



Universität Ulm | 89069 Ulm | Germany



**Fakultät für
Ingenieurwissenschaften
und Informatik**
Institut für Datenbanken
und Informationssysteme

Systematische Analyse des aktuellen Forschungsstandes von Prozessmodellen im Kontext der Industrie 4.0

Masterarbeit an der Universität Ulm

Vorgelegt von:

Erik Waschkus

erik.waschkus@uni-ulm.de

Gutachter:

Manfred Reichert

Rüdiger Pryss

Betreuer:

Tim Mohring

2018

Fassung 22. Oktober 2018

© 2018 Erik Waschkus

Kurzfassung

Die Schlagwörter *Smart Factory*, *Cloud-Computing* sowie *Internet-of-Things* sind in den vergangenen Jahren in den Fokus von Wirtschaft und Politik gerückt. Sie stehen für einen vermeintlichen Paradigmenwandel, der sogenannten vierten industriellen Revolution, die im deutschsprachigen Raum unter dem Konzept der „Industrie 4.0“ bekannt ist.

Die vorliegende Masterarbeit gibt einen umfassenden Überblick über die aktuellen Verständnisse von Prozessmodellen und deren mögliche Anwendungen im Zusammenhang mit den Themen dieser vierten industriellen Revolution. Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe einer systematischen Analyse der aktuellen Fachliteratur verschiedene Prozessmodellierungsansätze im Kontext der Industrie 4.0 zu identifizieren und zu präsentieren. In diesem Zusammenhang wird eine Untersuchung über den zeitlichen Verlauf von Publikationen, über die unterschiedlichen Themenschwerpunkte der wissenschaftlichen Untersuchungen und der Relevanz für die jeweiligen Forschungsgebiete durchgeführt.

Vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 sollen die Untersuchungsergebnisse momentane Anwendungsgebiete der Prozessmodellierung in Unternehmen und Forschungsbemühungen der Wissenschaft aufzeigen, sowie weitere potenzielle Applikationen und offene Fragen untersuchen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

In erster Linie möchte ich mich bei Tim Mohring für seine gute Betreuungsarbeit bedanken. Aufgrund seiner fachlichen Hilfestellungen und Tipps war ich in der Lage, die Arbeit in dieser Art und Weise zu erstellen.

Mein Dank gilt auch meinen Freunden und Mitbewohnern, die mir während der Erstellung der Masterarbeit mental zur Seite standen. Insbesondere danke ich Iris Kaifel für ihre Anregungen und die langen Tage in der Bibliothek.

Zusätzlich danke ich meinen fleißigen Korrekturlesern für ihre unersetzliche Hilfe bei der Suche nach Fehlern.

Für die Unterstützung während der Erstellung dieser Masterarbeit und im Verlauf meines gesamten Studiums möchte ich im Besonderen meinen Eltern und meiner Schwester danken. Mit ihrem uneingeschränkten Rückhalt und ihrer Fürsorge haben sie diese Arbeit und den erfolgreichen Abschluss meines Studiums ermöglicht.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
1. Einleitung	1
1.1 Motivation.....	2
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2. Grundlagen	5
2.1 Prozessmodelle.....	5
2.1.1 Begriffsbestimmungen	5
2.1.2 Geschäftsprozesse und das ARIS-Haus	7
2.1.3 Methoden der Prozessmodellierung.....	10
2.2 Industrie 4.0	13
2.2.1 Entstehung und Begriffsbestimmung.....	13
2.2.2 Basiselemente der Industrie 4.0.....	16
2.2.3 Momentaner Anwendungsstand in Deutschland	19
3. Methodik der Untersuchung	25
3.1 Aufbau der Analyse und Forschungsfragen.....	25
3.2 Auswahl der Aufnahme- und Ausschlusskriterien	26
3.3 Eingrenzung der Thematik und verwendete Suchanfragen	27
4. Aktueller Forschungsstand von Prozessmodellen im Kontext von Industrie 4.0	33
4.1 Analyse des zeitlichen Verlaufs und der beteiligten Forschungsländer.....	34
4.2 Analyse der Forschungsgebiete und Industriebranchen	36
4.3 Analyse der I4.0-Themengebiete.....	39
4.4 Analyse der verwendeten Modellierungssprachen.....	45
5. Zusammenfassung und Ausblick	55
Literaturverzeichnis	57
Anhang	66

