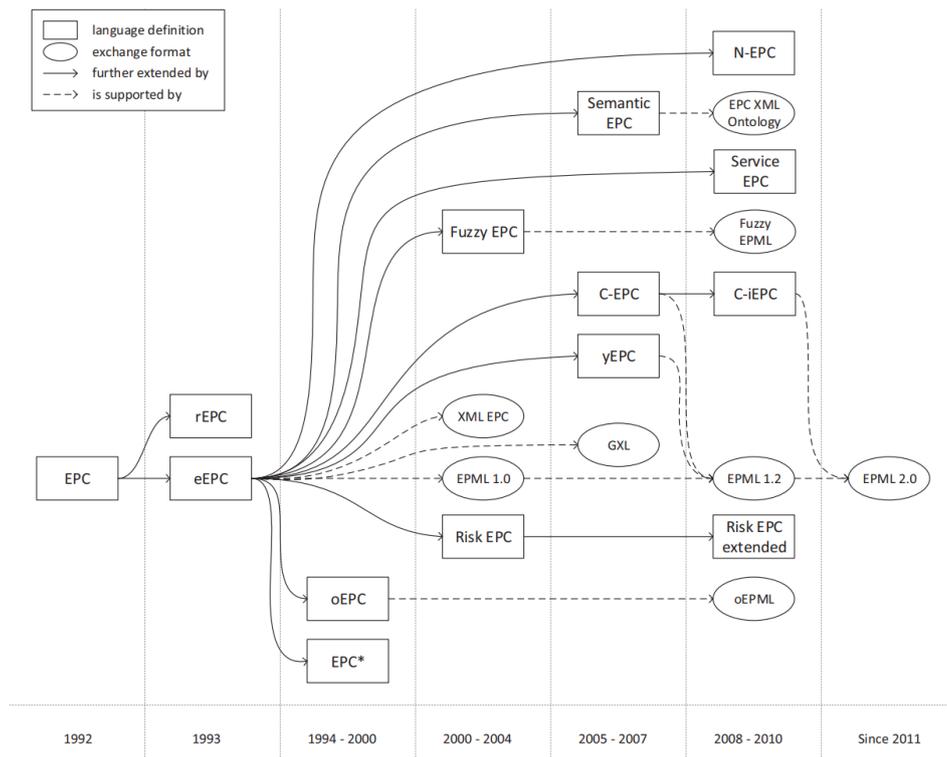


Abbildung 9: Entwicklung verschiedener EPK Notationen (Riehle et al. 2016)

Symbol	Benennung	Bedeutung	Kanten-/ Knotentyp
	Ereignis	Beschreibung eines eingetretenen Zustandes, von dem der weitere Verlauf des Prozesses abhängt	Ereignisknoten
	Funktion	Beschreibung der Transformation von einem Inputzustand zu einem Outputzustand.	Aktivitätsknoten
	„exklusives oder“	Logische Verknüpfungsoperatoren beschreiben die logische Verknüpfung von Ereignissen und Funktionen	Bedingungsknoten
	„oder“		
	„und“		
	Organisatorische Einheit	Beschreibung der Gliederungsstruktur eines Unternehmens	Organisationsknoten
	Informationsobjekt	Abbildung von Gegenständen der realen Welt	Aktivitätsknoten
	Anwendungssystem	Anwendungssysteme zur Prozessunterstützung (z. B. SAP ERP)	Aktivitätsknoten
	Kontrollfluss	Zeitlich-logischer Zusammenhang von Ereignissen und Funktionen	Kontrollflusskante
	Datenfluss	Beschreibung, ob von einer Funktion gelesen, geschrieben oder geändert wird.	Datenflusskante
	Zuordnung	Zuordnung von Ressourcen / organisatorischen Einheiten	Zuordnungs- beziehungskante

Abbildung 10: Notationselemente der eEPK (Gadatsch 2023)

Becker et al. (2009) beschreiben 9 Syntaxregeln für eine ordnungsgemäße Modellierung von EPKs. Diese gilt es bei der Anfertigung von eEPK-Modellen zu beachten.

1. Es existieren Ereignisse und Funktionen, diese sind über Kontrollflüsse miteinander verbunden.
2. EPKs sind bipartite Graphen: Auf ein Ereignis muss eine Funktion folgen und auf eine Funktion ein Ereignis.
3. EPKs sind zusammenhängende Graphen: Alle Knoten müssen über Pfade (Kanten) von jedem beliebigen Knotenaus erreicht werden.
4. Für Funktionen kann ein verfeinertes Prozessmodell hinterlegt sein.
5. Es gibt Prozess-Schnittstellen – diese treten entweder vor einem Startereignis oder nach einem Endereignis ein.
6. Kontrollflüsse sind gerichtete Kanten, die von oben nach unten verlaufen und somit den Zeitablauf widerspiegeln.
7. Funktionen können weitere Informationsobjekte hinzugefügt werden.
8. Kontrollflüsse können durch Konnektoren („Und“, „Inklusives Oder“ und „Exklusives Oder“) geteilt und zusammengeführt werden.
9. Nach einem Ereignis darf kein verzweigendes „Exklusives Oder“ auftreten – auch dann nicht, wenn zwischen dem letzten Ereignis und dem Exklusiven Oder“ nur Konnektoren liegen (und keine Funktion).

Damit Ereignisgesteuerte Prozessketten nicht von Hand gezeichnet werden müssen, gibt es eine Reihe von Modellierungsprogrammen. Die am häufigsten verwendeten Modellierungsprogramme sind ARIS Toolset und Process Mining Workbench (ProM) (Amjad et al. 2018a). Diese Programme bieten nicht nur die Möglichkeit, Modelle zu erstellen, sondern auch Modelle zu verifizieren, beispielsweise durch eine Konsistenzprüfung anhand von Syntaxregeln oder einer Simulation der Abläufe (Seidlmeier 2019). Eine mithilfe von ARIS Toolset erstellte EPK ist in Abbildung 11 dargestellt.

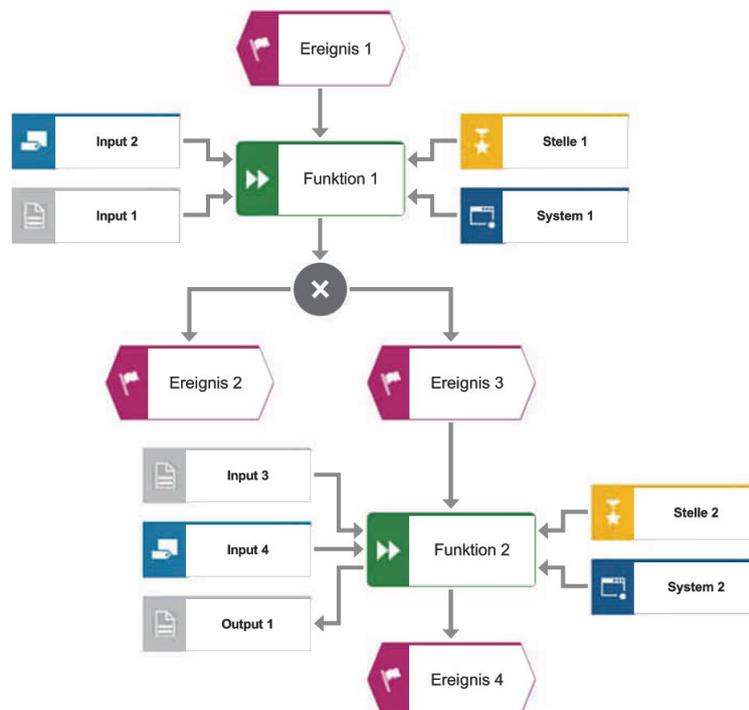


Abbildung 11: Grundform der eEPK in ARIS Toolset (Seidlmeier 2019)

3 Strukturierte Literaturanalyse

In diesem Kapitel wird das Vorgehen für die Erstellung einer strukturierten Literaturanalyse beschrieben. Die Methodik wird zudem in den Kontext dieser Arbeit eingeordnet und das Vorgehen für den weiteren Verlauf wird erläutert und begründet.

3.1 Methodik

Um den aktuellen Forschungsstand aus der Literatur zu den Themen EPK, Petri Netze und Process Mining herauszuarbeiten, wurde sich an der Methodik von vom Brocke et al. (2009) orientiert. Dies soll die Nachvollziehbarkeit der ausgewählten Literatur gewähren und Lesern die Möglichkeit geben den Suchprozess zu bewerten. Vom Brocke et al. (2009) argumentieren das ein transparenter Suchprozess die Qualität des Wissenstransfer steigert, da nachfolgende Forscher besser evaluieren können, ob dessen Ergebnisse für ihre Arbeit Aussagekräftig und vollständig sind. Die Methodik teilt sich in 5 Schritte auf, welche im Folgenden erläutert werden.

Definition des Überprüfungsumfangs

Hierbei stützen sich vom Brocke et al. (2009) auf eine Taxonomie von Cooper (1988), welche die 6 Charakteristika Fokus, Ziel, Organisation, Perspektive, Publikum und Abdeckung enthält. Diese besitzen wiederum Kategorien, welche entweder exklusive oder kombinierbar sind. Sich über die angesprochenen Charakteristika Gedanken zu machen, bildet eine wichtige Grundlage für die Gestaltung des Suchprozess.

Konzeptionalisierung des Themas

An dieser Stelle soll eine Arbeitsdefinition der wichtigsten Begriffe und Konzepte erarbeitet werden. Dabei sollten zunächst Quellen betrachtet werden, welche eine Zusammenfassung oder Übersicht über das zu behandelnde Thema geben. Zur Strukturierung der Konzepte und Ideen kann zudem eine Konzeptkarte erstellt werden.

Literaturrecherche

Ziel einer gelungenen Literatursuche ist es einen Satz von Quellen zur Analyse zu erarbeiten, welche zuvor einem Peer-Review unterzogen worden sind. Dabei sollen geeigneten Fachjournale oder Konferenzen und deren Datenbanken nach zuvor festgelegten Schlüsselwörtern durchsucht werden. Die Schlüsselwörter sollten so formuliert werden, dass für die Forschungsfragen irrelevante Quellen ausgeschlossen werden. Bei Bedarf können zudem ausgewählte Quellen von den gefundenen Beiträgen (Backward-Suche) oder Quellen, welche diese direkt zitieren (Forward-Suche) analysiert werden.

Literatursynthese und -analyse

Für diesen Schritt wird die Anfertigung einer Konzeptmatrix nach Webster und Watson (2002) empfohlen, welche themenbezogene Konzepte in verschiedene zu analysierende Einheiten unterteilt.

Recherche Agenda

Zum Schluss der Literaturrecherche kann eine Agenda erstellt werden, welche basierend auf der Konzeptmatrix unvollständige Forschungsgebiete oder Forschungsfragen benennt. Die Forschungsagenda bildet die Grundlage für weitere Literaturanalysen.

3.2 Definition des Untersuchungsumfangs

Für die Definition des Untersuchungsumfangs wurde eine Taxonomie nach Cooper et al. (1988) erstellt. Die 6 Charakteristiken Fokus, Ziel, Organisation, Perspektive, Publikum und Abdeckung werden in Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 1).

Der Fokus einer SLA beschreibt die Untersuchungsgegenstände, welche in der zugrunde liegenden Literatur betrachtet werden. Für diese Arbeit werden die Forschungsergebnisse der zu untersuchenden Quellen betrachtet, welche die aktuellen Erkenntnisse der Forschung darstellen. Zudem werden relevante Applikationen innerhalb der Domäne Produktion und Logistik untersucht.

Ziel ist eine Zusammenfassung und strukturierte Darstellung der gefundenen Erkenntnisse, in Form einer Matrix. Das Wissen und die Erkenntnisse sollen daher integriert werden.

Das aufbereitete Wissen wird anhand der herausgearbeiteten Konzepte oder Forschungsergebnisse organisiert, da hier Fokus der SLA liegt.

Es wird aus einer neutralen, wertfreien Perspektive argumentiert. Die erarbeiteten Ergebnisse sollen aufbereitet dargestellt werden, eine spezifische Haltung für eine kritische Auseinandersetzung wird nicht eingenommen.

Die Erkenntnisse der SLA werden am ehesten für ein Publikum mit einem Hintergrund in der Prozessmodellierung von Interesse sein oder für ein Interessiertes Gelehrtes Publikum. Für Spezialisten auf dem Gebiet der Prozessmodellierung könnten die Ergebnisse dieser Arbeit wohlmöglich von Interesse sein, es wird sich allerdings eher an ein gelehrtes Publikum gerichtet.

Die Abdeckung des Themengebietes ist repräsentativ mit einem Fokus auf die Domäne Produktion und Logistik, sowie den Zeitraum 2018-2023.

Charakteristiken	Kategorien			
	Forschungsergebnisse	Forschungsmethoden	Theorien	Applikationen
(1) Fokus	Forschungsergebnisse	Forschungsmethoden	Theorien	Applikationen
(2) Ziel	Integration		Kritik	Zentrale Problemstellungen
(3) Organisation	Historisch		Konzeptionell	Methodisch
(4) Perspektive	Neutral		Aus einr Position heraus	
(5) Publikum	Spezialisten	Gelehrtes Puplikum	Praktiker/Politiker	Allgemeinheit
(6) Abdeckung	gründlich	gründlich und selektiv	Repräsentativ	Zentral

Tabelle 1: Taxonomie nach Cooper et al. 1988

3.3 Konzeptionalisierung des Themas

Für die Konzeptionalisierung des Themas wurde zunächst nach Schlüsselquellen zu EPKs, Petri Netzen und Process Mining gesucht. Dabei wurde insbesondere Bücher und Literatur Reviews ausgewählt, welche in die Themenbereiche einleiten. Auf dieser Grundlage wurden weitere Quellen durch eine Forward- und Backward-Suche, unter Berücksichtigung von Zitationen und Quellenmerkmalen, ausgewählt. Die wesentlichen Fachbegriffe, Konzepte und der Ursprung der Themengebiete werden in Kapitel 2 dargelegt und hier nicht weiter diskutiert. Auf weitere Methodiken wie die Anfertigung von Konzeptkarten wurde verzichtet.

3.4 Durchführung der Literaturrecherche

Vom Brocke et al. (2009) verweisen für die Beschaffung von Literatur auf den Gebrauch wissenschaftlicher Onlinedatenbanken. Diese bieten die Möglichkeit einer Zielgerichteten Literatursuche von Quellen aus Fachjournals oder Fachkonferenzen, welche zudem einem Peer Review unterzogen wurden. Für die Literatursuche dieser Arbeit wurden die Datenbanken ACM Digital Library, IEEE Xplore und Scopus verwendet. Aufgrund einer geringen Anzahl an Ergebnissen für das Themengebiet EPK, wurde hier zusätzlich die Suchdatenbank Google Scholar verwendet. Hier besteht ein größeres Risiko Quellen zu

finden, welche nicht den festgelegten Kriterien dieser Literaturrecherche entsprechen, allerdings deckt Google Scholar ein breiteres Spektrum von Publikationen ab als die meisten anderen Datenbanken. Die Einschluss- und Ausschlusskriterien für Literatursauswahl werden in Tabelle 2 dargestellt. Zu beachten ist, dass aufgrund der geringen Trefferzahl bei Quellen mit inhaltlichem Bezug zur Domäne Produktion und Logistik auch Quellen ohne direkten Domänenbezug berücksichtigt wurden. Es handelt sich jedoch um Quellen, welche sich speziell mit der Modellierung von EPKs auseinandersetzen oder EPKs im Kontext von Informationstechnologien verwenden, welche für eine digitale Produktion und Logistik relevant sind, wie beispielsweise Digitale Zwillinge.

Beschreibung des Kriterium	Einschlusskriterium	Ausschlusskriterium
Sprache	Deutsch und Englisch.	Sonstige Sprachen
Publikationszeitraum	2018 - Heute	Vor 2018
Zugänglichkeit	Zugriff auf den Volltext.	Lediglich Zugang zu Titel/Abstract/Inhaltsverzeichnis.
Bewertung	Ergebnisse müssen wissenschaftlich evaluiert worden sein und in einer Fachzeitschrift oder einer Konferenz veröffentlicht worden sein.	Keine Zulässige Evaluierung.
Quellenart	Wissenschaftliche Quelle in Form von Paper, Journal, Monografie oder Sammelwerk.	Nicht wissenschaftliche Literatur/graue Literatur (Skripte, Vorlesungsfolien, Abschlussarbeiten). Lehrbücher.
Inhaltlicher Kontext	Die Forschungsergebnisse der Quellen beziehen sich inhaltlich auf die Themen EPK, Petri Netze oder Process Mining und befassen sich mit der Domäne Produktion und Logistik.	Ergebnisse stehen in keinem Bezug zu den Themen EPK, PetriNetze, Process Mining oder zu der Domäne Produktion und Logistik.

Tabelle 2: Einschluss- und Ausschlusskriterien

Für die Themengebiete EPKs, Petri Netze und Process Mining wurden separate Suchen durchgeführt. Die verwendeten Keywords, sowie die Anzahl an Ergebnissen nach den Iterationsschritten von vom Brocke et al. (2009) sind in Tabelle 2 zu sehen.

Die Ergebnisse aus den Datenbanken werden zunächst auf redundante Ergebnisse untersucht und gefiltert. Danach folgt eine Sichtung von Titel, Abstract und Schlüsselwörtern, um offensichtlich irrelevante Quellen anhand der Ausschlusskriterien auszusortieren. Erst danach erfolgt eine Sichtung der eigentlichen Quellen und ihres Inhalts. Sobald ein inhaltlicher Bezug ausgeschlossen werden kann, werden auch solche Quellen aus dem Stapel der zu analysierenden Quellen entfernt. Zuletzt wird während der Literaturanalyse eine Backward- und Forward-Suche durchgeführt.

Die Suchstrings enthalten das jeweilige Forschungsgebiet in englischer Sprache, sowie die Domäentypischen Begriffe „logistic“, „production“ und „manufacturing“. Es wurde zusätzlich eine Suche mit einem Deutschsprachigen Suchstring in Google Scholar durchgeführt. Ziel war hierbei eine Ergänzung des Literaturstapels mit geeigneten deutschen Quellen, da EPK ursprünglich aus Deutschland stammt. Allerdings gab es darüber keine endgültigen Treffer. Von den 550 englischsprachigen Ergebnissen wurden nur 300 untersucht, da die Trefferzahl an geeigneter Literatur nach hinten stark abnahm.

Themen- gebiet	Suchstring	Datenbank	Ergebnisse	Eingeschlossene Ergebnisse nach Berücksichtigung von:			
				Redundanzen	Titel Abstract/ Keywords/	Inhalt	Backward- und Forwardsuche
EPK	"event driven process chain" AND	ACM	(7)		(1)	(0)	
	"epc" AND	IEEE Xplore	(28)	(373)	(8)	(4)	(7)
	(production OR logistic)	Scopus Scholar	(46) (300)/[550]		(7) (37)	(1) (0)	
EPK	"Ereignisgesteuerte Prozesskette" AND						
	"EPK" AND (Produktion OR Logistik)	Scholar	(151)	(150)	(3)	(0)	(0)
Petri Netze	"petri nets" AND	ACM	(54)		(1)	(0)	
	("production" OR	IEEE Xplore	(219)	(297)	(22)	(1)	(6)
	"manufacturing") AND "logistic"	Scopus	(36)		(24)	(4)	
Process Mining	"process mining"	ACM	(148)		(8)	(2)	
	AND ("logistic" OR "production")	IEEE Xplore Scopus	(118) (257)	(497)	(12) (24)	(2) (2)	(7)

Tabelle 3: Suchprotokoll SLA

3.5 Literaturanalyse und Synthese

Das Ziel dieser Projektarbeit ist eine Darstellung des aktuellen Forschungsstandes. Deshalb wurden die wichtigsten Erkenntnisse aus den Ergebnissen der Literaturanalyse in schriftlicher Form zusammengefasst und eingeordnet. Um eine anschauliche Übersicht über die untersuchten Quellen zu geben, wurde sich für die Anfertigung einer einfachen Tabelle entschieden, welche die wichtigsten bibliografischen Daten der Quellen enthält und in Kategorien eingeordnet. Hierbei weichen wir von Vom Brocke et al. (2009) ab, welcher eine Konzeptmatrix vorschlägt die spezifischen Analyseeinheiten hervorhebt. Für die Einordnung der untersuchten Quellen definieren wir die folgenden Kategorien.