Abkürzungsverzeichnis

acatech	-	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ARIS	-	Architektur integrierter Informationssysteme
BMI	-	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BPM	-	<i>Business Process Management</i> , Geschäftsprozessmanagement
BPMN	-	<i>Business Process Model and Notation</i>
CPS	-	Cyber-physische Systeme
CPPS	-	Cyber-physische Produktionssysteme
DV-Konzept	-	Datenverarbeitungskonzept
EPK	-	Ereignisgesteuerte Prozessketten
IoT	-	<i>Internet-of-Things</i> , Internet der Dinge
IoS	-	<i>Internet-of-Services</i> , Internet der Dienste
IT	-	Informationstechnik
I4.0	-	Industrie 4.0
I4PML	-	<i>Industry 4.0 Process Modeling Language</i>
OMEGA	-	Objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse
RFID	-	<i>Radio-frequency Identification</i>
SysML	-	<i>System Modeling Language</i>
SPUs	-	<i>Event Stream Processing Units</i>
UML	-	<i>Unified Modeling Language</i>
VDSML	-	<i>Visual Domain Specific Modeling Language</i>

1. Einleitung

In der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts zog die Informationstechnologie in die Unternehmen ein. Erste computergestützte Automatisierungen, unterstützende Softwarelösungen und der flächenmäßige Einsatz von Computern in den Büros führten zu einem revolutionären Wandel in der Produktion und Organisation wirtschaftlicher Unternehmen. Vor dem Hintergrund des technischen Fortschritts der letzten 20 bis 30 Jahre müssen sich die Unternehmen anpassen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu sichern oder sich neue Geschäftsfelder zu erschließen. Der Begriff der „Industrie 4.0“ wurde erstmals 2011 auf der Hannover Messe von einem Expertenteam vorgestellt und beschreibt eine Vielzahl an Konzepten, um die deutsche Wirtschaft auf den Wandel vorzubereiten beziehungsweise ihn einzuleiten [1]. Durch die internationale Bühne der Messe verstärkt, nahm die mediale Präsenz digitaler Themen zu und somit auch die Relevanz der Forschung nach theoretischen und praktischen Implementierungsansätzen der neuen Möglichkeiten.

Beispiele aus Politik und Wirtschaft:

„New developments such as the cloud, the Internet of Things and big data can thrive in Europe and that citizens, innovative web entrepreneurs and other businesses can take full advantage of their potential.“ – Jean-Claude Juncker, Präsident der EU-Kommission¹

„Das Kernelement der Wirtschaft von morgen ist die ‚Intelligente Vernetzung‘: Wenn Mensch zu Maschine oder Maschine zu Maschine kommuniziert, entstehen neue Wertschöpfungspotenziale. Maschinenbauer werden so zu den Goldgräbern der Zukunft.“

-Dr. Reinhold Festge, Präsident des Verbandes deutscher Maschinenbauer²

In der heutigen Zeit sind die Überlegungen der Firmen, inwiefern die Digitalisierung von Unternehmensvorgängen und der Umgang mit den gewonnenen Daten die Kosten senken und die Effizienz steigern können, allgegenwärtig. Unter dem Zusatz der Teilworte „intelligent“, „vernetzt“ oder „smart“ werden Konzepte und Zukunftsprojekte zur Realisierung der Verbesserungspotenziale der Industrie 4.0 in Forschung und Wirtschaft diskutiert und entwickelt [2].

Diese Situation erfordert von den Unternehmen ein generelles Umdenken in ihren Geschäftsprozessen, um die Hürden der Implementierung erfolgreich zu meistern. Die Forschung auf dem Gebiet der Geschäftsprozessmodellierung verspricht möglicherweise die richtigen Werkzeuge dafür. Die Darstellung von Unternehmensvorgängen durch standardisierte Modellierungssprachen bietet die benötigte Vielseitigkeit bei dem Vorhaben, alte Prozesse durch technologische Neuerungen zu unterstützen, zu reorganisieren oder optimiert zu implementieren. Der aktuelle Forschungsstand auf diesen Themenbereichen ist der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit.

¹ Auszug des *Mission Letter* an den *Commissioner for the Digital Economy and Society* der EU (2017)

² Auszug von der Webseite „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie“: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Downloads/vernetzt-und-effizient.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zugriff am 23. 08. 2018)

1.1 Motivation

Der durch die vierte industrielle Revolution eingeleitete Wandel wird die gesamte Wirtschaftswelt umfassen und Organisationen sowie Unternehmen zwingen, sich mit neuen Perspektiven und Herausforderungen zu beschäftigen. Der globale Absatz- und Produktionsmarkt ist ein stark umkämpfter Markt, auf dem sich Unternehmen mit einzigartigen Geschäftsmodellen oder optimierten Kosten- und Ressourcenplanungen Vorteile verschaffen müssen [3].

Ausgehend von der weltweiten globalen Vernetzung über Unternehmensgrenzen hinweg erreicht die Digitalisierung in der Produktion eine neue Qualität. Das Konzept, eine durchgängig abgebildete und steuerbare Wertschöpfungskette umzusetzen, ist ein komplexes Vorhaben: Je mehr Abläufe die Wirtschaft digitalisiert und verknüpft, desto mehr Schnittstellen entstehen zwischen verschiedenen Mitwirkenden. Kontinuierliche Verbesserungen und Weiterentwicklungen in der Informationstechnologie fordern zudem ein Umdenken von unternehmerischen Prozessen und deren Darstellung. Große Datenmengen und deren zeitnahe Erfassung und Verarbeitung ermöglichen es, einen umfassenden Einblick in die betrieblichen Abläufe zu gewinnen. Schlagwörter aus der aktuellen IT- und Wirtschaftspresse, wie Big Data oder Cloud-Computing, versprechen die Chance, Geschäftsmodelle und ihre Prozesse neu zu organisieren, zu optimieren und so Wettbewerbsvorteile zu generieren.³

Jedoch verlangt das Nutzen dieser Vorteile eine erfolgreiche Integration der neuen technischen Mittel in das Prozessmanagementsystem. Die Visualisierung und Dokumentation der Geschäftsprozesse fördert bei diesem Vorhaben das Verständnis der Unternehmensabläufe und erleichtert die Implementierung in die Anwendungen und IT-Systeme des Unternehmens. Ohne die Prozessmodellierung, unter Einbeziehung der großen Datenmengen, können die angesprochenen Potenziale des digitalen Fortschritts nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden.

Zusammenfassend versprechen die Ideen und Visionen der Industrie 4.0 vielseitige Möglichkeiten, um Geschäftsprozesse anhand echtzeitbasierter Daten zu gestalten sowie Schnittstellen und Abläufe im Unternehmen besser abzubilden und in Echtzeit anzupassen. Verbesserungsmöglichkeiten, deren Komplexität durch Prozessmodellierungskonzepte visualisiert und dokumentiert werden können, bilden einen Eckpfeiler zur erfolgreichen Realisierung. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit der momentane Stand der Forschung bei der Entwicklung und Anwendung von Prozessmodellierungskonzepten im Kontext der Herausforderungen der Industrie 4.0 untersucht.

³ Beispielsweise Beiträge und Themen in Zeitschriften wie [109]

1.2 Zielsetzung

Die Industrie 4.0, steht für einen Paradigmenwechsel in der Wirtschaft. Mit dieser technologischen Umwälzung ergeben sich neue Möglichkeiten und Chancen bestehende Abläufe zu überdenken und nezugestalten.

Dieser Wandel betrifft vor allem Unternehmensprozesse sowie deren Darstellung und Steuerung durch Prozessmodelle. Um eine umfassende Analyse des Forschungsstandes von Prozessmodellen im Kontext der vierten industriellen Revolution durchzuführen, ist es zunächst wichtig, das Volumen und den zeitlichen Verlauf an publizierten Beiträgen zu diesem Thema zu untersuchen. Dadurch können eine Aussage über den Stellenwert getroffen und die Veränderungen in der Relevanz der Prozessmodellforschung im Kontext der Industrie 4.0 belegt werden.