Integration

Literatur, welche die bestehenden Ansätze, Methoden oder Werkzeuge innerhalb des jeweiligen Themengebiets in Anwendungsfälle der Domäne Produktion und Logistik integriert. Best Practices und ganzheitliche Lösungsansätze, welche über die reine Prozessmodellierung hinaus gehen können, werden gesucht.

IT-Lösungen

Literatur, welche die Entwicklung neuer Softwarelösungen oder Informationssysteme umfasst, um die Prozessmodellierung innerhalb des jeweiligen Themengebiets und der Domäne Produktion und Logistik zu unterstützen.

Erweiterung

Literatur, welche die bestehenden Ansätze, Methoden oder Werkzeuge innerhalb des jeweiligen Themengebiets und der Domäne Produktion und Logistik erweitert. Gesucht werden verbesserte Lösungen, um auf neue Probleme oder Trends bei der Prozessmodellierung zu reagieren.

Review

Diese Kategorie beinhaltet Literaturübersichten und Recherchen im jeweiligen Themengebiet, welche einen Beitrag zum aktuellen Forschungsstand beitragen. Es werden relevante Studien und Erkenntnisse aus der Literatur analysiert und zusammengefasst, um einen aktuellen Überblick über den Forschungsstand zu geben und Wissen zu generieren.

3.6 Zuordnung des Vorgehens

Tabelle 4 gibt einen Überblick darüber an welchen Stellen in dieser Arbeit die Schritte nach vom Brocke repräsentiert sind. Es sei anzumerken das die zugewiesenen Kapitel auch noch weitere Inhalte enthalten, die für eine Wissenschaftliche Projektarbeit relevant sind.

	Schritte nach der Methodik von Vom Brocke et al. 2009	Zugehöriges Kapitel
1.	Definition des Untersuchungsumfangs	Kapitel 3.2
2.	Konzeptionalisierung des Themas	Kapitel 2 und 3.3
3.	Literaturrecherche	Kapitel 3.4
4.	Literatursynthese und -analyse	Kapitel 3.5, 4 und 5
5.	Forschungsagenda	Kapitel 6

Tabelle 4: Zuordnung des Vorgehens

4 Ergebnisse der Literaturrecherche

In diesem Abschnitt werden die aktuellen Forschungsergebnisse und methodischen Ansätze in der Produktion und Logistik, welche in der Literaturrecherche erarbeitet wurden, vorgestellt und erläutert.

4.1 Methodische Ansätze und Anwendungen von Process Mining (Hearing)

Process Mining in der Zuverlässigkeitsmodellierung von Smart Manufacturing Systems

Das Paper "Data-Driven Reliability Modeling of Smart Manufacturing Systems Using Process Mining" von Jonas Friederich und Sanja Lazarova-Molnar beschreibt einen innovativen Ansatz zur Zuverlässigkeitsmodellierung und -bewertung von Fertigungssystemen. Es zielt darauf ab, die Herausforderungen zu bewältigen, die durch die Komplexität moderner intelligenter Fertigungssysteme (Smart Manufacturing Systems, SMS) entstehen, insbesondere im Hinblick auf die Wartungskosten und die Zuverlässigkeit. Traditionelle, von Experten geleitete Zuverlässigkeitsmodellierungstechniken stoßen hier oft an ihre Grenzen, da sie nicht in der Lage sind, mit der dynamischen Natur und Komplexität dieser Systeme Schritt zu halten (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).

Die methodischen Ansätze des Process Mining im Kontext von Produktion und Logistik, wie sie im Paper dargelegt werden, basieren auf der Extraktion und Analyse von Daten, die innerhalb eines SMS erfasst werden. Diese Daten werden genutzt, um detaillierte stochastische Petri Netze zu erstellen, welche die Grundlage für die Analyse und Verbesserung der Systemzuverlässigkeit bilden. Der Prozess beginnt mit der Sammlung von Ereignis- und Zustandsprotokollen, die Aufschluss über den Materialfluss und die Zustände der Ressourcen im System geben (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).

Die Autoren stellen einen strukturierten Ansatz vor, der sich in zwei Hauptphasen gliedert. Die Extraktion des Fertigungsprozessmodells und die Entwicklung von Ressourcenausfallmodellen. Im Rahmen der Extraktion des Fertigungsprozessmodells wird der Materialfluss innerhalb des Systems aufgezeichnet, Übergangstypen werden bestimmt, und sowohl die Häufigkeit der Aktivitäten als auch die Dauer der Operationen werden analysiert. Diese Phase beinhaltet auch die Ermittlung von Ressourcenkapazitäten und die Modellierung ihrer Beschränkungen. Der innovative Einsatz von stochastischen Petri Netzen ermöglicht eine präzise Abbildung dieser Prozesse, indem er nicht nur den Pfad des Materials durch das System darstellt, sondern auch zeitliche Aspekte und Ressourcenzuverlässigkeit integriert (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).

Die zweite Phase, die Entwicklung von Ressourcenausfallmodellen, nutzt die Zustandslogs, um Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Ausfälle und Reparaturen der Ressourcen zu schätzen. Diese Modelle bieten einen tiefen Einblick in die Zuverlässigkeit der Ressourcen und ermöglichen es, vorbeugende Maßnahmen zu planen und potenzielle Schwachstellen im Fertigungsprozess zu identifizieren (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).

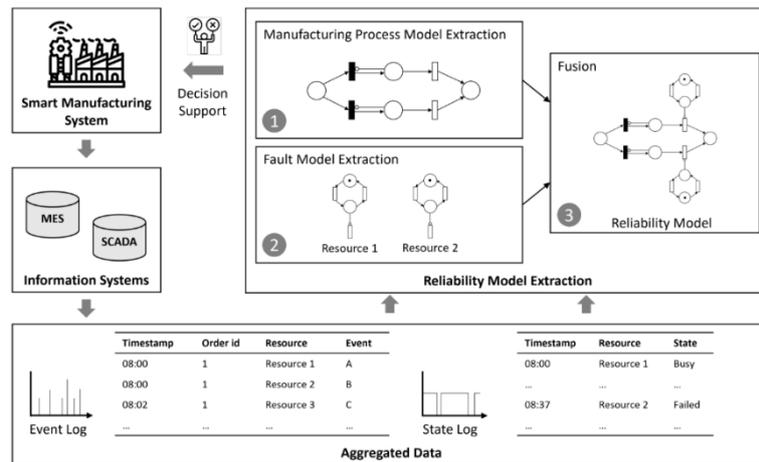


Abbildung 12: Modellierung mittels Process Mining und Petri Netzen (Friederich und Lazarova-Molnar 2023)

Der praktische Nutzen dieses Ansatzes wird durch eine Fallstudie veranschaulicht, in der ein Fließfertigungssystem mit parallelen Operationen untersucht wird. Die Autoren demonstrieren, wie durch die Anwendung ihres Ansatzes ein detailliertes Zuverlässigkeitsmodell aus den gesammelten Daten extrahiert werden kann. Dieses Modell ermöglicht nicht nur eine umfassende Analyse der aktuellen Systemzustände, sondern bietet auch eine Grundlage für die Simulation verschiedener Szenarien zur Optimierung der Systemleistung (Friederich und Lazarova-Molnar 2023).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der methodische Ansatz des Process Mining, wie im Paper dargestellt, eine innovative Lösung bietet, um die Herausforderungen moderner SMS anzugehen.

Optimierung der Montageausbildung durch Process Mining und VR

In der dynamischen Industrielandschaft stellt das Management von Wissen eine erhebliche Herausforderung dar. Im Laufe ihrer Karriere akkumulieren Experten tiefgreifendes Wissen über diverse Produktionsprozesse, das effektiv an neue Teammitglieder transferiert werden muss, um die Unternehmenszukunft zu sichern. Ein ineffektiver Wissenstransfer birgt erhebliche Risiken für die Unternehmenskontinuität. Vor diesem Hintergrund präsentieren wir ein innovatives System, das die Kombination aus Process Mining und Virtual Reality (VR) nutzt, um die Weitergabe von Fachwissen, insbesondere bei komplexen Montageaufgaben, zu vereinfachen (Roldán 2019).

Das System gliedert sich in drei zentrale Module:

Experten-Modul

In dieser virtuellen Umgebung führen Fachkräfte Montageprozesse durch, die ein präzises Spiegelbild realer Abläufe darstellen, allerdings ohne die damit verbundenen Risiken und physischen Einschränkungen. Jede Handlung wird in einem detaillierten Ereignislog erfasst, das sämtliche Bewegungen und Entscheidungen dokumentiert. Dies ermöglicht eine präzise Aufzeichnung der von den Experten angewandten Montagetechniken und -strategien (Roldán 2019).

Datenverarbeitungs-Modul

Hier erfolgt die Analyse der gesammelten Ereignislogs, um die darin enthaltenen Montageprozesse zu modellieren. Mittels Process Mining werden aus der Fülle der Daten die Montageprozessmodelle extrahiert. Der Fokus liegt dabei auf der Identifikation und Eliminierung ineffizienter Verhaltensweisen, um die optimalen Strategien und Prozesse hervorzuheben (Roldán 2019).

Trainings-Modul

Neulinge werden in dieselbe VR-Umgebung wie die Experten versetzt, erhalten jedoch gezielte Anweisungen und Hinweise, die auf den zuvor entwickelten Montagemodellen basieren. Diese Richtlinien dienen als Leitfaden durch den Montageprozess und erlauben den Lernenden, Fehler zu machen und aus diesen zu lernen, ohne reale Ressourcen zu verbrauchen oder Produktionsverzögerungen zu verursachen. Diese Simulationsumgebung bietet eine realistische, risikofreie Trainingsplattform (Roldán 2019).



Abbildung 13: Beginn eines Szenarios (Roldán 2019)



Abbildung 14: Ende eines Szenarios (Roldán 2019)

Zusammenfassend bietet dieses durch Process Mining und Virtual Reality unterstützte System eine effiziente Methode, um Mitarbeitern in einer sicheren Umgebung Lern- und Verbesserungsmöglichkeiten zu bieten. Für Unternehmen resultiert daraus ein signifikanter Vorteil: Das Verletzungsrisiko wird minimiert und eine Unterbrechung der Produktion vermieden.

Ermöglichung von Process Mining in End-to-End-Oder-Processing Prozessen

Dieser Abschnitt erörtert den Einsatz von Process Mining als innovative Methode zur Steigerung der Effizienz und Effektivität bei der Gestaltung von Prozessen. Durch die Analyse von Ereignisprotokollen aus Informationssystemen bietet Process Mining die Möglichkeit, tatsächliche Prozessabläufe zu identifizieren, zu überwachen und zu optimieren. Diese Optimierung kann zu einer signifikanten Qualitätssteigerung führen, die dem Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil verschafft. Im Vergleich dazu wird die herkömmliche Prozessabbildung, die oft auf Workshops oder Interviews basiert, kritisch betrachtet, da sie in bis zu 70% der Fälle nicht zu den gewünschten Verbesserungen führt (Schuh et al. 2020).



Abbildung 15: Beispiel eines ETEOPP in einem Produktionsunternehmen (Schuh et al. 2020)

Process Mining ermöglicht eine objektive, dynamische und auf Fakten basierende Darstellung von Prozessen, indem es vorhandene Ereignisprotokolle nutzt. Die Anwendung dieser Technologie in der Praxis war bisher jedoch durch die Herausforderung eingeschränkt, erforderliche Daten aus verschiedenen Datenbanken adäquat zu beschaffen und zu integrieren, um eine umfassende Sicht auf den ETEOPP zu erlangen (Schuh et al. 2020).

Um diese Herausforderung zu adressieren, präsentiert der Abschnitt einen auf Action-Design-Research (ADR) basierenden Ansatz zur Datenmodellierung. Dieser zielt darauf ab, ein einheitliches Datenmodell zu entwickeln, das die Extraktion von Ereignisprotokollen aus unterschiedlichen Datenbanken für jeden Kernprozess und deren Zusammenführung in ein einziges Ereignisprotokoll erleichtert. Hierfür werden Klassen und Unterklassen festgelegt und den jeweiligen Kernprozessen zugeordnet, während standardisierte Attribute wie Fall-ID, Aktivität und Zeitstempel spezifiziert werden, die für den Einsatz von Process Mining unerlässlich sind (Schuh et al. 2020).

Der vorgestellte Ansatz wurde in einem kleinen, serienproduzierenden Maschinenbauunternehmen getestet. Über vier Monate hinweg wurden insgesamt fünf ADR-Zyklen durchgeführt, um das Referenzdatenmodell kontinuierlich zu verfeinern. Dieser iterative Prozess führte zu einer stetigen Verbesserung des Modells auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse (Schuh et al. 2020).

Während der erste Zyklus die Bedeutung von Process Mining für den ETEOPP und die anfängliche Entwicklung des Datenmodells betonte, zielten die folgenden Zyklen darauf ab, den Detailgrad des Modells zu erhöhen. Dabei wurden die Kern- und Subprozesse präzisiert und die notwendigen Informationssysteme integriert. Im letzten Zyklus stand die Verstärkung der Robustheit des Datenmodells im Fokus, was durch die Festlegung minimaler Datenanforderungen und die Bewertung der Prozessleistung erreicht wurde (Schuh et al. 2020).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Datenmodellierung für Process Mining erfolgreich implementiert wurde und bedeutende Verbesserungen in der Prozessleistung erzielt hat. Gleichzeitig wird deutlich, dass weitere Validierungen in unterschiedlichen Produktionsumgebungen erforderlich sind, um die Anwendbarkeit und Wirksamkeit des Ansatzes umfassend zu bestätigen.

Process Mining in der Automobilproduktion

Eine weitere interessante Anwendung von Process Mining ist unter anderem in der Automobilindustrie. Hier wird Process Mining erneut für die Erkenntnisgewinnung von realen Prozessen genutzt. In diesem Fall spezifiziert mit dem Ziel zur Automatisierung von Fertigungsprozessen und die Konformitätsprüfung bestehender Fertigungsabläufe mit den Industriestandards zu verbessern (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020).

Es wurden zwei verschiedene Szenarien erstellt auf der Grundlage von Datensammlungen der Firma Toyota. Bei dem ersten Szenario wird mit Hilfe eines Inductive Miner ein Prozessmodell der automobilen Fertigung automatisch erstellt (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020). Im zweiten Fall wird hierfür ein Fuzzy Miner verwendet (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020).

Ein Ausschnitt des dafür verwendeten Event Logs ist in Abbildung 16 zu finden. Hierbei werden vier Hauptattribute aufgelistet, Fall-ID, Aktivität, Startzeitstempel und Endzeitstempel. Die anderen Attribute sind für die Einteilung in verschiedene Szenarien, ID 1 ist in dem Fall das „perfekte“ Prozessszenario. Szenario ID-2 weist auf ein Ereignis hin bei dem beschlossen wird, dass ein Objekt wiederverwendet wird. Szenario-ID 3 stellt den Herstellungsprozess und das Verpacken von Ersatzteilen dar. Das letzte Szenario, Szenario-ID 4 gibt an, wenn die Automobilfertigung einen neuen Motor bauen muss, da der zuvor gefertigte Motor als fehlerhaft befunden wurde (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020).

Scenario ID	Case ID	Activity	StartTimestamp	EndTimeStamp	Cost	Resources
1	311656	Casting	2019-05-07 07:45	2019-05-07 09:25	100	Mike
1	311657	Engine production	2019-05-07 09:30	2019-05-07 11:30	200	Pietro
1	311658	Stamping	2019-05-07 07:45	2019-05-07 08:55	50	John
1	311659	Welding	2019-05-07 09:00	2019-05-07 10:00	100	John
1	311660	Painting	2019-05-07 10:05	2019-05-07 11:00	50	James
1	311661	Assembly	2019-05-07 13:15	2019-05-07 15:45	200	Charles
1	311662	Quality Control	2019-05-07 16:00	2019-05-07 18:00	100	Charles
1	311663	Shipping and delivery	2019-05-07 18:05	2019-05-07 19:00	50	Susan
2	311665	Engine production	2019-05-08 08:00	2019-05-08 09:45	200	Pietro
2	311666	Stamping	2019-05-08 08:00	2019-05-08 09:00	50	John
2	311667	Welding	2019-05-08 09:05	2019-05-08 09:50	100	John
2	311668	Painting	2019-05-08 09:50	2019-05-08 10:30	50	James
2	311669	Assembly	2019-05-08 10:35	2019-05-08 11:58	200	Charles
2	311670	Quality Control	2019-05-08 13:00	2019-05-08 14:00	100	Mike
2	311671	Shipping and delivery	2019-05-08 15:00	2019-05-08 15:55	50	Susan

Abbildung 16: Ausschnitt eines Ereignisprotokolls aus der Automobilindustrie (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020)

Im Folgenden werden noch die zwei verschiedenen Szenarien der Erstellung eines Prozessmodells mittels Process Mining.

Prozessmodellerstellung mittels Inductive Miner:

Hierbei erstellt der Inductive Miner mit Hilfe von Ereignisprotokollen ein Petri Netz, wie in Abbildung 17 zu sehen. Zudem sind innerhalb der Abbildung Informationen über die Dauer und Frequenz eines jeden Prozesses dargestellt (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020).

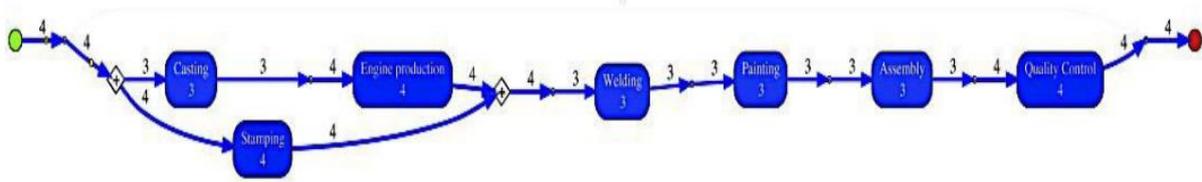


Abbildung 17: Automatische Abbildung eines Petri Netzes mit Hilfe von Process Mining (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020)

Der grüne Punkt impliziert hierbei den Start des Prozesses, während der rote Punkt das Ende des Prozesses darstellt. Zudem ist zu sehen, dass der Prozess sich mit einem „+“ Symbol aufteilt. Dies bedeutet, dass noch die folgenden Prozessschritte parallel zueinander laufen und bei einem erneuten „+“ Symbol wieder zusammenführen. Für die vereinfachte Darstellung wurden hier einige Prozessschritte ausgeblendet, welche in der Realität noch stattfinden (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).

Zu dem automatisch generierten Petri Netz können noch einige Anomalien in den Prozessen entdeckt werden. Hierfür wird Abbildung 17 betrachtet. Dazu werden pro Tag die jeweiligen Zeitstempel der einzelnen Ereignisse innerhalb eines Prozesses gestapelt dargestellt. In diesem Beispiel ist zu sehen, dass am 17. März die Produktion ungewöhnlich viele Schritte in Anspruch genommen hat. Bei genauem Hinsehen ist zu sehen, dass nach einer Qualitätskontrolle erneut an Motor produziert wurde, was darauf hindeutet, dass an dem vorherigen Motor ein Qualitätsmängel war (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020).

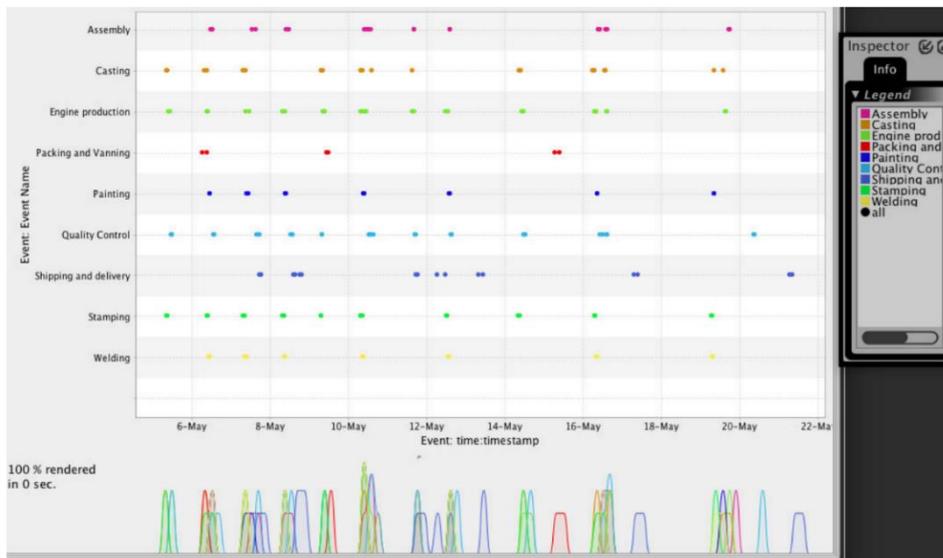


Abbildung 18: Punktediagramm, Prozessschritte pro Tag (Siek und Malik Gunadharma Mukti 2020)

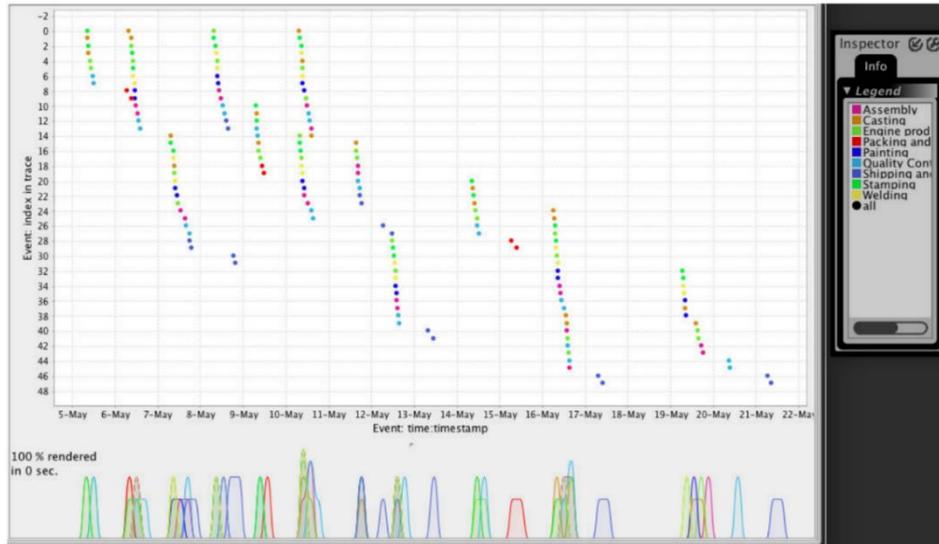


Abbildung 19: Punktediagramm, Anzahl des Prozessschritte pro einer Autoproduktion (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020)

Ein weiteres wichtiges Punktediagramm stellt Abbildung 18 dar. Dort wird dargestellt wie häufig ein einzelner Prozessschritt innerhalb eines Prozesses auftritt. In diesem Beispiel ist zu sehen, dass während des gesamten Prozesses drei Mal das Ereignis „verpacken und verladen“ auftritt. (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020)

Der andere genutzt Process Mining Algorithmus ist der Fuzzy Miner. Dieser generiert mit dem vorhandenen Ereignisprotokoll ein Fuzzy Prozessmodell, welches in Abbildung 19 dargestellt ist. In diesem Modell wird die Häufigkeit eines bestimmten Prozesses durch einen Pfeil angezeigt welcher Ereignisse oder Prozesse verbindet. Hierbei ist zu beachten, je dicker der Pfeil, desto häufiger tritt der Prozess auf, welcher zum nächsten Prozess führt. (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020)

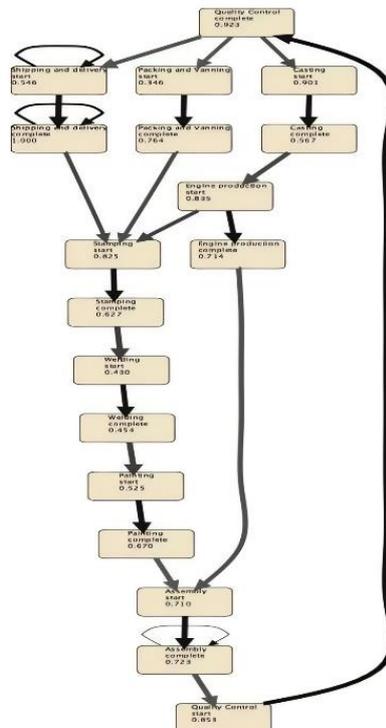


Abbildung 20: Prozessmodell welches mit Hilfe eines Fuzzy Miners generiert wurde (Siek und Malik Gunadharna Mukti 2020)

In dem Prozessmodell sind jedoch einige Pfeile zu erkennen welche in sich selbst zurückführen. Der wahrscheinlichste Grund dafür ist Überschneidung von Zeitstempel und Abfolge bei den Aktivitäten zurückzuführen. Sobald ein Prozess zu keinem Prozess mehr weiterführt, wird in dem Modell eine Schleife erstellt, sodass der Prozess wieder in sich selbst endet (Siek und Malik Gunadharm Mukti 2020).

Für die Konformitätsprüfung werden einige statistische Bewertungsmaße genutzt. Diese sind in Abbildung 21 dargestellt. Die „Move-Model Fitness“ von 0,97, die „Trace Fitness“ von 0,94 und die „Move-Log Fitness“ von 0,97 deuten auf eine hohe Konformität hin. Die „Raw Fitness Cost“ von 2,75 hingegen sind kein guter Indikator für die Konformität. Dies liegt jedoch wahrscheinlich an einer zu geringen Anzahl der Fälle in den Ereignisprotokolldaten (Siek und Malik Gunadharm Mukti 2020).

	Average	Max.	Min.	Std. Deviation	#Case Value of 1.00
Raw Fitness Cost	2.75	5	0	2.22	0
Calculation Time (ms)	2,378.50	2,677	2,031	274.59	0
Num. States	2,771.00	4,813	1,244	1,531.30	0
Move-Model Fitness	0.97	1	0.92	0.04	2
Trace Fitness	0.94	1	0.9	0.04	1
Move-Log Fitness	0.97	1	0.93	0.03	1
Trace Length	42	48	30	8.49	0
Queued States	7,806.50	9,574	6,516	1,416.13	0

Abbildung 21: Statistische Evaluierung (Siek und Malik Gunadharm Mukti 2020)

Process Mining in Cyber-Physischen Produktions Systemen

Im folgenden Abschnitt wird ein innovativer Ansatz zur Entwicklung eines Frameworks für die automatische Modellgenerierung und Datenintegration in Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) erörtert. Ziel ist es, durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien die Digitalisierung in Produktionsumgebungen zu beschleunigen. Das Kernanliegen dieses Frameworks besteht darin, über den gesamten Lebenszyklus der Anlage hinweg eine präzise Abstimmung zwischen dem physischen System und dem zugehörigen Simulationsmodell sicherzustellen. Angesichts der Tatsache, dass konventionelle Methoden der Datenintegration oft nicht ausreichen, um mit strukturellen Veränderungen im System, wie beispielsweise Maschinenausfällen, effektiv umzugehen, bietet die neuartige Grundstruktur eine Lösung für dieses Problem. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie über die reine Datenintegration hinausgeht und gleichzeitig ein Modell automatisch generiert, während Daten integriert werden (Tan et al. 2023).

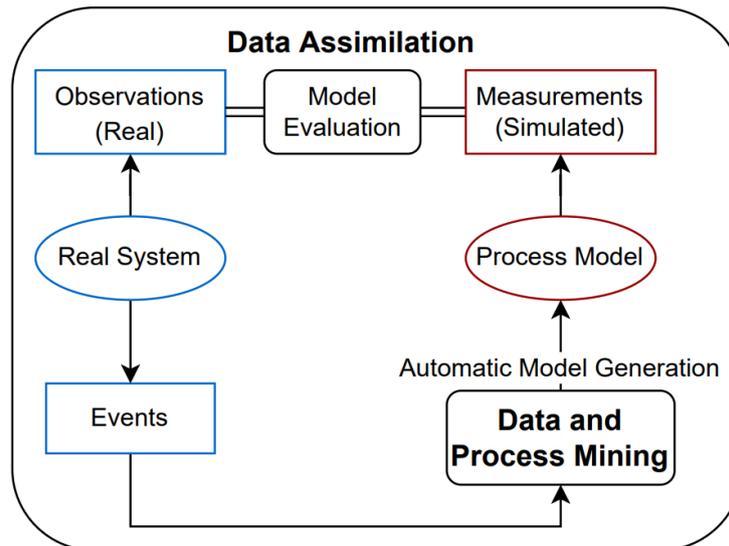


Abbildung 22: Automatische Modellgenerierung (Tan et al. 2023)

Dieser fortschrittliche Ansatz ermöglicht eine Reduktion von Zeit und Kosten im Modellaufbau und führt zur Generierung eines präziseren Modells. Unter Einsatz von Daten- und Prozess-Mining-Techniken entsteht aus den gesammelten Daten ein umfassendes Prozessmodell. Für die Entscheidungsfindung im Produktionsprozess kommen Entscheidungsbaumklassifikatoren zum Einsatz, die auf den Attributen der erfassten Ereignisse basieren. Dies ermöglicht die Modellierung komplexer Entscheidungsflüsse und die Berücksichtigung von Ressourcenkapazitäten. Weiterhin wird eine innovative Methode zur Datenintegration vorgeschlagen, die es ermöglicht, Modelle iterativ auf Basis neuer Daten zu generieren. Jedes Modell wird simuliert, um die Systemleistung zu bewerten, die anschließend mit der realen Leistung des Systems verglichen wird, um das bestmöglich abgestimmte Modell auszuwählen. Darüber hinaus werden durch Prozess-Mining unvollständige Prozesse aus den Ereignisprotokollen entfernt und wichtige Leistungsdaten, wie beispielsweise Produktionszeiten, sowie Kapazitätsinformationen in das Modell integriert (Tan et al. 2023).

Abschließend wird eine Fallstudie präsentiert, die die Anwendung dieses Ansatzes in einem Unternehmenskontext illustriert. Das vorgestellte Framework beweist seine Fähigkeit, sich an Veränderungen in der Systemstruktur anzupassen und dabei ein kohärentes Simulationsmodell zu erstellen (Tan et al. 2023).

Process Mining in Fertigungsprozessen und Engpassanalysen

In der vorliegenden Arbeit wird ein integrativer Ansatz vorgestellt, der Process Mining und Value Stream Techniques vereint, um sowohl die Modellierung von Prozessen als auch die Analyse von Engpässen in digitalen Fertigungsprozessen zu ermöglichen. Besonders hervorgehoben wird die Chance für Fertigungsunternehmen, durch die Nutzung von Produktionsdaten in einem digitalisierten Ökosystem, signifikante Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Ein zentraler Aspekt des Ansatzes ist die detaillierte Untersuchung von Engpässen, die nicht nur deren Identifikation, sondern ebenso die Eruiierung ihrer Ursachen umfasst (Rudnitckaia et al. 2020).

Im Rahmen des ersten methodologischen Ansatzes wird die Bedeutung der Prozessmodellierung mittels Process Mining unterstrichen. Durch den Einsatz spezifischer Algorithmen des Process Mining werden aus historischen Produktionsdaten deskriptive Modelle des Fertigungsprozesses generiert. Diese Modelle geben Einblick in die realen Prozessabläufe und bilden die Basis für weiterführende Analysen. Die Prozedur umfasst mehrere Schlüsselschritte:

Datenauswahl und -aufbereitung: In diesem initialen Schritt werden relevante Daten aus dem Informationssystem extrahiert und Prozessinstanzen definiert (Rudnitckaia et al. 2020).

Modellentwicklung: Verschiedene Algorithmen, wie der Alpha Miner, Fuzzy Miner oder Inductive Miner, werden angewandt, um aus den aufbereiteten Daten ein Prozessmodell zu erstellen. Dieses Modell illustriert die Sequenz der Aktivitäten und ihre Verbindungen (Rudnitckaia et al. 2020).

Anpassung und Validierung des Modells: Nach der Entwicklung des Modells wird dieses in Absprache mit Prozessverantwortlichen abgestimmt und validiert, um Fehlinterpretationen auszuschließen und die erforderliche Präzision zu sichern (Rudnitckaia et al. 2020).

Der zweite methodologische Ansatz fokussiert sich auf die Engpassanalyse mittels Process Mining. Ziel ist es, nach der erfolgreichen Etablierung des Prozessmodells, potenzielle Engpässe zu identifizieren und deren Ursachen zu analysieren. Hierfür werden zwei spezifische Methoden vorgeschlagen:

TimeLag-Methode:

Diese Methode analysiert die Zeitverzögerungen zwischen aufeinanderfolgenden Operationen, um Engpässe aufzudecken. Dabei wird gezielt nach ungewöhnlich langen Verzögerungen gesucht, die auf Engpässe hinweisen könnten (Rudnitckaia et al. 2020).

Confidence Interval-Methode:

Auf statistischen Berechnungen fußend, vergleicht diese Methode die tatsächliche Wartezeit (Elapsed Queue Time, EQT) mit einem vordefinierten Konfidenzintervall. Überschreitet die Wartezeit eines Prozessschrittes das Konfidenzintervall deutlich, wird dieser als potenzieller Engpass markiert. Die Methode erlaubt es, mehrere Engpässe entlang des Produktionsprozesses zu erkennen und zu untersuchen, ob diese upstream oder downstream liegen (Rudnitckaia et al. 2020).

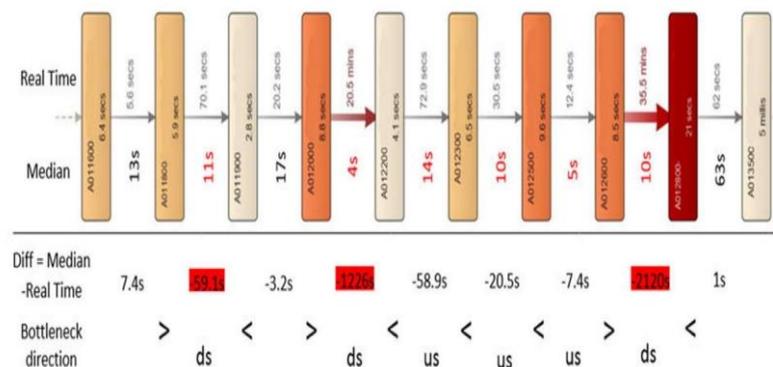


Abbildung 23: Beispiel im Falle der Confidence Intervall Methode (Rudnitckaia et al. 2020)

Zusammenfassend ermöglicht der vorgestellte Ansatz eine tiefgehende Analyse und Optimierung von Fertigungsprozessen durch eine präzise Modellierung und gezielte Engpassanalyse, welche die Grundlage für effiziente und effektive Produktionsabläufe bildet.

Process Mining und Spieltheorie: Neuartige Wege in der Anomalie Erkennung

Im Zuge der zunehmenden Dezentralisierung von Produktionsprozessen, besonders im Bereich der additiven Fertigung, gewinnt die Erkennung von Anomalien signifikant an Bedeutung. Angesichts der verstärkten Nutzung von Cloud-Infrastrukturen und der möglichen Produktion sicherheitskritischer Bauteile, erhöht sich das Risiko von Cyberangriffen. Process Mining bietet hier einen wertvollen Ansatz, indem es Ereignislogs verschiedener Produktionsstätten analysiert, um ein detailliertes Bild der Produktionsaktivitäten zu zeichnen (Saraeian und Shirazi 2020).

Um Anomalien rechtzeitig identifizieren und entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können, lässt sich eine ereignisbasierte Anomalie Erkennung nahtlos in existierende Business Process Management-Systeme integrieren. Diese Technik nutzt Process Mining in Kombination mit spieltheoretischen Methoden, um potenzielle Sicherheitsbedrohungen aufzuspüren. Durch die Implementierung von Modulen wie Daten-Vorprozessoren, Konformitätsprüfern und Optimierern für die Anomalie Erkennung wird eine intelligente Steuerung der Aktivitäten im additiven Fertigungsprozess ermöglicht. Dabei bereiten Vorprozessoren die Daten aus den Ereignislogs auf, während Konformitätsprüfer das tatsächliche Prozessverhalten mit den Erwartungen abgleichen. Optimierer für die Anomalie Erkennung verbessern mittels spezifischer Algorithmen die Erkennungsrate. Process Mining dient in diesem Zusammenhang als fundamentale Basis für die Datenauswertung und das Verständnis von Prozesskonformität (Saraeian und Shirazi 2020).

Die zugrunde liegende Analyse stützt sich auf die durch Process Mining extrahierten, verteilten Ereignislogs und nutzt eine Kombination fortschrittlicher Algorithmen wie „Particle Swarm Optimization“, „Firefly“ und „AdaBoost“, die in ein spieltheoretisches Modell integriert sind. Die Spieltheorie fungiert dabei als Optimierungsmechanismus, um optimale Strategien für die Erkennung von unzuverlässigem Verhalten zu entwickeln (Saraeian und Shirazi 2020).

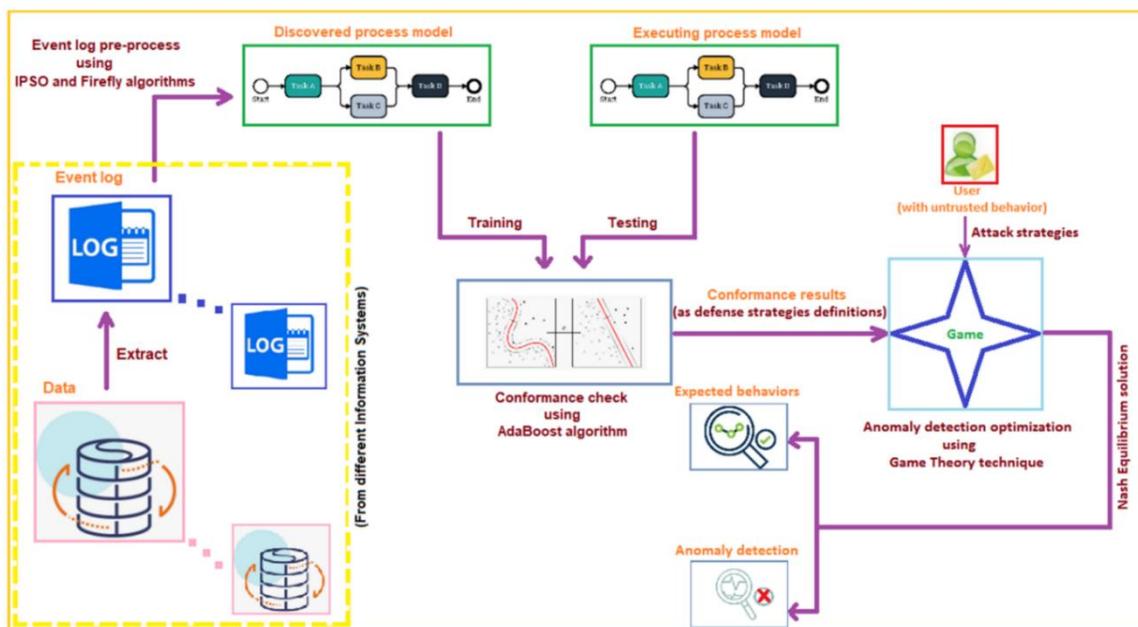


Abbildung 24: Ereignisbasiertes Komponentenschema (Saraeian und Shirazi 2020)

4.2 Methodische Ansätze und Anwendungen von Petri-Netzen (Baiz)

In diesem Abschnitt wird eine Darstellung und Erläuterung der derzeitigen methodischen Ansätze in der Produktion und Logistik geboten, die durch eine Literaturrecherche herausgearbeitet wurden.