Vor diesem Hintergrund ist das vorrangige Ziel dieser Arbeit, eine umfassende Zusammenstellung über Prozessmodellierungskonzepte in Verbindung mit den Themenfeldern des technologischen Wandels zu erstellen. Für die Untersuchung sind die Betrachtungen hinsichtlich populärer Modellierungssprachen oder der Forschungsfelder mit dem größten Beitrag zur Forschung relevant. Die weiteren Ziele der Untersuchung sind es, sowohl aktuelle Modellkonzepte und -erweiterungen vorzustellen, als auch neue Sichtweisen und Lösungsvorschläge zu identifizieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

An dieser Stelle soll ein Überblick über den Aufbau und die logische Gliederung der Arbeit gegeben werden.

Die Motivation und der Aufbau der angestrebten Analyse werden in Kapitel 1 beschrieben. Zudem werden die Zielstellungen der Untersuchung, die in späteren Kapiteln als Forschungsfragen formuliert sind, identifiziert.

In Kapitel 2 werden zuerst die grundlegenden Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Prozessmodellierung eingeführt. Neben der Definition elementarer Grundbegriffe, wie *Prozess*, *Geschäftsprozess* oder *Modell*, werden konkrete Modellierungssprachen vorgestellt. Im Anschluss erfolgt eine Vorstellung der Industrie 4.0. Nach einer historischen Einordnung werden die Kernelemente sowie ihre Ausprägungen und Anwendungsgebiete erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse zweier Unternehmens- und Expertenbefragungen vorgestellt, welche Anwendungen und Motive im Zusammenhang mit der Thematik in der deutschen Industrie aufdecken.

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage wird in Kapitel 3 dargelegt. Um die Zielsetzung der Arbeit zu erreichen, wird die Analyse in mehrere Forschungsfragen zerlegt. Anschließend werden die separaten Suchanfragen an eine Literaturlatenbank konzipiert und Aufnahme und Ausschlusskriterien für die gefundenen Dokumente festgelegt.

In Kapitel 4 erfolgt die Analyse der relevanten Suchergebnisse hinsichtlich der einzelnen Forschungsfragen. Die Forschungen und Erkenntnisse der Publikationen werden aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, um somit eine vielseitige Beantwortung der Fragen in der Forschung zu ermöglichen.

Das Kapitel 5 der Arbeit dient der Diskussion der Ergebnisse der Analyse. Dieser Abschnitt führt die Ergebnisse der Untersuchung zusammen und erstellt ein Fazit über den aktuellen Forschungsstand der Prozessmodellierung im gegebenen Kontext. Dabei werden die gewonnenen Erkenntnisse über offene Fragestellungen und bestehende Grenzen vor dem Hintergrund der Herausforderungen der Industrie 4.0 dargelegt.

2. Grundlagen

Nachdem in Kapitel 1 die Motivation und die Zielsetzung dieser Arbeit vorgestellt wurde, führt das Kapitel 2 die Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit ein. Hierbei gibt der Abschnitt 2.1 einen Überblick über die Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Prozessmodellierung und beschreibt einige ausgewählte Modellierungssprachen. Der Abschnitt 2.2 gibt eine geschichtliche Einführung zum Thema der Industrie 4.0 (kurz: I4.0) und erklärt anschließend Begriffe und Konzepte, die im Zusammenhang mit der Thematik stehen und für den weiteren Verlauf der systematischen Analyse in späteren Kapiteln relevant sind. Abschließend werden die Ergebnisse zweier Studien über die aktuelle Akzeptanz und Bedeutung der I4.0-Konzepte in der deutschen Wirtschaft vorgestellt.