Optimierung der Anordnung von Produktionsanlagen und Logistikprozessen durch Kombination von zeitgesteuerten Petri-Netzen und systematischer Layoutplanung

Die vorliegende Arbeit von Hanwen et al. (2020) zielt darauf ab, die Probleme eines unangemessenen Layouts, unorganisierter Logistikprozess und unausgeglichener Produktionslinien in Fertigungsanlagen zu lösen. Dabei wird ein zeitbehaftetes Petri-Netz-Modell basierend auf dem Produktionsprozess und den Funktionen jeder Produktionseinheit erstellt. Dieses Modell dient zur Erstellung einer FlexSim-Simulation des Logistiksystems der Anlage. Das erstellte FlexSim-Modell wird genutzt, um das ursprüngliche Layout der Anlage zu simulieren und durch eine umfassende Analyse der Simulationsdaten eine Verbesserungsstrategie zu entwickeln. Durch die Kombination mit der systematischen Layoutplanung werden relevante Beziehungen zwischen den Produktionseinheiten abgeleitet und ein verbessertes Layout der Einrichtung festgelegt. Mit dieser Methode soll das Ziel erreicht werden, die Leerlaufquote sowie die Produktionseffizienz zu steigern (Hanwen et al., 2020).

Durch die zunehmende Automatisierung in der Fertigungsindustrie verengen sich die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Kostenreduktion. Daraus resultiert eine Verlagerung der Wettbewerbsschwerpunkte hin zu neuen Bereichen wie Logistiktechnologien. Die Bedeutung der Anlagenplanung wird als wesentlicher Bestandteil zur Verbesserung von Produktionssystemen unterstrichen. Es wird dargelegt, wie eine vernünftige Anordnung der Produktionsstätten die Durchlaufzeiten von Arbeitsprozessen und Bauteilen verringern und die Fertigungszyklen verkürzen kann, was wiederum die Übertragungskosten um etwa 30% reduzieren kann (Hanwen et al., 2020).

Die Autoren verdeutlichen die Anwendbarkeit der Methode anhand einer Fallstudie. Ein Großhersteller für Drehzapfenlager wird hier vorgestellt. Trotz einer jährlichen Produktionskapazität von etwa 15000 Einheiten beträgt die Auftragsmenge nur etwa 8000 Einheiten bei einer Kapazitätsauslastungsrate von lediglich 53%. Nach einer Unternehmensfusion und der Verlagerung von Produktionsprozessen wurden Probleme deutlich. Es führte zu einem unpassenden Layout der Produktionsstätten, unübersichtlichen Logistikrouten und der Notwendigkeit langer Transportwege innerhalb der Fabrik. Zusätzlich führten unbefriedigende Produktionszyklen und unausgeglichene Produktionslinien zu erhöhtem Materialfluss und Logistikkosten (Hanwen et al., 2020).

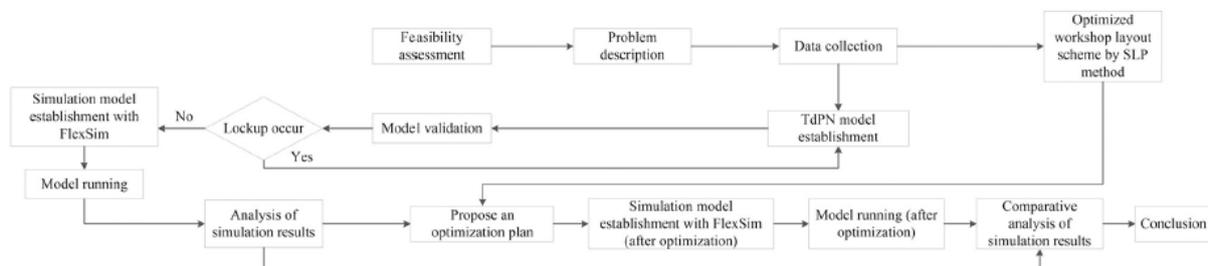


Abbildung 25: Simulationsprozess-Diagramm (Hanwen et al., 2020)

Der Prozess der Modellierung und Simulation für das System umfasst drei wesentliche Phasen:

Vorbereitungsphase: In dieser Anfangsphase erfolgt eine Machbarkeitsprüfung, eine Beschreibung des Problems und eine Datensammlung. Die Machbarkeitsprüfung dient dazu, die Anwendbarkeit der systematischen Layoutplanung und der Petri-Netz-Modellierung zu bewerten. Bei der Problembeschreibung geht es um eine genaue und umfassende Erfassung der Informationen über den Produktionsprozess und die Verteilung der Anlagenausrüstung, um Probleme zu identifizieren und die Aufgaben für die Modellierung und Simulation zu klären. Die Datenerfassung beinhaltet hierbei die Sammlung von Informationen über den Schichtplan, die Bearbeitungszeiten der Ausrüstung, die Produktionskapazität und die Fläche der Produktionsstätte (Hanwen et al., 2020).

Modellierungs- und Simulationsphase: Zunächst wird ein TdPN-Modell erstellt und mathematisch analysiert, das die Eigenschaften des realen Produktionssystems anhand des in der Vorbereitungsphase beschriebenen Produktionsprozesses genau darstellt. Anschließend wird das FlexSim-Simulationsmodell entwickelt, indem das Petri-Netz-Modell in die Software übertragen wird (Hanwen et al., 2020).

Analyse- und Optimierungsphase: In dieser abschließenden Phase werden die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe analysiert, um die Ursachen für die Probleme und Unausgewogenheiten in der Produktion zu ermitteln. Basierend auf den identifizierten Problemen und unter Einbeziehung des verbesserten Werklayouts, das mit der SLP-Methode erarbeitet wurde, wird eine Verbesserungsstrategie vorgeschlagen. Abschließend wird die vorgeschlagene Methode und Verbesserungsstrategie durch Ausführen verifiziert und analysiert (Hanwen et al., 2020).

Die Einrichtung und Ausführung des Simulationsmodells erfolgt mithilfe der FlexSim-Software, die ein objektorientiertes visuelles Simulationsmodell erstellt. Dieses Modell stellt eine Verbindung zum Petri-Netz-Modell her, wobei in diesem Netzwerk abgebildete Anlagenelemente verschiedenen Ressourcentypen im FlexSim entsprechen. Jeder Prozessschritt wird als Einheit mit spezifischen Eingaben und Ausgaben modelliert, wobei Änderungen innerhalb des Petri-Netzes den Verbindungsstellen der FlexSim-Entitäten zugeordnet sind. Dies erlaubt eine genaue Überprüfung der Modelllogik und gewährleistet eine treue Nachbildung des tatsächlichen Produktionssystems (Hanwen et al., 2020).

Nach der Implementierung des Simulationsmodells werden die spezifischen Prozessparameter eingestellt, basierend auf dem Produktionsablauf. Die Simulation wird aktiviert, um die Produktionsdynamik visuell zu erfassen, wobei eine Endzustandssimulation angewandt wird, um umfassende Leistungsdaten des Logistiksystems zu erheben. Die daraus resultierenden Daten liefern aufschlussreiche Informationen über den Durchlauf der Produkte durch das System (Hanwen et al., 2020).

Durch den kombinierten Einsatz von TdPN und SLP sowie die anschließende Simulation und Analyse mittels FlexSim konnte das Forschungsteam effektive Verbesserungsstrategien vorschlagen, die zu einer Reduktion der Produktionszeiten und -kosten sowie zu einer besseren Auslastung der Produktionsanlagen führten (Hanwen et al., 2020).

Integration von RFID und Petri-Netzen zur Optimierung diskreter Fertigungs- und Logistiksysteme

Der vorliegende Beitrag von Tavares und Silva (2022) präsentiert ein innovatives Framework, das RFID-Technologie und Petri-Netze kombiniert, um ein Managementsystem für Fertigungs- und Logistikprozesse zu realisieren, genannt „PNRD/iPNRD Arduino Library Management System – PALMS“. Die Kernidee des PNMS ist die Vermittlung zwischen Petri-Netzen und automatisierten Fertigungs- und Logistiksystemen, indem RFID-Lesegeräte in ein lokales Netzwerk eingebunden werden (Tavares & Silva, 2022).

Die Autoren diskutieren verschiedene Methoden zur Steuerung diskreter Ereignissysteme und stellen fest, dass viele der bestehenden Ansätze die Kontrollebene von den eigentlichen Prozessen trennen, was eine schnelle Rekonfiguration der Prozesse erschwert. In diesem Zusammenhang wird die Notwendigkeit eines neuen Ansatzes deutlich, der eine engere Verbindung zwischen dem Steuerungssystem und dem Shopfloor ermöglicht. Insbesondere wird die Integration von RFID-Technologie und Petri-Netzen als potenzielle Lösung vorgeschlagen, um eine Informationsverwaltung innerhalb eines nicht strukturierten physischen Rahmens zu realisieren (Tavares & Silva, 2022).

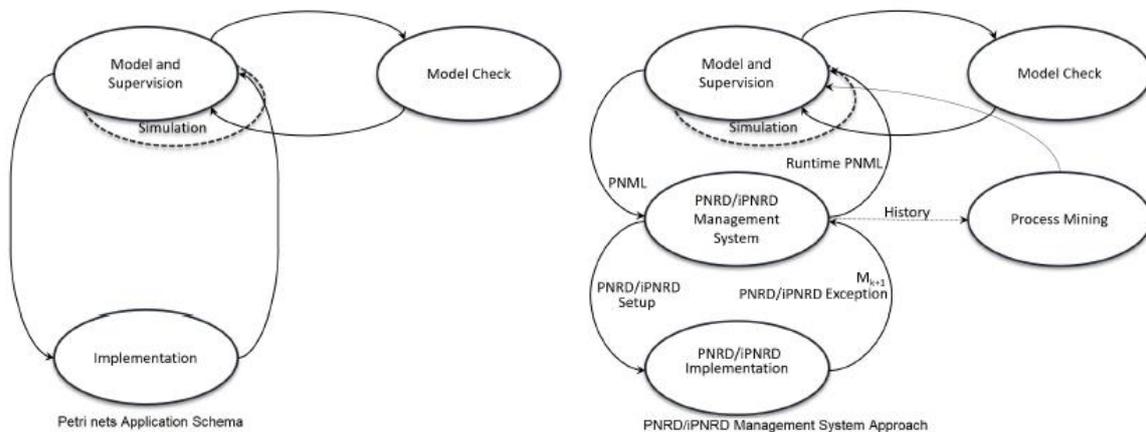


Abbildung 26: PNMS-Konzept (Tavares & Silva, 2022)

Abbildung 26 zeigt zwei Schemata, die die Anwendung und das Management von Petri-Netzen darstellt. Auf der linken Seite ist ein allgemeines Anwendungsschema für Petri-Netze zu sehen, das den Zyklus von Modellierung, Überwachung und Simulation bis hin zur Implementierung abbildet. Hier ist ein Feedback-Loop durch gestrichelte Linien angedeutet, der eine kontinuierliche Überprüfung und Anpassung des Modells ermöglicht, bevor es in die Implementierungsphase geht.

Auf der rechten Seite wird das spezifische Konzept eines PNRD/iPNRD-Management-Systems veranschaulicht. Dieses Schema zeigt, wie das Petri-Netz-Modell (PNML) in das Management-System eingespeist wird, das in zwei Hauptmodi funktioniert: Setup und Runtime. Während der Setup-Phase werden das Petri-Netz-Modell vorbereitet und die RFID-Parameter festgelegt. Im Runtime-Modus wird das System dann in Echtzeit überwacht. Dies schließt die Verfolgung des Zustands der RFID-Tags, das Erfassen von Ausnahmen und die Historie mit ein. Das System bietet auch die Möglichkeit, die Daten für Process Mining zu nutzen, um Prozesse weiter zu analysieren und zu optimieren.

Wie bereits erwähnt arbeitet PALMS in zwei Modi – dem Setup- und dem Runtime-Modus. Im Setup-Modus erfolgt die Konfiguration und Vorbereitung der Systemumgebung. Hier werden Petri-Netz-Modelle (PNML-Dateien) in das System geladen und die nötigen Parameter für RFID-Tags und -Lesegeräte werden festgelegt. Durch die Verwendung von RFID-Tags und -Lesegeräten, die mit den Petri-Netzen synchronisiert sind, ermöglicht das System eine direkte Interaktion und Datenaustausch zwischen den physischen Objekten und dem digitalen Modell.

Dies erlaubt eine Echtzeitüberwachung und -steuerung der Prozesse, indem Zustandsänderung in den Petri-Netzen sofort auf Veränderungen in der physischen Umgebung reagieren und umgekehrt. Im Runtime-Modus überwacht das System, simultan mehrere Zustandsberechnungen von PNRD/iPNRD, die Informationen wie RFID-Tag-ID, neuer Markierungsvektor, ID der ausgelösten Transition, Ausnahmeinformationen und weitere Daten enthalten. Wird eine Unregelmäßigkeit festgestellt, so wird PALMS benachrichtigt. Eine weitere wichtige Funktion des Runtime-Modus ist die Verwaltung der Datenbank, die Beziehungen zwischen RFID-Tags, Markierungen und Transitionen speichert. Basierend auf diesen Informationen werden die neuen Markierungen und ausgelösten Transitionen in der Runtime-PNML-Datei aktualisiert und an ein übergeordnetes Überwachungssystem gesendet (Tavares & Silva, 2022).

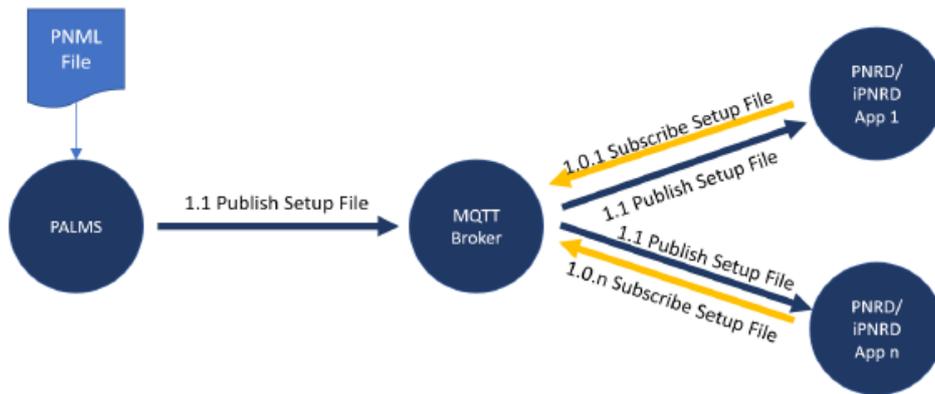


Abbildung 27: Setup-Modus (Tavares & Silva, 2022)

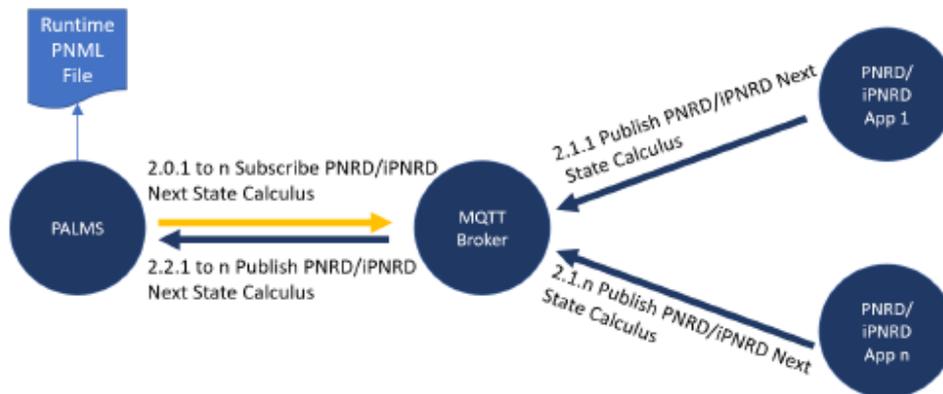


Abbildung 28: Runtime-Modus (Tavares & Silva, 2022)

PALMS ermöglicht auch einen Datenaustausch über einen MQTT-Broker, durch das Einbinden eines TCP/IP Netzwerkkommunikationssystems. Die beiden Abbildungen zeigen das Datenflussdiagramm des PALMS-Frameworks. Im Setup-Modus wird aus einer PNML-Datei eine Setup-Datei generiert, welche über einen MQTT-Broker veröffentlicht (publish) wird. Diverse PNRD/iPNDR-Anwendungen abonnieren (subscribe) diese Setup-Datei vom Broker und erhalten so die nötigen Konfigurationsinformationen. Im Runtime-Modus erhält PALMS eine Runtime-PNML-Datei, welche die aktuellen Zustände und Daten beinhaltet. PALMS abonniert Zustandsberechnungen der PNRD/iPNRD-Anwendungen, die durch den Broker bereitgestellt werden. Auf Grundlage dieser Informationen veröffentlicht PALMS aktualisierte Zustandsberechnungen zurück an die Anwendungen.

Beide Diagramme zeigen den Datenfluss zwischen dem PALMS-System und den PNRD/iPNRD-Anwendungen, wobei der MQTT-Broker als zentrale Vermittlungsstelle dient. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Aktualisierung und Synchronisation zwischen dem Petri-Netz-Modell und den realen Systemkomponenten (Tavares & Silva, 2022).

In dieser Studie wurde das PALMS-System vorgestellt, das als praktische Implementierung des Petri-Netz-Management-System (PNMS) dient. Es integriert Fertigungs- und Logistikprozesse in ein übergeordnetes Modell, das durch Petri-Netze strukturiert ist und legt einen Grundstein für zukünftige Entwicklungen im Bereich der vernetzten, automatisierten Systeme.

Logistikdistributionsprozess auf Basis stochastischer Petri-Netze und Big-Data-Algorithmen

Dieser Beitrag mit dem Titel „Logistics Distribution Process Design Based on Stochastic Petri Nets and Big Data Algorithms“ von Zhang und Li (2022) untersucht die Optimierung von Logistikdistributionsprozessen durch die Integration von stochastischen Petri-Netzen (SPN) und Big-Data-Algorithmen. Die Studie zielt darauf ab, die Effizienz von Logistiksystemen zu verbessern und die Kosten zu senken, indem sie die Prozesse neugestaltet und optimiert (Zhang & Li, 2022).

Die Autoren präsentieren einen umfassenden Ansatz, der auf der präzisen Modellierung und Analyse der verschiedenen Komponenten des Logistikdistributionsprozesses basiert, einschließlich der Auftragsbearbeitung, der Fahrzeugdisposition, der Lagerausgangsverarbeitung und des finalen Warentransports an den Kunden (Zhang & Li, 2022).

Durch die Anwendung von SPN auf diese Logistikkomponenten gelingt es, die dynamischen Abläufe und diskreten Wechselwirkungen innerhalb des Systems sichtbar zu machen und einer systematischen Untersuchung zugänglich zu machen. SPN ermöglichen es, sowohl die Informationsflüsse als auch die physischen Warenbewegungen innerhalb des Logistiknetzwerks detailliert abzubilden und zu analysieren (Zhang & Li, 2022).

Die Autoren betonen die Bedeutung der quantitativen Analyse, die durch SPN ermöglicht wird, insbesondere im Hinblick auf die Optimierung von Prozesseffizienz und die Reduzierung der Logistikkosten. Durch die Anwendung stochastischer Modelle werden nicht nur die statischen Strukturen, sondern auch die dynamischen und zufälligen Eigenschaften der Logistikprozesse erfasst, was eine realistischere Bewertung der Systemleistung ermöglicht (Zhang & Li, 2022).

Die Nutzung von Big-Data-Algorithmen in Kombination mit SPN ermöglicht es, die umfangreichen und komplexen Datenmengen, die innerhalb des Logistiksystems generiert werden, effektiv zu verarbeiten und zu analysieren. Diese Daten umfassen Informationen über Kundenbestellungen, Lagerbestände, Fahrzeugbewegungen, Lieferzeiten und viele weitere Aspekte (Zhang & Li, 2022).

Im Rahmen einer Feldstudie wurde ein Modell erstellt, das auf realen Daten eines Verteilungszentrums basiert. Diese Daten wurden analysiert und in Vorhersageinformationen umgewandelt, um spezifische Parameter wie Abteilungen, Ausstattung und Personal festzulegen. Insbesondere bei kleinen Sendungsmengen oder wenn Lieferprobleme auftreten, bietet das stochastische Petri-Netz-Modell eine Lösung, indem es verschiedene Szenarien simuliert und die wahrscheinlichsten Ereignisse auswählt, um die Probleme effektiv zu lösen. Es zeigte sich, dass bei Ausfällen innerhalb des Systems schnell reagiert werden kann, aber gleichzeitig auch, dass Engpässe im System zu Verzögerungen und Ressourcenverschwendung führen können. Es wird ebenfalls betont, dass das Modell bei Entscheidungen in Echtzeit und großen Maßstab an seine Grenzen stößt (Zhang & Li, 2022).

Diese synergistische Nutzung von SPN und Big-Data-Algorithmen ermöglicht eine umfassende Analyse der Logistikkistributionsprozesses. Sie unterstützt die Identifizierung von Ineffizienzen und Engpässen im System und bietet Grundlagen für die Entwicklung optimierter Prozesse und Strategien. Durch die Analyse von Big Data können beispielsweise optimale Routen für die Lieferfahrzeuge berechnet, die Lagerhaltung effizienter gestaltet und die Reaktionsfähigkeit auf Kundenanforderungen verbessert werden. Die Integration dieser Technologien ermöglicht es, komplexe Logistiksysteme nicht nur zu verstehen und zu analysieren, sondern auch proaktiv zu gestalten und zu steuern, was letztendlich zu einer signifikanten Steigerung der Effizienz führt (Zhang & Li, 2022).

Webbasiertes Simulationswerkzeug für die Modellierung von Produktionsprozessen

In dem Beitrag von Carlo Simon (2018) wird ein innovatives webbasiertes Simulationswerkzeug für die Modellierung und Analyse von Produktions- und Geschäftsprozessen mit Hilfe von Petri-Netzen vorgestellt. Dieses Tool adressiert die Herausforderung, komplexe Prozesse in einer für Praktiker zugänglichen und einfach zu bedienenden Umgebung zu simulieren. Die Kerninnovation liegt in der Entwicklung einer speziellen Spezifikationsprache für höhere Petri-Netze und einer webbasierten mobilen Programmier- und Simulationsumgebung, die es ermöglichen, Prozessmodelle mit einer bisher unerreichten Detailtiefe und Flexibilität zu erstellen (Carlo Simon, 2018).

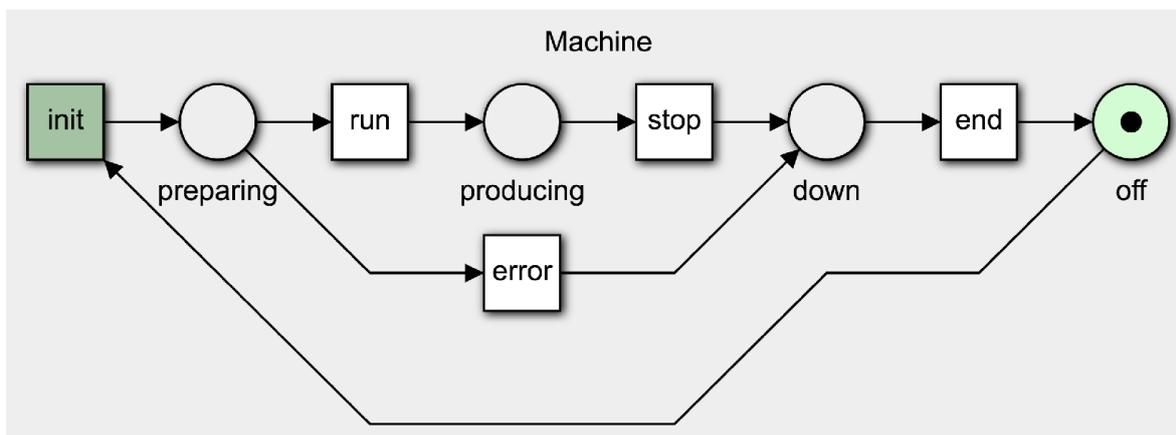


Abbildung 29: Petri-Netz Darstellung 1 (Carlo Simon, 2018)

In der obigen Abbildung wird das Verhalten einer Maschine visualisiert, die sich nach dem Initialisierungsereignis („init“) auf die Produktion eines Produkts vorbereitet. Nach einem Ausführungsereignis („run“) befindet sich die Maschine in einer eigentlichen Produktionsphase, bis ein Stoppereignis („stop“) eintritt. Anschließend wechselt die Maschine in eine Ausfallphase, bis der gesamte Prozess endet („end“). Im Falle eines Fehlereignisses („error“) wird die Produktion untersagt. Die Elemente des Netzes umfassen Transitionen wie „init“, „run“, „stop“, „error“ und „end“, die verschiedenen Phasen der Maschinenaktivität umfassen, sowie Stellen, die den Zustand der Maschine („preparing“, „producing“, „down“, „off“) anzeigen (Carlo Simon, 2018).

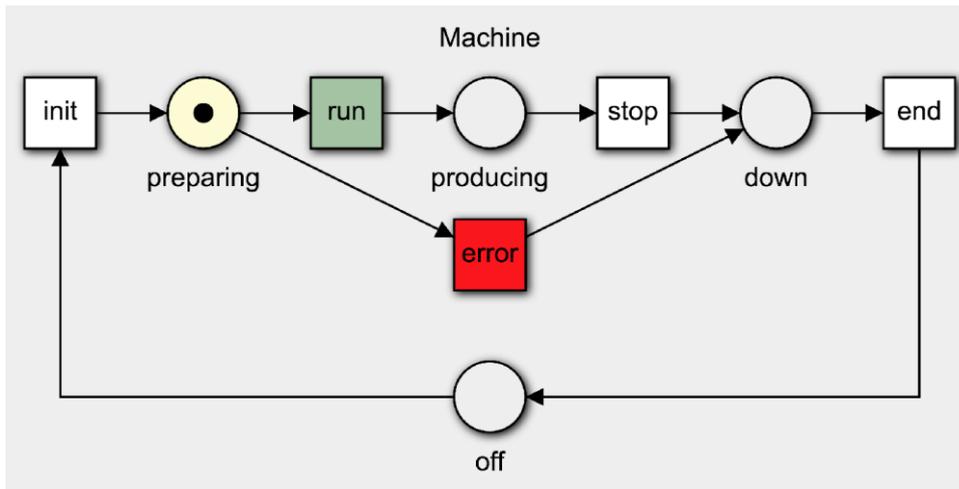


Abbildung 30: Petri-Netz Darstellung 2 (Carlo Simon, 2018)

Die Attribute der Elemente eines Petri-Netzes können einfach modifiziert werden, wie in der Abbildung veranschaulicht wird. Sie zeigt, wie spezifische Ereignisse oder Zustände innerhalb des Modells hervorgehoben werden können. Die Transition „error“ wird durch die Verwendung der Farbe Rot hervorgehoben, wenn die Transition aktiviert ist. Die gelbe Farbe der Stelle „preparing“ zeigt an, dass sich dieser Ort in einem Konflikt befindet, d.h., entweder die Transition „run“ oder „error“ kann ausgelöst werden, aber nicht beide gleichzeitig (Carlo Simon, 2018).

Ein wesentliches Merkmal für die Entwicklung von Simulationsmodellen ist die Möglichkeit, einzelne Teilsystem zu gruppieren. Die in dieser Arbeit vorgestellte Spezifikationsprache sowie die dazugehörige Simulationsumgebung erlauben es, solche hierarchischen Strukturen zu erstellen und miteinander zu verknüpfen (Carlo Simon, 2018).

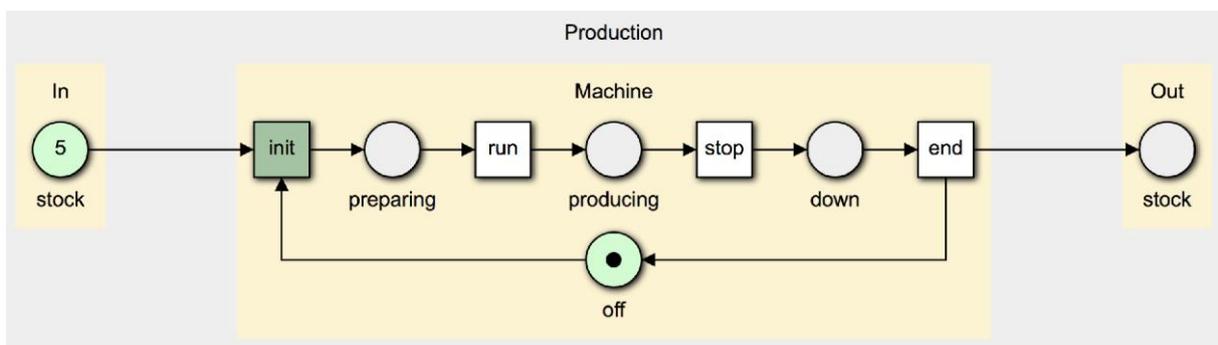


Abbildung 31: Petri-Netz Darstellung der Produktion (Carlo Simon, 2018)

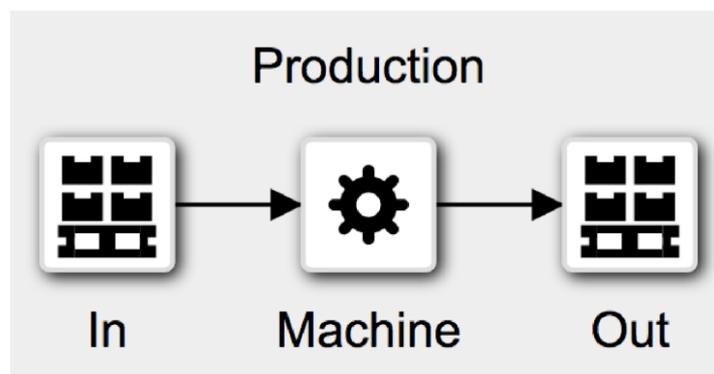


Abbildung 32: Alternative Darstellung (Carlo Simon, 2018)

Dies wird anhand eines Beispiels verdeutlicht, bei dem das übergeordnete Netzwerk „Production“ aus drei Unterbereichen besteht: „In stock“, „Machine“ und „Out stock“. Abschließend lässt sich für jeden Unterbereich ein individuelles Symbol festlegen. Die Simulationsumgebung ermöglicht einen Wechsel zwischen der detaillierten Petri-Netz-Darstellung und einer vereinfachten Symbolansicht. Die symbolische Ansicht dieses Beispiels ist in Abbildung 32 zu dargestellt.

Anders als bei klassischen Petri-Netzen, bei denen man auf den Einsatz anonymer Token beschränkt ist, wird hier eine bedeutende Erweiterung eingeführt: die Definition von Datentypen, sogenannten „Records“. Ein mit einem Ort verknüpfter „Record“ legt fest, dass die Markierung dieses Ortes nur Token des entsprechenden Datentyps enthalten darf. Dies ermöglicht das Berücksichtigen wichtiger Detailinformationen während des Produktionsprozesses (Carlo Simon, 2018).

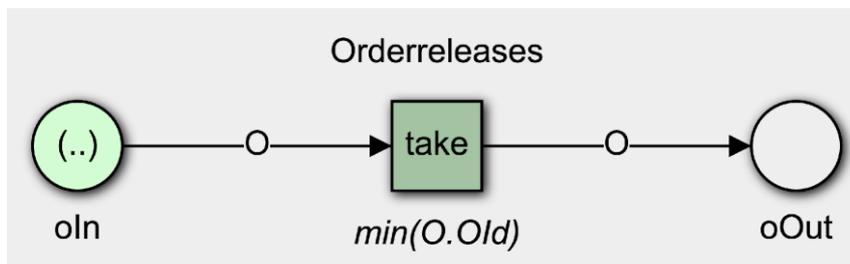


Abbildung 33: Resultierendes Petri-Netz

Ein praktisches Beispiel verdeutlicht diesen Ansatz: Es wird ein „Record“ namens „RecordOrder“ definiert, der eine Auftragsnummer („Old“), eine Priorität („Prio“) und das Datum des Auftragseingangs („Receipt“) umfasst. Zwei Stellen, „oIn“ und „oOut“ nutzen diesen „Record“ für ihre Typisierung. Hier wird anstelle von Token-Sets mit einzelnen Tokens gearbeitet. Durch die Einführung einer Auswahlregel kann die Reihenfolge bestimmt werden, in der Token von einem Ort aufgenommen werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine flexible Steuerung der Prozessdurchführung basierend auf spezifischen Kriterien wie der Auftragsnummer (Carlo Simon, 2018).

Das hier vorgestellte Werkzeug verfügt ebenfalls über einen Layout-Algorithmus, der schnelle und aussagekräftige Spezifikationen ermöglicht. Eine implementierte Schnittstelle für den Import und Export von CSV-Daten erlaubt es, reale Geschäfts- und Produktionsdaten direkt als Grundlage für Simulationen zu verwenden. Darüber hinaus können in der Petri-Netz-Ansicht Symbole verwendet werden, um auch Mitarbeitern, die mit Prozessdenken weniger vertraut sind, eine verständliche Darstellung des Prozesses zu bieten (Carlo Simon, 2018).

Der Autor weist daraufhin, dass sich die zukünftige Entwicklung des Tools auf die Integration einer Steuerungskomponente in die bestehende Simulationsumgebung konzentriert, um eine direkte Maschinenkontrolle zu ermöglichen, sowohl als auch die Kapazitäten im Bereich des Workflow-Managements zu verstärken. Ziel ist es, das Tool zu einer umfassenden Simulationsplattform zu entwickeln, die eine operative Steuerung von Unternehmensprozessen, von der strategischen Geschäftsführung bis hin zur operativen Umsetzung am Produktionsort, ermöglicht (Carlo Simon, 2018).

Automatisiertes Modellgenerierungsschema auf Basis von Petri Netzen

In der aktuellen Forschungslandschaft der Produktion nimmt die effiziente Planung und Steuerung von Produktionsprozessen eine Schlüsselposition ein. Vor diesem Hintergrund präsentiert die vorliegende Studie von Wenzelburger und Allgöwer (2019) einen innovativen Ansatz, der die Methodik der Petri Netze nutzt, um ein neues Modell für die Planung und

Steuerung von flexiblen Fertigungssystemen zu entwickeln. Die Kernidee dieses Ansatzes besteht darin, durch ein automatisiertes Modellgenerierungsschema, das auf einer Beschreibung des Produktionsprozesses und der Fabrikeinrichtungen basiert, ein detailliertes und anpassungsfähiges Modell zu erstellen (Wenzelburger & Allgöwer, 2019).

Die Forschungsarbeit unterstreicht die Bedeutung von Petri Netzen als mächtiges Werkzeug zur Darstellung und Analyse von Produktionsprozessen. Die Innovation der vorgestellten Methodik liegt in der spezifischen Anpassung der Petri Netze, um eine Unterscheidung zwischen automatisch ablaufenden Prozessen und bewusst getroffenen Entscheidungen innerhalb des Produktionsablaufs zu treffen. Dies erlaubt es, die Dynamik des Systems von den Entscheidungsprozessen zu trennen und bietet eine solide Basis für die Entwicklung einer Zustandsraumbeschreibung des Fertigungssystems (Wenzelburger & Allgöwer, 2019).

Ein zentraler Aspekt der Forschungsarbeit ist die Entwicklung von Algorithmen, die es ermöglichen, das abstrakte Produktionsproblem automatisch in ein Petri-Netz-Modell zu überführen und anschließend in eine Zustandsraumbeschreibung umzuwandeln. Diese automatisierte Umwandlung ist besonders wertvoll, da sie die Erstellung von Modellen erheblich vereinfacht und beschleunigt, was eine schnelle Anpassung an veränderte Produktionsbedingungen ermöglicht. Darüber hinaus legt die Studie dar, wie aus der Zustandsraumbeschreibung eine Feedback-Steuerung für das Fertigungssystem abgeleitet werden kann (Wenzelburger & Allgöwer, 2019).

Die Autoren veranschaulichen ihr Modell anhand einer Problemformulierung, in der ein Fertigungssystem als komplexes Gebilde charakterisiert wird, das sowohl operative Flexibilität als auch die Flexibilität in der Abfolge der Produktionsschritte erfordert. Darauf aufbauend entwickeln Wenzelburger und Allgöwer einen detaillierten Ansatz zur Erstellung eines Petri-Netz-Modells. Die vorgestellten Algorithmen generieren automatisch ein Modell, das alle potenziellen Ausführungssequenzen abbilden kann und schaffen somit eine umfassende Basis für die weitere Planung und Optimierung von Produktionsabläufen. Durch die automatische Transformation des Petri-Netz-Modells in eine Zustandsraumdarstellung wird eine präzise Darstellung der Systemdynamik ermöglicht, die wiederum die Anwendung von Feedback-Steuerungsmechanismen und Online-Optimierungsverfahren ermöglicht (Wenzelburger & Allgöwer, 2019).

Als mögliche Erweiterungen ihres Modells nennen die Autoren die Berücksichtigung weiterer Aspekte wie zyklische Produktion - bei der Produkte des Unternehmens auch gleichzeitig für deren Produktion verwendet werden –, gemeinsam genutzte Ressourcen, Puffergrößen, Rüstzeiten für Maschinen oder weitere komplexere Abhängigkeiten zwischen Aufgaben durch die Erweiterungen des Petri-Netzes (Wenzelburger & Allgöwer, 2019).