2.1 Prozessmodelle

Die Steuerung von komplexen und vielschichtigen Systemen erfordert eine Konzeption, die es ermöglicht, eine sehr große Anzahl an unterschiedlichsten Vorgängen vollständig und verständlich grafisch darzustellen. Vor allem Abläufe und Prozesse auf und zwischen allen Ebenen eines Unternehmens lassen sich unter Zuhilfenahme von Prozessmodellen visualisieren. Der Begriff der Prozessmodellierung stammt aus dem Bereich des Prozessmanagement, auch *Business Process Management* genannt, und beinhaltet die grafische Abbildung von Unternehmensabläufen und Informationsflüssen zur Analyse, Steuerung und Optimierung. Zum besseren Verständnis werden im Abschnitt 2.1.1 die grundlegenden Termini zum Thema Prozesse und Modellierung erläutert, insbesondere die für diese Arbeit relevanten Geschäftsprozesse. Anschließend gibt der Abschnitt 2.1.2 einen Überblick über einige weitverbreitete und häufig genutzte Modellierungssprachen beziehungsweise -methoden.

2.1.1 Begriffsbestimmungen

Zum Einstieg in die Thematik der Prozessmodelle werden die Teilbegriffe „Prozess“ und „Modell“ zunächst einzeln näher erläutert. Nach den Ausführungen der Industrienorm ISO 9000 ist ein „**Prozess**“ ein System von in Wechselbeziehung stehender Tätigkeiten, das Eingaben mit Hilfe von Mitteln in Ergebnisse umwandelt. Der Standard beschreibt somit einen Prozess als eine Reihenfolge aufeinander folgender Aktivitäten, die durch ein definiertes Ereignis angeregt werden und ein messbares Ergebnis erzeugen [4] [5]. Nach *Richter-von Hagen* und *Stucky* beschreibt ein Prozess einen allgemeinen Ablauf mehrerer Phasen, bei denen es sich um Aufgaben oder Arbeitsschritte handeln kann. Die einzelnen Prozessabschnitte sind durch festgelegte Regeln in Abhängigkeit und beeinflussen beziehungsweise bedingen einander [6].

Nach *Becker et al.* ist eine „**Aktivität**“ ein „*Arbeitsschritt, der zur Erbringung einer Leistung durchgeführt werden muss*“ [7]. Beispielsweise das Erstellen einer Rechnung ist solch ein separater Arbeitsschritt. Daraufhin definieren die Autoren:

„Ein Prozess ist die inhaltlich abgeschlossene, zeitliche und sachlogische Folge von Aktivitäten, die zur Bearbeitung eines betriebswirtschaftlichen relevanten Objektes notwendig sind.“

Die Aktivität der Rechnungserstellung ist somit im Prozess der gesamten Rechnungsstellung an den Kunden nur eine separate Funktion, die einzelne oder mehrere Eingaben, zum Beispiel Kundendaten etc., als Vorbedingung hat und als Ausgabe wieder Ergebnisse an den nächsten Teilschritt weitergibt, zum Beispiel die fertig erstellte Rechnung für den Kunden.

Eine umfangreiche Bestimmung der Begrifflichkeit „**Modell**“ liefert *Strahringer* in ihren Ausführungen zu Modellen und Metamodellen in der Wirtschaftsinformatik [8]. Sie erklärt in ihrer Arbeit, dass es zwei Verständnisse bei der Modellierung gibt: eine Abbildungs- sowie eine Konstruktionsorientierung. Bei ersterem Verständnis dienen die Modelle der abstrakten Darstellung bereits bestehender Objekte und Abläufe unter Berücksichtigung der Komplexitätsreduzierung durch den Modellersteller. Die Modelle sind zweckorientiert und subjektive Abbildungen, jedoch sind sie im Kern nur eine Reproduktion bestehender Verhältnisse. Der zweite Ansatz beschreibt den Modellierungsvorgang hingegen als aktiven Konstruktionsvorgang. Modellersteller und -nutzer arbeiten zweckorientiert am Aufbau eines Modells, welches danach zur Umsetzung durch den Nutzer gebracht wird. Bei der Präzisierung der subjektiven Vorstellungen und Ansprüche des Nutzers an das Modell wird eine Modellsprache mit ihrer jeweiligen Syntax und Semantik verwendet.

Als Sprachen werden in diesem Zusammenhang eine standardisierte Beschreibungsweise in Form von Symbolen, auch Notation genannt, bezeichnet [9].