Zeitkontinuierliche Petri-Netze mit sofortigen Transitionen

In diesem Beitrag wird die Erweiterung von zeitkontinuierlichen Petri-Netzen (TCPNs) um sofortige Transitionen vorgestellt, was zur Entwicklung eines neuen Modells, bezeichnet als TCPN+I, führt. Diese Neuerung zielt darauf ab, die Modellierungsfähigkeiten von TCPNs zu verbessern, indem Ereignisse, die sich durch eine kurze Dauer auszeichnen, realistischer abgebildet werden können. Durch die Einführung von sofortigen Transitionen in das TCPN-Modell ist es möglich, dynamische Prozesse mit sehr schnellen Zustandsänderungen effektiver zu simulieren und zu analysieren (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

TCPN+I-Modelle werden formal als Erweiterung der TCPN definiert, indem sie neben den traditionellen zeitlichen Transitionen auch sofortige Transitionen einbeziehen. Die sofortigen Transitionen werden hierbei als zeitliche Transitionen mit außerordentlich hohen Übergangsraten konzipiert. Diese Konzeption erlaubt es, die Unmittelbarkeit der Ereignisse innerhalb des Modells zu simulieren, ohne die Grundstruktur und Analysemethodik von TCPNs zu verlassen (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Die Einführung von TCPN+I bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich, insbesondere im Hinblick auf die Analyse des Modells. Die unterschiedlichen Größenordnungen der Übergangsraten zwischen sofortigen und zeitlichen Transitionen können zu Problemen führen. Diese Probleme äußern sich in Schwierigkeiten bei der numerischen Simulation und Analyse, da schnelle Transitionen eine präzise Zeitintegration erfordern, während langsamere Prozesse eine Berechnung über längere Zeiträume hinweg benötigen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, präsentieren die Autoren Ansätze zur Transformation eines TCPN+I-Modells in eine Reihe dynamisch äquivalenter TCPN-Modelle ohne sofortige Transitionen. Diese Transformation ermöglicht die Anwendung bestehender Analysemethoden und Simulationstechniken, die für TCPNs entwickelt wurden, auf die erweiterten Modelle, indem sie die Komplexität und numerischen Probleme, die mit den sofortigen Transitionen verbunden sind, umgeht (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Diese Transformation eines TCPN+I-Modells in ein dynamisch äquivalentes TCPN-Modell soll gewährleisten, dass das transformierte Modell das gleiche Verhalten wie das ursprüngliche TCPN+I-Modell aufweist, ohne die Komplexität und Probleme zu erben, die mit den sofortigen Transitionen verbunden sind (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Die in der Arbeit vorgestellten Methoden umfassen mehrere Schritte, beginnend mit der Identifizierung der sofortigen Transitionen und deren Einfluss auf die Systemdynamik. Anschließend werden Strategien zur Umstrukturierung des Netzes vorgestellt, die es erlauben, die sofortigen Transitionen zu entfernen, ohne das dynamische Verhalten des Systems zu verändern. Dies kann beispielsweise durch Anpassung der Übergangsraten oder durch Einführung neuer Zwischenplätze erfolgen, um die Effekte der sofortigen Transitionen zu simulieren (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Ein wichtiger Aspekt der Transformation ist die Bewahrung der Äquivalenz zwischen dem Originalmodell und dem transformierten Modell. Dies erfordert sorgfältige Überlegungen bezüglich der Übergangsraten, Markierungszustände und möglicher Zustandsübergänge im Netz. Die Äquivalenz stellt sicher, dass Schlussfolgerungen, die aus der Analyse des transformierten Modells gezogen werden, gültig für das ursprüngliche TCPN+I-Modell sind (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Vazquez & Aguayo-Lara erläutern ebenfalls die Anwendung der modellprädikativen Regelung auf die entwickelten TCPN+I-Modelle. Hierbei liegt der Fokus auf der praktischen Relevanz der TCPN+I-Modelle für die Analyse und Optimierung realer Systeme. Ein zentraler Aspekt ist der Einsatz der Modelle für die Ermittlung von wesentlichen Leistungsindikatoren. Dies umfasst die Berechnung von Durchsätzen, Wartezeiten, Ressourcenauslastungen und anderen kritischen Kennzahlen, die für die Bewertung der Effizienz und Effektivität von Systemen unerlässlich sind (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

Wie bereits erwähnt, wird die Anwendung der modellprädikativen Regelung auf TCPN+I-Modelle beschrieben. Durch die Transformation von TCPN+I-Modellen in äquivalente TCPN-Modelle ohne sofortige Transitionen wird die Anwendung der modellprädikativen Regelung erleichtert. Dies erlaubt die Implementierung effektiver Steuerungsstrategien, die auf präzisen Modellvorhersagen basieren und somit die Systemleistung verbessern und die Einhaltung von Betriebsanforderungen sicherstellen können (Vazquez & Aguayo-Lara, 2023).

In dieser Arbeit wurde die Erweiterung der zeitkontinuierlichen Petri-Netze um sofortige Übergänge und deren Einfluss auf die Modellierung, Analyse und Steuerung dynamischer Systeme umfassend untersucht. Die Einführung von TCPN+I stellt einen signifikanten Fortschritt dar, indem sie eine präzisere Darstellung und Analyse von komplexen dynamischen Systemen ermöglicht.

4.3 Methodische Ansätze und Anwendungen von EPKs (Ramage)

EPK-Modellierung eines SPS-Service-Bus (Ashiwal et al. 2022)

Ashiwal et al. 2022 beschreiben die Notwendigkeit einer Anpassung von PLC-Software (Product Lifecycle Management) aufgrund gestiegener Anforderungen an Individualisierung, Produktqualität und Maschinenvariabilität. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird das Konzept des PLC-Service-Busses vorgeschlagen. Dabei kommunizieren unterschiedliche Softwarekomponenten über einen serviceorientierten Bus, um die Kopplung zu reduzieren und Anpassbarkeit, Flexibilität und Modularität zu erhöhen. Es gibt jedoch keine standardisierten Modelle, um diese Interaktionen klar zu beschreiben und bisher keine Implementierung des PLC-Service-Busses, um PLC-Software auf Basis von Message Interaction Patterns (MIPs) zu entwickeln. MIPs sind standardisierte Muster, die die verschiedenen Arten der Nachrichteninteraktion zwischen Softwarekomponenten in einem System beschreiben.

Das Vorgehen wird mit einer Verschlussstation des VDMA R+A OPC UA Demonstrators als Beispiel validiert. Mit einem EPK-Modell werden die Interaktionen zwischen den verschiedenen Softwarekomponenten der Verschlussstation beschrieben, um MIPs zu identifizieren. Basierend auf diesen MIPs wird die PLC-Software der Verschlussstation mithilfe der IEC 61499 Norm implementiert.

Abbildung 34 stellt einen Ausschnitt aus dem Gesamtprozess für die Verschleißstation dar, der die Bereitstellung der Verschlüsse zeigt. Sie zeigen die für jede Funktion und jedes Ereignis verantwortlichen Einheiten durch vertikale Linien im Diagramm. Der Prozess beginnt mit dem Ereignis "CAP REQUIRED", das von der vorhergehenden Station ausgelöst wird und die Kamera, den Vibrator und den Bunker einschließt. Die Kamera überprüft die Verfügbarkeit und die Ausrichtung der Verschlüsse, und der Vibrator passt ihre Position gegebenenfalls an. Schließlich sendet die Kamera ein "CAPS REACHABLE"-Ereignis, um das Verschließen des Bunkers in einem späteren Prozess namens "Place Cap" auszulösen.

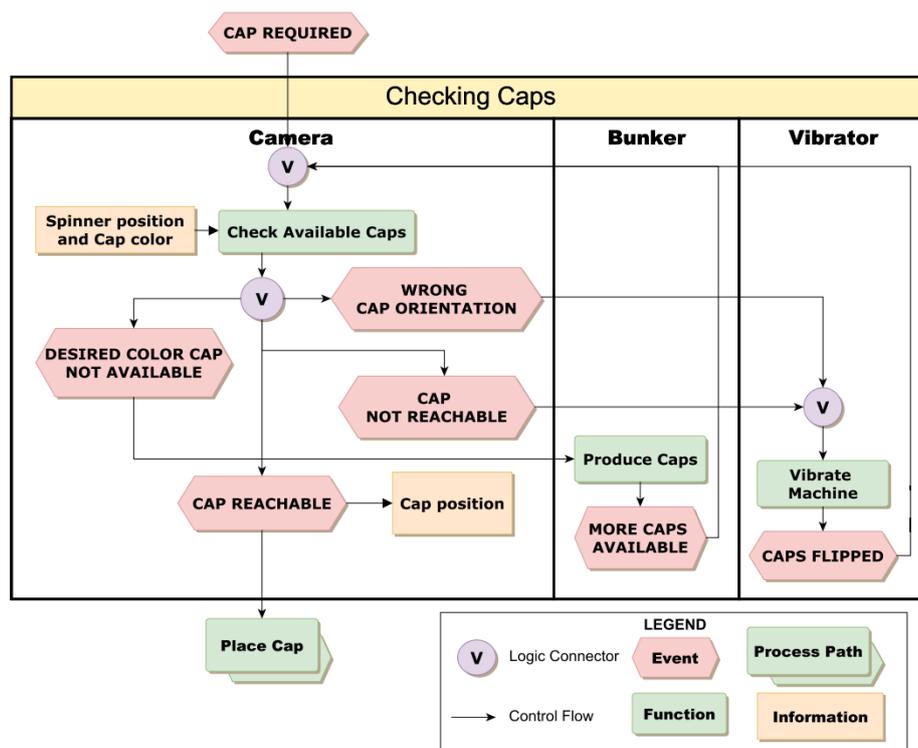


Abbildung 34: Ausschnitt EPK Modell einer Verschlussstation (Ashiwal et al. 2022)

EPK-Modellierung für die Evaluierung eines KMU-Netzwerks (Mahmood et al. 2018)

Mahmood et al. 2018 beschreiben den Einsatz von Industrial Internet Technologies in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) im Fertigungssektor. Diese Technologien ermöglichen die gemeinsame Nutzung von Informationen, Datenintegrationsplattformen und Kommunikationsschnittstellen in KMU-Netzwerken. Um effizient zusammenzuarbeiten und wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es notwendig, dass das Leistungsniveau der einzelnen Unternehmen innerhalb des Netzwerks bekannt und sichtbar ist. Aufgrund des aktuellen Mangels an harmonisierten Bewertungsmethoden wird ein Ansatz zur Leistungsbewertung von Produktionssystemen in einem Netzwerk postuliert. Dieser vorgeschlagene Konzeptansatz ermöglicht es, die Leistung eines Produktionssystems in einem KMU-Netzwerk mithilfe von IoT-Technologien zu bewerten und zu überwachen. Dies trägt dazu bei, die Zusammenarbeit und Wettbewerbsfähigkeit innerhalb des Netzwerks zu verbessern. Um die relevanten Prozesse zu modellieren, wird in einer Case Study die EPK-Modellierung verwendet.

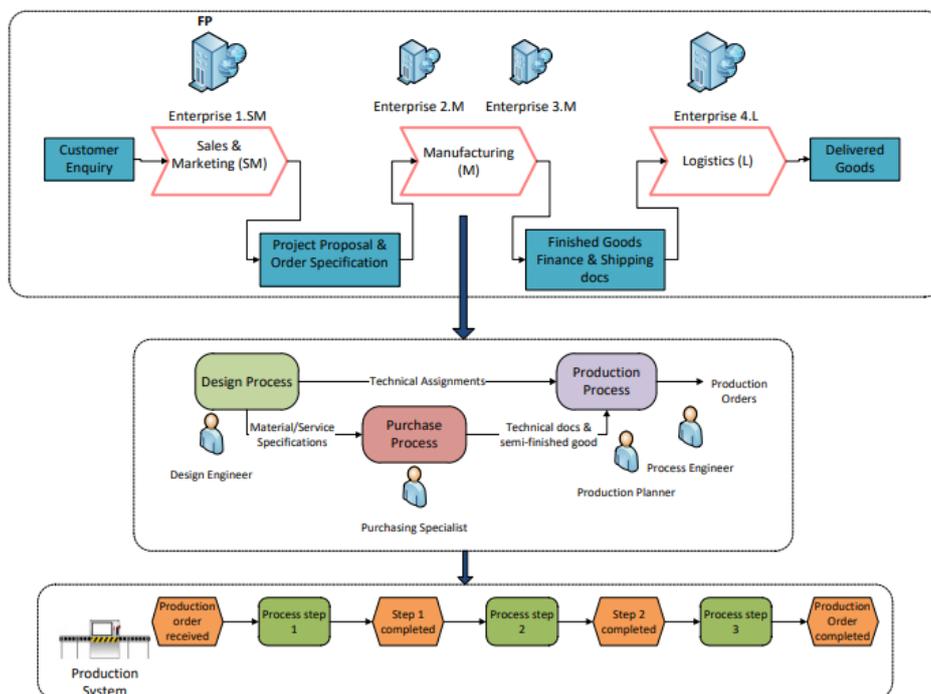


Abbildung 35: Ebenen des KMU-Prozessmodells (Mahmood et al. 2018)

Das Ziel der Prozessmodellierung besteht darin, die Unternehmensstruktur, die Prozessabfolge mit Eingaben und Ausgaben, Verantwortlichkeiten und den Prozessinhaber zu definieren. Die Abbildung 35 zeigt die Ebenen der Prozessmodellierung eines virtuellen Unternehmens. Auf der obersten Ebene der Prozessmodellierung, der Value-Added Chain, werden Geschäftsbereiche und ihre Besitzer dargestellt. Dies kann auch ein kleines oder mittleres Unternehmen (KMU) repräsentieren. Auf der zweiten Ebene werden die Prozessphasen mit ihren Eingaben und Ausgaben sowie den verantwortlichen Partnern dargestellt. Die dritte Modellierungsebene, die mit Hilfe von EPKs durchgeführt wird, bestimmt die Abfolge der Prozessschritte oder Aktivitäten und zeigt, wo der Prozesswert generiert wird.

Modellierung verteilter eventbasierter Internet of Things services (Zhang und Chen 2021)

Die Koordination von physischen Systemen in Internet of Things Szenarien (IoT) ist oft komplex und starr ist. Zhang und Chen 2021 untersuchen, wie verteilte IoT-Dienste flexibel konstruiert werden können, um die Koordinationsanforderungen zu erfüllen. Es wird ein deklarativer Ansatz verfolgt, um ein ereignisgesteuertes IoT-Dienstsyste zu konstruieren. Dabei werden physische Geräte und Systeme explizit als Grundlage einer Servicearchitektur modelliert. Das Serviceverhalten wird flexibel auf der Grundlage verteilter Ereignisse deklariert und schrittweise verfeinert, um gleichzeitig starre Serviceeigenschaften zu ermöglichen und Laufzeitadaption zuzulassen. Die Modellierung erfolgt auf Basis der EPK-Methode.

Die vorgeschlagene UMS (Unified Message Space) Plattform unterstützt die flexible Erstellung von ereignisgesteuerten IoT-Diensten auf der Grundlage von IoT-Ressourcenmodellen. Die Plattform besteht aus einem verteilten Ressourcenpool, einer DEBS (Distributed Event-Based System) basierten Dienstumgebung und einer flexiblen Serviceprozessumgebung. Die DEBS-basierte Dienstumgebung verwendet verteilte Ereignisse, um Dienstschnittstellen zu beschreiben, Dienstinstanzen zu erstellen, Dienstinteraktionen zu leiten und sie mit hoher Nebenläufigkeit auszuführen. In der flexiblen Serviceprozessumgebung wird ein IoT-Geschäftsprozess in mehrere verteilte IoT-Dienste und Koordinationslogikteile aufgeteilt. Jeder Dienst hat eine Geschäftslogikebene, während jede Pub/Sub-Schnittstelle eine Ausführungseinheit ist. Die Koordinationslogik wird durch einen CEP-Dienst (Complex Event Processing) ausgeführt, der zusammengesetzte Ereignisse mit neuen Themenbezeichnungen veröffentlicht. Ein Online-Controller überprüft die Ausführung von Aktionen anhand von Modellinstanzen und regelt die Veröffentlichung von zusammengesetzten Ereignissen. Dies ermöglicht eine Laufzeitanpassung von IoT-Serviceprozessen. Ein Empfehlungssystem unterstützt Benutzer bei der Anordnung ihrer steuerbaren Prozessabschnitte. Die CEP-Dienste berechnen zusammengesetzte Ereignisse gemäß den Ereignisbeziehungen, während der Online-Controller die Veröffentlichung von zusammengesetzten Ereignissen gemäß den Instanzmodellen anpasst.

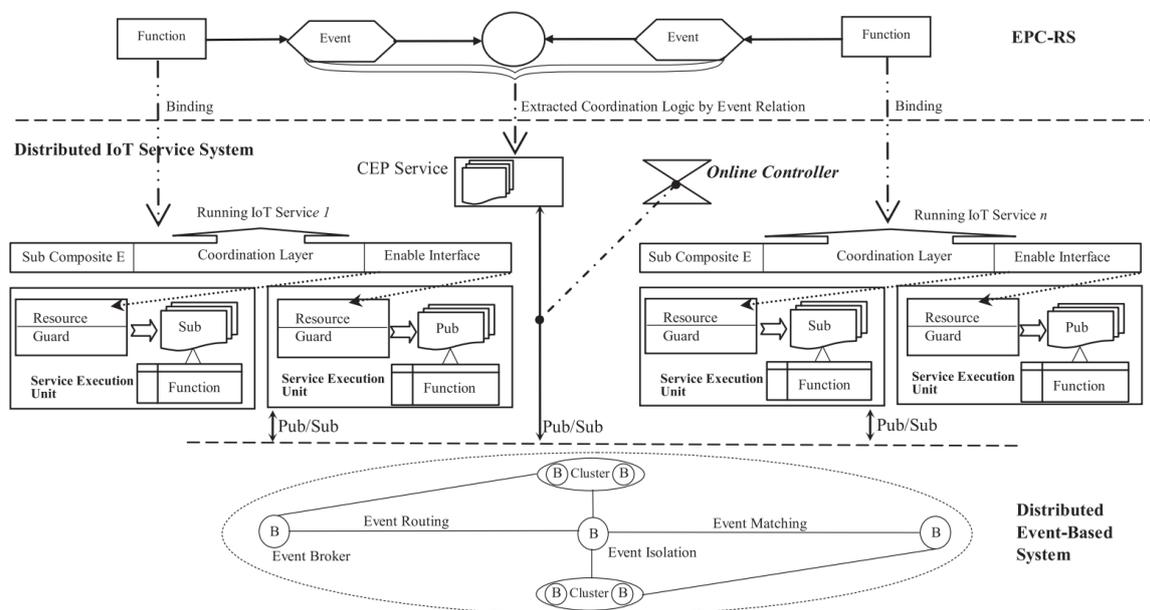


Abbildung 36: Ausführung und Verfeinerung von Dienstleistungen (Zhang und Chen 2021)

Modellierung und Verifikation komplexer Geschäftsanforderungen mit UMLPLACE (Amjad et al. 2018b)

Amjad et al. 2018b befassen sich mit der Modellierung von Geschäftsprozessen (BPs) zur Darstellung von prozessbezogenen Geschäftsanforderungen (BRs). Bestehende Werkzeuge zur Modellierung von EPKs können lediglich einfache Muster abbilden und vernachlässigen komplexe Muster. Zudem sind diese Werkzeuge meist proprietär und daher in ihrer Anwendung eingeschränkt. Amjad et al. 2018b streben eine Erweiterung der Ausdrucksfähigkeit von EPK durch die Entwicklung eines Profils namens UMLPACE (Unified Modeling Language Profile for Atomic and Complex events in EPC). UMLPACE basiert auf Konzepten des UML-Aktivitätsdiagramms und ermöglicht die Darstellung sowohl einfacher als auch komplexer Muster in EPK. Im Rahmen der Forschung wurde ein Open-Source-Transformationsmodul entwickelt, das UMLPACE-Modelle in Zielmodelle, wie z.B. endliche Automaten, transformiert, um komplexe Geschäftsprozesse zu verifizieren. Die Implementierung des Transformationsmoduls erfolgte in der Programmiersprache JAVA und unter Verwendung des Acceleo-Tools für die Modell zu Text Transformation.

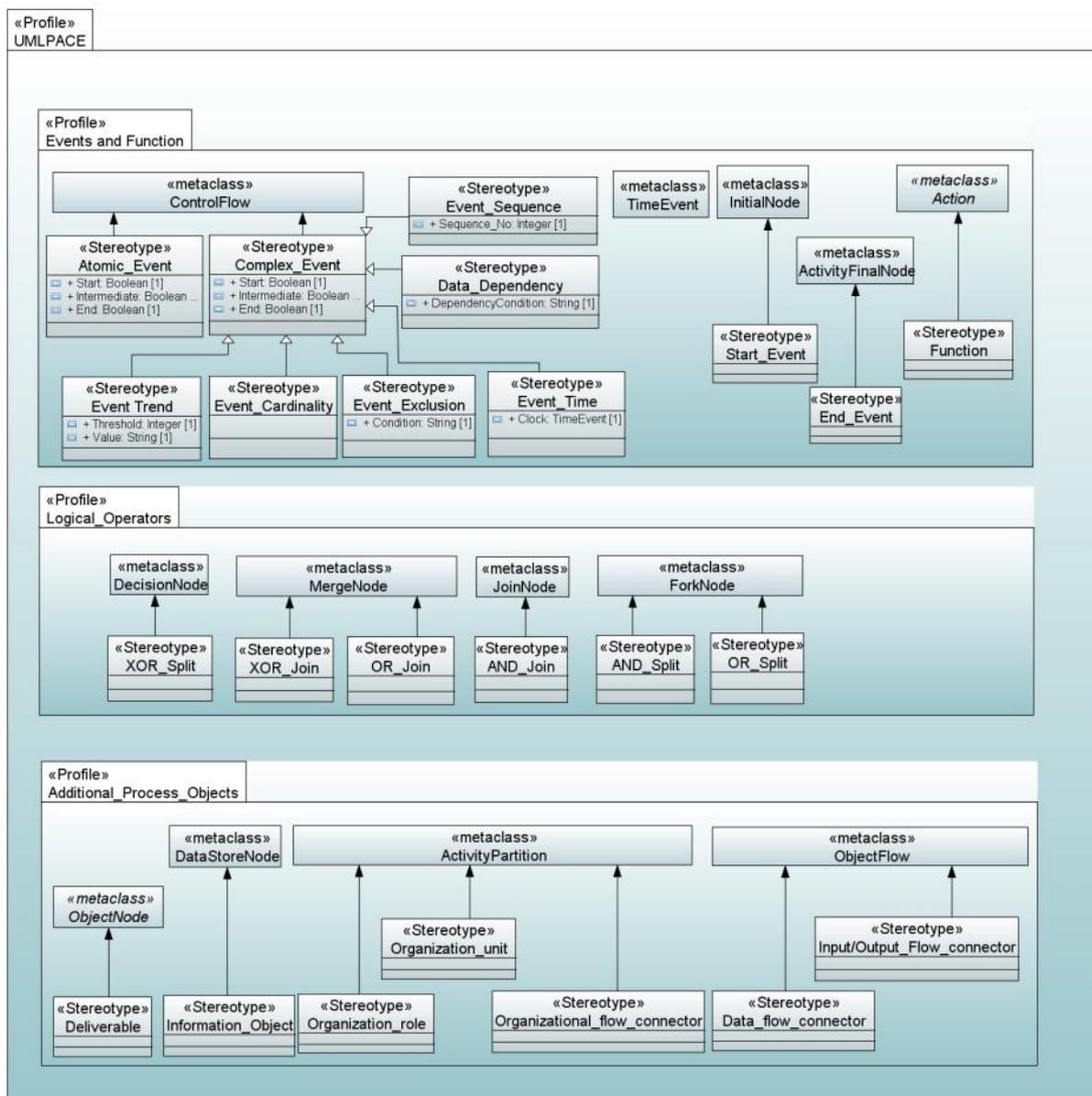


Abbildung 37: UML-Profil für atomare und komplexe EPKs (Amjad et al. 2018b)

Transformation von EPK-Modellen zu BPMN-Modellen (Khudori und Kurniawan 2019)

Aufgrund der Popularität von BPMN im Prozessmanagement wird es für Unternehmen attraktiv ihre bestehenden Prozessmodelle in BPMN umzuwandeln, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Die bestehenden Transformationsansätze konzentrieren sich auf die Definition von Regeln auf einer hohen Abstraktionsebene.

Khudori und Kurniawan 2019 erweitern bestehende Regeln zur Transformation von EPK-Modellen und entwickeln daraus ein Java basiertes Tool für die automatisierte Transformation von EPK-AML-Metadaten (Aris Markup Language) in BPMN-Metadaten. Dabei soll vorrangig der Verlust von Informationen während des Transformationsprozesses verhindert werden.

AML und BPMN-Metadaten haben unterschiedliche Strukturen und Formate. Die Prozesstransformation kann nur abgeschlossen werden, indem die Quellmetadaten extrahiert und dann gemäß den definierten Transformationsregeln in Zielmetadaten exportiert werden. Abbildung 38 veranschaulicht das Vorgehen von Khudori und Kurniawan 2019. Zur Erzeugung einer transformierten BPMN-XSD-Datei aus einem EPK-Modell in AML, werden drei prozedurale Schritte durchgeführt. Es werden wertvolle Informationen aus AML extrahiert, um den Transformationsprozess zu unterstützen. Danach werden Mapping-Regeln für die Transformation von EPC AML in BPMN-XSD festgelegt. Zuletzt wird ein Export in das BPMN-XSD-Datei Format durchgeführt.

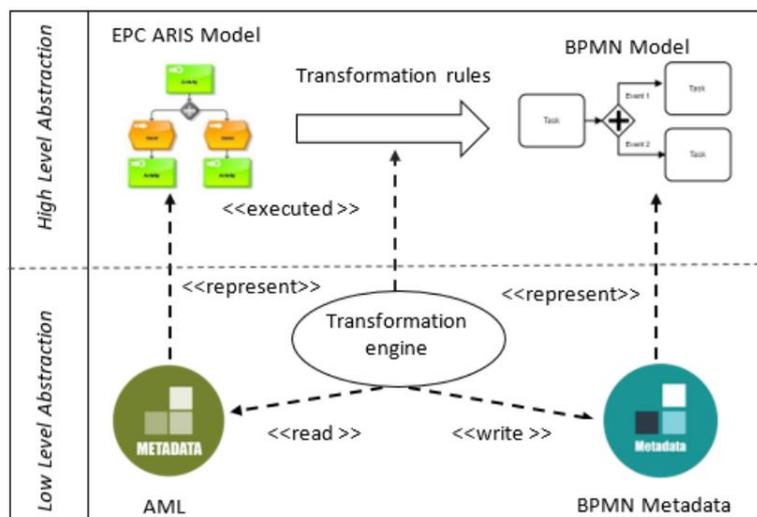


Abbildung 38: Vorgehen bei der Modeltransformation (Khudori und Kurniawan 2019)

Durch die Anwendung der definierten Regeln können Unternehmen ihre bestehenden EPK-Modelle effizient in das BPMN-Format überführen, um von den Vorteilen dieser Notation zu profitieren.

eEPCD für die Modellierung datengetriebener Prozesse (Xiaoshu et al. 2023)

Xiaoshu et al. 2023 postulieren ein digitales Zwillingmodell für das Management eines Bahnhofsbetriebs. Das vorgeschlagene Modell mit dem Namen "DTSDO" (Digital Twins Four-Dimensional Model for Daily Station Operations) besteht aus vier Komponenten: der physischen Entität des Personenbahnhofs (PSPE), der virtuellen Entität des Personenbahnhofs (PSVE), den digitalen Zwillingverbindungen (DTCS) und den täglichen Zwillingsbetriebsdiensten (DOTS). Das DTSDO-Modell basiert auf Fahrgast- und Zugdaten und verwendet das erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskettendiagramm (eEPCD), um die sechs Hauptproduktionsbereiche innerhalb des Bahnhofs auf der Grundlage einer zeitlichen Abfolge zu verbinden und zu steuern. Diese Erweiterung des EPK-Ansatzes berücksichtigt den datengetriebenen Charakter der Prozesse eine Digitalen Zwilling (Xiaoshu et al. 2023).

Das eEPCD-Modell basiert auf Ereignissen (E), Aktivitäten oder Aktionen (F) und Regelsets (R) wie AND, OR und XOR. Es wird angestrebt, die organisatorische Struktur (O), Ressourcen (S) und Echtzeitdaten (D) in den Prozess einzubeziehen (Xiaoshu et al. 2023).

Abbildung 39 zeigt eine grafische Darstellung des Prozessmodells. eEPCD ermöglicht die Hervorhebung der wichtigsten Verbindungen zwischen den Prozessen und gleichzeitig die datengesteuerte Ergänzung der Organisationsstruktur und der Ressourcenelemente. Dies ermöglicht eine zeitnahe und genaue Modellierung der Geschäftsprozesse im Bahnhofsbetrieb durch die Integration von Echtzeitdaten in den Prozess (Xiaoshu et al. 2023).

Durch die Integration von Echtzeitdaten und die Erweiterung des eEPK-Ansatzes bieten X. Wang et al. 2023 eine innovative Lösung für die Herausforderungen in der Bahnhofsverwaltung. Aufgrund der hohen Relevanz von Digitalen Zwillingen und datengetriebenen Technologien für die Domäne Produktion und Logistik wurde der methodische Ansatz in der Literatursauswahl berücksichtigt.

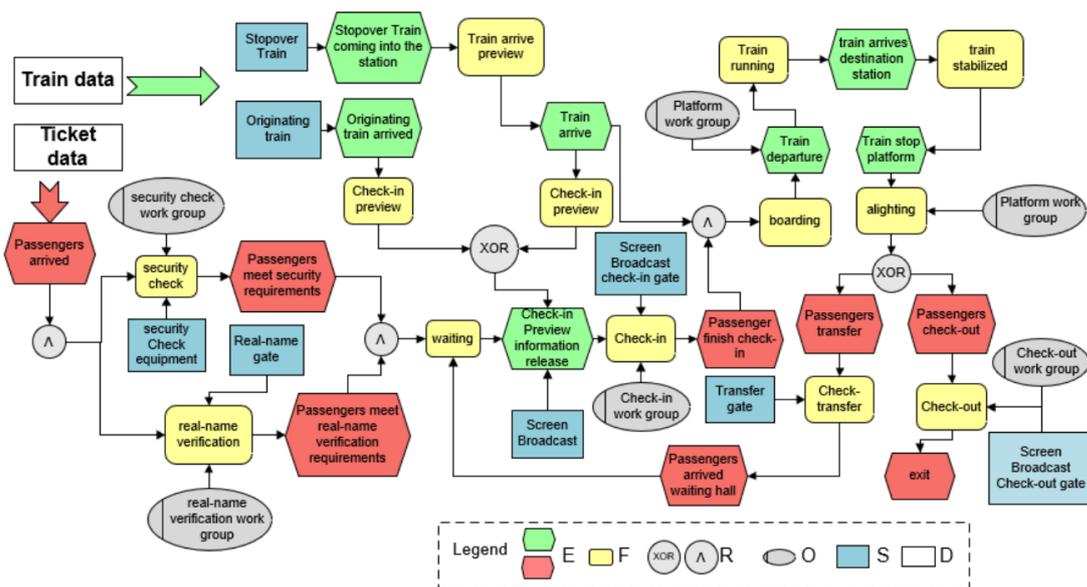


Abbildung 39: eEPCD eines Bahnhofsbetriebs (Xiaoshu et al. 2023)

Systematische Literaturanalyse zur Modellierung und Verifikation von 1998-2017 (Amjad et al. 2018a)

Die systematische Literaturanalyse (SLR) von (Amjad et al. 2018a) wurde trotz eines fehlenden Bezugs zur Domäne Produktion und Logistik in den zu analysierenden Literaturstapel aufgenommen. Grund dafür ist die hohe Relevanz der Quelle für das Forschungsfeld Ereignisgesteuerter Prozessketten. Das Vorgehen und relevante Informationen bezüglich der Literaturanalyse sind in Abbildung 40 zu sehen.

Es wurden 73 Quellen aus den Jahren 1998-2017 aus 5 Datenbanken ausgewählt und untersucht. (Amjad et al. 2018a) haben für ihre Suche 6 Kategorien zu Einordnung und zielgerichteten Wissensgenerierung definiert, nämlich Modellierung, Transformation, Verifikation, Allgemeines, Semantik und Anforderungen

Amjad et al. 2018a kommen zu dem Ergebnis, dass EPK geeignete Ansätze und Werkzeugunterstützung für die Modellierung und Verifikation einfacher Geschäftsanforderungen durch atomare Ereignisse bietet. 25 verschiedene Software-Werkzeuge zur Unterstützung der Modellierung und Verifikation von EPKs wurden identifiziert und miteinander verglichen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Petri-Netze das am häufigsten verwendete Modell für die Verifikation von EPK-Modellen sind.

Aufgrund der bisher sehr begrenzten Unterstützung für die Modellierung und Verifikation komplexer Ereignisverarbeitung kann EPK jedoch nicht für komplexe Geschäftsanforderungen eingesetzt werden. Es besteht daher ein dringender Bedarf, Unterstützung für die Modellierung und Verifikation komplexer Ereignisse in EPK zu integrieren, um komplexe Geschäftsanforderungen bewältigen zu können. Auch wenn Amjad et al. 2018a eine steigende Popularität von BPMN feststellen, argumentieren sie, dass EPK weiterhin relevant ist und beispielsweise aufgrund seiner Benutzerfreundlichkeit und Klarheit je nach Anwendungsfall BPMN überlegen sein kann.

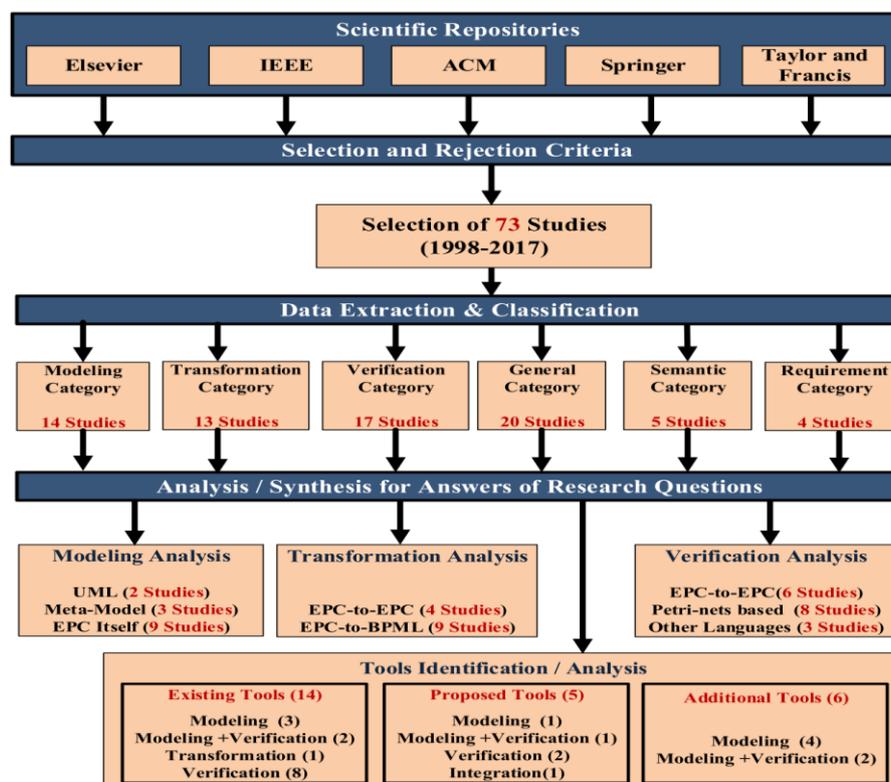


Abbildung 40: Überblick über die Systematische Literaturanalyse (Amjad et al. 2018a)

5 Ergebnistabellen

Im Folgenden werden die Ergebnismatrizen der einzelnen Themenbereiche vorgestellt. Die Quellen sind zunächst nach Kategorien und dann alphabetisch aufsteigend sortiert. Eine Beschreibung der Kategorien, nach denen die Literatur klassifiziert wurde, findet sich in Abschnitt 3.5 (Literaturanalyse und Synthese).

Für jede Quelle werden neben der Referenz und dem Titel auch die Art der Quelle, die zugehörige Konferenz oder Zeitschrift sowie die Anzahl der Zitate angegeben. In der letzten Spalte werden die wichtigsten Erkenntnisse bzw. Ergebnisse jeder Quelle kurz zusammengefasst.

Ergebnistabelle Process Mining

Kategorie	Referenz	Titel	Quellenart	Konferenz/ Journal	Zitationen	Wichtigste Erkenntnisse / Ergebnisse
Integration	(Friederich und Lazarova-Molnar 2023)	Data-Driven Reliability Modeling of Smart Manufacturing Systems Using Process Mining	Conference paper	Proceedings of the 2022 Winter Simulation Conference	5	Process Mining ist ein Baustein für eine innovative Lösung um die Herausforderungen in SMS anzugehen. Hierbei wird Process Mining zur Extraktion und Analyse von Daten verwendet.
Integration	(Roldán 2019)	A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining	Journalbeitrag	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing	142	Erstellung eines Prozessmodells mittels Process Mining, zur verbesserten Wissensweitergabe in Produktionsunternehmen.
Integration	(Schuh et al. 2020)	A Data Model to Apply Process Mining in End-to-End Order Processing Processes of Manufacturing Companies	Conference paper	2020 IEEE International Conference	5	Process Mining kann zur Steigerung der Effizienz und Effektivität in der Prozessgestaltung von ETEOPP genutzt werden.
Integration	(Siek und Malik Gunadhama Mukti 2020)	Process Mining with Applications to Automotive Industry	Conference paper	International Conference on Advanced Materials and Technology 2020	9	Erkenntnisgewinnung mittels Process Mining in der Automobilindustrie. 2 mögliche Ansätze: Inductive Miner und Fuzzy Miner. Zudem eine Konformitätsprüfung der Modelle.
Integration	(Tan et al. 2023)	Automatic Model Generation and Data Assimilation Framework for Cyber-Physical Production Systems	Conference paper	SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation	0	Mit Hilfe von Process Mining ist es möglich ein Framework zu entwickeln welches über den gesamten Lebenszyklus des Produktionssystem ein kohärentes Simulationsmodell erstellt.
Erweiterung	(Rudnitckaia et al. 2020)	Screening Process Mining and Value Stream Techniques on Industrial Manufacturing Processes: Process Modelling and Bottleneck Analysis	Journalbeitrag	IEEE Acces 2020	2	Vereinigung von Process Mining und Value Stream Techniques zur Verbesserung von Prozessmodellern und Endpasserkennungen. Nutzen der TimeLag und Confidence Intervall Methode.
Erweiterung	(Saraeian und Shirazi 2020)	Process mining-based anomaly detection of additive manufacturing process activities using a game theory modeling approach	Journalbeitrag	Computers & Industrial Engineering 2020	13	Nutzung von Process Mining in Verbindung mit Spieltheorie um Anomalien durch potenzielle Angriffe auf Produktionsstandorte zu erkennen.

Tabelle 5: Ergebnistabelle Process Mining (Heering)

Ergebnistabelle Petri-Netze

Kategorie	Referenz	Titel	Quellenart	Konferenz/ Journal	Zitationen	Wichtigste Erkenntnisse / Ergebnisse
Integration	(Hanwen et al. 2020)	A study of the layout planning of plant facility based on the timed Petri net and systematic layout planning	Journalbeitrag	Public Library of Science ONE	5	Effizienzsteigerung von Produktionsanlagen durch die Kombination von zeitbehafteten Petri-Netzen und systematischer Layoutplanung.
Integration	(Tavares und Silva 2023)	Towards an agile distributed management system based on Petri Nets	Conference Paper	CEUR Workshop Proceedings	0	Präsentation eines Managementsystems für Fertigungs- und Logistikprozesse auf Basis von Petri-Netzen und RFID-Technologie.
Integration	(Zhang und Li 2022)	Logistics Distribution Process Design Based on Stochastic Petri Nets and Big Data Algorithms	Conference Paper	2022 IEEE 2nd International Conference on Computer Systems	0	Optimierung von Logistikdistributionsprozessen durch die Integration von stochastischen Petri-Netzen und Big-Data-Algorithmen.
IT-Lösungen	(Simon 2018)	Web-based simulation of production schedules with high-level petri nets	Conference Paper	32nd Annual Conference of the European Conference on Modelling and Simulation	2	Entwicklung eines webbasierten Simulationswerkzeugs für die Modellierung von Produktionsprozessen.
IT-Lösungen	(Wenzelburger und Algöwer 2019)	A Petri Net Modeling Framework for the Control of Flexible Manufacturing Systems	Conference paper	9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling	8	Vorstellung eines automatisierten Modellgenerierungsschemas auf Basis von Petri-Netzen.
Erweiterung	(Vazquez und Aguayo-Lara 2023)	Immediate Transitions in Timed Continuous Petri Nets: Performance Evaluation and Control	Journalbeitrag	IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics	1	Entwicklung eines neuen Modells durch die Erweiterung von zeitkontinuierlichen Petri-Netzen um sofortige Transitionen.

Tabelle 6: Ergebnistabelle Petri-Netze (Baiz)

Ergebnistabelle Ereignisgesteuerte Prozessketten

Kategorie	Referenz	Titel	Quellenart	Konferenz/ Journal	Zitationen	Wichtigste Erkenntnisse / Ergebnisse
Integration	(Ashiwal et al. 2022)	Implementing a PLC-Service bus with IEC 61499	Conference paper	5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems	7	Anwendung der EPK-Methodik zur Modellierung von Interaktionen zwischen Software in einem SPS Service Bus.
Integration	(Mahmood et al. 2018b)	A Performance Evaluation Concept for Production Systems in an SME Network	Conference paper	51st Conference on Manufacturing Systems	54	Integration von EPK-Modellierung in einen methodischen Ansatz zur Leistungsüberwachung von Produktionsnetzwerken aus kleinen und mittelständische Unternehmen.
Integration	(Zhang und Chen 2021)	Declarative Construction of Distributed Event-Driven IoT Services Based on IoT Resource Models	Journalbeitrag	Transactions on Services Computing 2017	7	Integration von EPK-Modellierung in einen methodischen Ansatz zum Aufbau Ereignisgesteuerter IoT-Service-Systeme.
IT-Lösungen	(Amjad et al. 2018)	UMLPACE for Modeling and Verification of Complex Business Requirements in Event-Driven Process Chain (EPC)	Journalbeitrag	IEEE Access 2018	13	Entwicklung der UMLPACE Modellierungssnwendung zur Modellierung und Verifikation komplexer Geschäftsprozesse.
IT-Lösungen	(Khudori und Kurniawan 2019)	Transforming EPC Aris Markup Language Into BPMN Metadata	Conference paper	2019 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology	1	Entwicklung eines Javabasierten Softwaretools für eine automatisierte, verlustfreie Transformation von EPK-Modellen zu BPMN Modellen.
Erweiterung und Integration	(Xiaoshu et al. 2023)	Digital Twins for Daily Operation Management of Railway Station	Conference paper	3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence	0	Erweiterung des EPK Ansatzes durch die Berücksichtigung datengetriebener Echtzeit-Prozesse im Kontext Digitaler Zwillinge.
Review	(Amjad et al. 2018a)	Event-Driven Process Chain for Modeling and Verification of Business Requirements—A Systematic Literature Review	Journalbeitrag	IEEE Access 2018	77	Umfassende Erkenntnisse zu den Bereichen Modellierung, Transformation, Verifikation und Tools auf Grundlage der Literatur zu EPK von 1998-2017.

Tabelle 7: Ergebnistabelle Ereignisgesteuerte Prozessketten (Range)

6 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Projektarbeit haben wir eine umfassende strukturierte Literaturanalyse (SLR) zum Thema Process Mining, EPK und Petri Netze durchgeführt, um die aktuellen methodischen Ansätze und deren Anwendungen in der Produktion und Logistik zu erforschen und in einer Matrix (Tabelle) darzustellen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Process Mining ein vielseitiges Werkzeug ist, das weit über die traditionelle Prozessanalyse hinausgeht. Es ermöglicht die Entdeckung neuer Prozesse, die Überprüfung der Prozesskonformität und die Erkennung von Anomalien in der Sicherheit von Fertigungsprozessen. Besonders hervorzuheben ist die Fähigkeit von Process Mining, Daten aus verschiedenen Quellen zu integrieren und so einen tieferen Einblick in die Prozesse zu gewähren. Die Analyse hat auch gezeigt, dass Process Mining in verschiedenen Bereichen der Produktion und Logistik angewendet wird, um Effizienzsteigerungen, Kostensenkungen und verbesserte Sicherheitsmaßnahmen zu erzielen.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Matrix bietet eine klare und strukturierte Übersicht über die verschiedenen methodischen Ansätze und deren spezifische Anwendungsfelder.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Process Mining ein mächtiges Instrument ist, das signifikante Verbesserungen in der Produktion und Logistik ermöglichen kann. Die in dieser Projektarbeit durchgeführte Literaturanalyse hat gezeigt, dass es eine breite Palette an methodischen Ansätzen und Anwendungsbereichen gibt, was die Relevanz und das Potenzial von Process Mining unterstreicht. Es wird erwartet, dass die Bedeutung von Process Mining in der Zukunft weiter zunehmen wird, da Unternehmen bestrebt sind, ihre Prozesseffizienz zu steigern und auf neue Sicherheitsanforderungen zu reagieren.

Die Kapitel 4 durchgeführte Literaturrecherche zu Petri-Netzen veranschaulicht deren zentrale Bedeutung und vielseitige Anwendbarkeit in der Modellierung komplexer Produktions- und Logistikprozesse. Die Analyse der recherchierten Literatur unterstreicht die Stärken von Petri-Netzen in der präzisen Darstellung von Prozessdynamiken und der Fähigkeit, sowohl sequentielle als auch parallele Abläufe zu modellieren. Diese Aspekte sind insbesondere in der Domäne Produktion und Logistik von hoher Relevanz, wo komplexe Abläufe und vielfältige Wechselwirkungen zwischen Prozessschritten eine Herausforderung darstellen.

Ein kritischer Blick auf die Literatur zeigt jedoch auch, dass die Implementierung und Anpassung von Petri-Netzen an spezifische Anforderungen und Kontexte eine fortlaufende Herausforderung darstellt. Insbesondere die Modellierung realer Systeme erfordert oft erweiterte Formen von Petri-Netzen, wie zeitbehaftete Petri-Netze, um eine adäquate Komplexität und Dynamik abbilden zu können. Diese Erweiterungen erhöhen zwar die Ausdruckskraft von Petri-Netzen, können jedoch gleichzeitig die Komplexität der Modelle und damit die Herausforderung ihrer Anwendung und Analyse verstärken.

Die Literaturrecherche hat zudem die Bedeutung einer engen Verknüpfung zwischen Theorie und Praxis in der Weiterentwicklung von Petri-Netzen hervorgehoben. Während theoretische Fortschritte in der Definition und Analyse von Petri-Netzen entscheidend sind, unterstreicht die praktische Anwendung die Notwendigkeit einer benutzerfreundlichen Gestaltung von Modellierungswerkzeugen sowie effizienter Algorithmen zur Analyse und Simulation von Petri-Netz-basierten Modellen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass Petri-Netze ein mächtiges Werkzeug zur Modellierung von Produktions- und Logistikprozessen darstellen, deren volles Potenzial jedoch erst durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung, insbesondere im Hinblick auf Benutzerfreundlichkeit und Anpassungsfähigkeit an praktische Anforderungen, ausgeschöpft werden kann. Die in dieser Projektarbeit durchgeführte Literaturrecherche legt somit wichtige Grundlagen für zukünftige Arbeiten in diesem Bereich und trägt dazu bei, die Lücke zwischen theoretischer Forschung und praktischer Anwendung von Petri-Netzen weiter zu schließen.

Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) sind trotz ihres Alters nach wie vor eine wichtige Methode zur Modellierung und Verifikation von Prozessen. Die Ergebnisse der durchgeführten systematischen Literaturrecherche (SLR) zeigen, dass EPK-Modelle in innovative Technologieansätze wie das Internet der Dinge (IoT) und digitale Zwillinge integriert werden können. Dabei werden Aspekte datengetriebener Prozesse und Netzwerkarchitekturen berücksichtigt und sogar Erweiterungen der eEPK-Notation vorgenommen.

Die Relevanz der EPK-Modellierung im Bereich Produktion und Logistik nimmt jedoch tendenziell ab. Trotz umfangreicher Suchbegriffe konnte nur begrenzt relevante Literatur gefunden werden. Dies ist vermutlich auf konkurrierende Modellierungssprachen wie BPMN zurückzuführen, die über einen höheren Detaillierungsgrad und Standards verfügen. Zudem ist die EPK-Modellierung nicht für komplexe, umfangreiche Prozesse geeignet.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden Ansätze entwickelt, um bestehende EPK-Prozessmodelle in andere Modellierungssprachen zu transformieren und diese zu validieren. Dadurch kann die Relevanz von EPK für die Zukunft erhalten werden. Die Benutzerfreundlichkeit und Übersichtlichkeit von EPK bleiben dabei wichtige Punkte, die für die Anwendung sprechen.

7 Literaturverzeichnis

Amjad, Anam; Azam, Farooque; Anwar, Muhammad Waseem; Butt, Wasi Haider; Rashid, Muhammad (2018): Event-Driven Process Chain for Modeling and Verification of Business Requirements—A Systematic Literature Review. In: *IEEE Access* 6, S. 9027–9048. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2791666.

Amjad, Anam; Azam, Farooque; Anwar, Muhammad Waseem; Butt, Wasi Haider; Rashid, Muhammad; Naeem, Aamir (2018): UMLPACE for Modeling and Verification of Complex Business Requirements in Event-Driven Process Chain (EPC). In: *IEEE Access* 6, S. 76198–76216. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883610.

Ashiwal, Virendra; Gutierrez, Antonio; Zoitl, Alois (2022): Implementing a PLC-Service bus with IEC 61499. In: *2022 IEEE 5th International ...*

Becker, Joerg; Mathas, Christoph; Winkelmann, Axel (2009): Geschäftsprozessmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Becker, Jörg (2012): Prozessmanagement. Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 7., korr. und erw. Aufl. Berlin: Springer Gabler.

Bowden F. D. J. (2000): A Brief Survey and Synthesis of the Roles of Time in Petri Nets. In: *Mathematical and Computer Modelling*.

Brell, Claus (2021): ARIS – was ist die Architektur integrierter Informationssysteme? In: *Claus Brell*, 23.09.2021. Online verfügbar unter <https://cbrell.de/blog/aris-was-ist-die-architektur-integrierter-informationssysteme/>, zuletzt geprüft am 28.03.2024.

Cooper, Harris M. (1988): Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews. In: *Knowledge in Society* 1 (1), S. 104–126. DOI: 10.1007/BF03177550.

Daniel, Florian; Barkaoui, Kamel; Dustdar, Schahram (Hg.) (2012): Business Process Management Workshops. BPM 2011 International Workshops, Clermont-Ferrand, France, August 29, 2011, Revised Selected Papers, Part I. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Business Information Processing, 99).

Elder Sultanow (2006): Einführung in stochastische Petrinetze.

Entringer, Tulio Cremonini; Da Ferreira, Ailton Silva; Nascimento, Denise Cristina de Oliveira (2021): Comparative analysis of the main business process modeling methods: a bibliometric study. In: *Gest. Prod.* 28 (2), Artikel e5211, e5211. DOI: 10.1590/1806-9649-2020v28e5211.

Freund, Jakob; Rücker, Bernd (2019): Real-life BPMN. Using BPMN and DMN to analyze, improve, and automate processes in your company. 4th edition. [Berlin]: Camunda.

Friederich, Jonas; Lazarova-Molnar, Sanja (2023): Data-Driven Reliability Modeling of Smart Manufacturing Systems Using Process Mining. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference: IEEE Press (WSC '22)*, S. 2534–2545.

Gadatsch, Andreas (2023): Modellierung und Analyse von Prozessen. In: *Grundkurs Geschäftsprozess-Management: Analyse ...* DOI: 10.1007/978-3-658-40298-3_5.

Gromeleit Nicky; Fiege Michael (1999): Petri-Netze und ihr Einsatz als Simulationsmittel in der Fertigungssteuerung.

Jane Webster; Richard T. Watson (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* 26 (2), S. xiii–xxiii. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/4132319>, zuletzt geprüft am 23.10.2023.

Jensen Kurt (1989): Coloured Petri Nets: A High Level Language for System Design and Analysis. In: *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*.

- Keller, Gerhard; Nüttgens, Markus; Scheer, August-Wilhelm (1992): Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage" Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPK): Iwi.
- Khudori; Kurniawan (2019): Transforming EPC Aris Markup Language Into BPMN Metadata. In: 2019 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET). 2019 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET), S. 358–363.
- Khudori, Ahsanun Naseh; Kurniawan, Tri Astoto; Ramdani, Fatwa (2020): Quality Evaluation of EPC to BPMN Business Process Model Transformation. In: *JITeCS* 5 (2), S. 207–220. DOI: 10.25126/jitecs.202052176.
- Liebetruth, Thomas (2005): Die Informationsbasis des Supply Chain Controllings. Forschungsstand, empirische Analyse, Gestaltungsempfehlungen. Köln: Kölner Wissenschaftsverl.
- Liebetruth, Thomas (2020): Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Instrumente und Methoden Für das Supply Chain Process Management. 2nd ed. Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Liu, Hanwen; Liu, Xiaobing; Lin, Lin; Islam, Sardar M. N.; Xu, Yuqing (2020): A study of the layout planning of plant facility based on the timed Petri net and systematic layout planning. In: *PloS one* 15 (9), e0239685. DOI: 10.1371/journal.pone.0239685.
- Long, Fei: Realitätsnahe Modellierung und Analyse der Verfügbarkeit von Produktionssystemen in Industrie 4.0. Dissertation. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-ds-132850>.
- Mahmood; Lanz; Toivonen; Otto (2018): A performance evaluation concept for production systems in an SME network. In: *Procedia CIRP*. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711830341X>.
- Murata, T. (1989): Petri nets: Properties, analysis and applications. In: *Proc. IEEE* 77 (4), S. 541–580. DOI: 10.1109/5.24143.
- Nolle, Lars; Burger, Alexandra; Tholen, Christoph; Werner, Jens; Wellhausen, Jens (Hg.) (2018): Proceedings, 32nd European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2018. May 22nd-May 25th, 2018, Wilhelmshaven, Germany. European Council for Modelling and Simulation; Jade Hochschule. Europe: European Council for Modelling and Simulation. Online verfügbar unter <http://www.scs-europe.net/conf/ecms2018/ecms2018proceedings.pdf>.
- Peters (2019): Process-Mining: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Petri Carl Adam (1962): Dissertation.
- Reisig, Wolfgang (2010): Das Syntheseproblem. In: Wolfgang Reisig (Hg.): Petrinetze. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 81–90.
- Reisig, Wolfgang (Hg.) (2010): Petrinetze. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Riehle, Dennis M.; Jannaber, Sven; Karhof, Arne; Thomas, Oliver; Delfmann, Patrick; Becker, Jörg (2016): On the de-facto standard of event-driven process chains: how EPC is defined in literature: Gesellschaft für Informatik e.V. Online verfügbar unter <https://dl.gi.de/items/d3152c66-38d1-4161-ae00-2f0080b8433a>.
- Roldán, Juan Jesús (2019): A training system for Industry 4.0 operators in complex assemblies based on virtual reality and process mining.
- Rudnickaia, Julia; Venkatachalam, Hari Santhosh; Essmann, Roland; Hruška, Tomáš; Colombo, Armando Walter; Schuh, G. et al. (2020): Screening Process Mining and Value Stream Techniques on Industrial Manufacturing Processes: Process Modelling and Bottleneck Analysis. In: *IEEE Access* 10, S. 24203–24214. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3152211.

- Saraeian, S.; Shirazi, B. (2020): Process mining-based anomaly detection of additive manufacturing process activities using a game theory modeling approach. In: *Computers and Industrial Engineering* 146. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106584.
- Scheer, A.-W. (1991): Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) — Neue Gestaltungsaufgaben im Controlling. In: August-Wilhelm Scheer (Hg.): *Rechnungswesen und EDV. 12. Saarbrücker Arbeitstagung 1991 : kritische Erfolgsfaktoren in Rechnungswesen und Controlling*. Heidelberg: Physica, S. 3–21. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-48210-6_1.
- Scheer, August-Wilhelm (2013): *ARIS — Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem*: Springer-Verlag.
- Schuh, G.; Gützlaff, A.; Cremer, S.; Schmitz, S.; Ayati, A. (2020): A Data Model to Apply Process Mining in End-to-End Order Processing Processes of Manufacturing Companies. In: 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), S. 151–155.
- Seidlmeier, Heinrich (2019): Prozessoptimierung mit dem ARIS Architect. In: Heinrich Seidlmeier (Hg.): *Prozessmodellierung mit ARIS®. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis in ARIS 10. Fifth edition*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 17–97. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-25957-0_3.
- Siek, M.; Malik Gunadharma Mukti, R. (2020): Process mining with applications to automotive industry. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 924 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/924/1/012033.
- Simon Carlo; Haag Stefan; Zakfeld Lara (2021): Simulation of Push- and Pull-Processes in Logistics.
- Tan, Wen Jun; Seok, Moon Gi; Cai, Wentong (2023): Automatic Model Generation and Data Assimilation Framework for Cyber-Physical Production Systems. In: *Proceedings of the 2023 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery (SIGSIM-PADS '23), S. 73–83.
- Tavares, Jose; Silvia, Jose (2023): Towards an agile distributed management system based on Petri Nets. In: *CEUR Workshop Proceedings* (3424).
- van der Aalst, Wil (2012): Process Mining: Overview and Opportunities. In: *ACM Transactions on Management Information Systems* 3 (2), Artikel 7, S. 1–17. Online verfügbar unter <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2229156.2229157#d3367395e1>.
- Vazquez, Carlos Renato; Aguayo-Lara, Enrique (2023): Immediate Transitions in Timed Continuous Petri Nets: Performance Evaluation and Control. In: *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Syst.* 53 (6), S. 3750–3761. DOI: 10.1109/TSMC.2022.3232743.
- vom Brocke, Jan; Simons, Alexander; Niehaves, Bkoern; Riemer, Kai (2009): Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process. Online verfügbar unter <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1145&context=ecis2009>.
- Wang Jiacun (1998): *Timed Petri Nets: Theory and Application*: Springer.
- Wenzelburger, Philipp; Allgöwer, Frank (2019): A Petri Net Modeling Framework for the Control of Flexible Manufacturing Systems. In: *9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019* (52).
- Xiaoshu, Wang; Tianyun, Shi; Xiaojun, Lv; Chao, Li; Guoyuan, Yang; Depeng, Dong (2023): Digital Twins for Daily Operation Management of Railway Station. In: 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), S. 1–6.
- Zhang, Long; Li, Jiashun (2022): Logistics Distribution Process Design Based on Stochastic Petri Nets and Big Data Algorithms. In: 2022 IEEE 2nd International Conference on Computer

Systems (ICCS). 2022 IEEE 2nd International Conference on Computer Systems (ICCS). Qingdao, China, 23.09.2022 - 25.09.2022: IEEE, S. 55–59.

Zhang, Yang; Chen, Jun-liang (2021): Declarative Construction of Distributed Event-Driven IoT Services Based on IoT Resource Models. In: *IEEE Transactions on Services Computing* 14 (1), S. 125–140. DOI: 10.1109/TSC.2017.2782794.

Zurawski, R.; Zhou, MengChu (1994): Petri nets and industrial applications: A tutorial. In: *IEEE Trans. Ind. Electron.* 41 (6), S. 567–583. DOI: 10.1109/41.334574.

8 Anhang: Zuordnung von Schreibanteilen

Kapitel/Abschnitt	Autor/en
1 Einleitung	Heering und Baiz
2.1 Prozessmodellierung	Heering
2.2 Domäne Produktion und Logistik	Baiz
2.3 Process Mining	Heering
2.4 Petri-Netze	Baiz
2.5 Ereignisgesteuerte Prozessketten	Ramge
3 Strukturierte Literaturanalyse	Ramge
4 4 Ergebnisse der Literaturrecherche	Heering, Baiz und Ramge
5 Ergebnistabellen	Heering, Baiz und Ramge
6 Zusammenfassung und Ausblick	Heering, Baiz und Ramge

Tabelle 8: Zuordnung von Schreibanteilen