Zusammenfassend stellt ein „**Prozessmodell**“ eine abstrakte, vereinfachte und standardisierte Form der Visualisierung von Unternehmensabläufen dar. Es beschreibt alle möglichen Pfade entlang des Prozesses und bestimmt die Regeln für die Wahl der Pfade mittels einer festgesetzten Modellierungssprache [6]. Das „*Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat*“ (kurz: BMI) definiert Prozessmodelle als chronologisch-sachliche Abfolge von Tätigkeiten. Je nach Detaillierungsgrad können einzelne Prozesse in mehrere granulare Teilprozesse über verschiedenen Hierarchie- oder Beschreibungsebenen hinweg dargestellt werden. Das Ziel der Prozessmodellierung ist es, Verständnis und Transparenz über Funktionen und Tätigkeiten innerhalb und außerhalb des Unternehmens zu gewinnen, zu dokumentieren und zur Verbesserung zu nutzen [9]. Verbesserungspotenziale bestehen beispielsweise im Erkennen von Ressourceneinsparungspotenzialen und optimierten Unternehmensabläufen.

Prozessmodelle bilden zusätzlich die Grundlage für die Entwicklung und Einführung von Managementsystemen und Systemanwendungen für den abgebildeten Prozess [6].

2.1.2 Geschäftsprozesse und das ARIS-Haus

In der Wirtschaft verwendet man bei der Prozessmodellierung den Term der „**Geschäftsprozesse**“ beziehungsweise im Englischen „**Business Process**“. Diese Geschäftsprozesse und -modelle sind thematische Bestandteile in der Ablauforganisation eines Unternehmens und im Kern als Prozessmodelle, wie im Kapitel zuvor definierten Sinn, zu verstehen. Im weiteren Rahmen dieser Arbeit werden Geschäftsprozesse und der Term „Prozess“ synonymhaft verwendet. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass die Betrachtung des Forschungsstandes von Prozessmodellen im Kontext der I4.0 eine Untersuchung der Umsetzung und Weiterentwicklung bestehender Geschäftsprozessmodellierungskonzepte darstellt.

In der Literatur existieren verschiedene Interpretationen und Definitionen für den Begriff „Geschäftsprozess“. Einige von ihnen werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt, um daraufhin gemeinsame Eigenschaften eines Geschäftsprozesses und -modells herauszuarbeiten. Grundlegend dienen Geschäftsprozessmodelle der Visualisierung von unternehmensspezifischen Prozessen. *Davenport* beschreibt Geschäftsprozesse als eine strukturierte, messbare Anzahl von Vorgängen, die unter Input einen bestimmten Output für einen Kunden oder Markt erzeugen [10]. Der Output sei dabei nebensächlich, der Vorgang beziehungsweise der Prozess steht im Zentrum der Betrachtung.

Dieser Begriffsbestimmung fügen *Richter-von Hagen* und *Stucky* eine zusätzliche Bedeutung für den Ablauf eines Geschäftsprozess bei. Sie definieren ihn als *„eine Abfolge von Aktivitäten, die der Erzeugung eines Produktes oder einer Dienstleistung dienen. Er wird durch ein oder mehrere Ereignisse gestartet und durch ein oder mehrere Ereignisse abgeschlossen. Es liegt eine Organisationsstruktur zu Grunde“* [6]. Im Vergleich zum klassischen Prozessmodell werden somit Rollen vergeben beziehungsweise Aktivitäten benötigten Verantwortliche, die durch eine Organisationsstruktur im Unternehmen festgelegt sind.

Die Autoren *Laudon et al.* definieren Geschäftsprozesse als *„eine Folge von logisch zusammenhängenden Aktivitäten, die für das Unternehmen einen Beitrag zur Wertschöpfung leisten, einen definierten Anfang und ein definiertes Ende haben, wiederholt durchgeführt wird und sich in der Regel am Kunden orientiert“* [11]. Geschäftsprozesse beschreiben Arbeitsabläufe, welche Material, Wissen und Daten umfassen und diese unternehmensweit und funktionsübergreifend koordinieren. Sie sehen die optimale Strukturierung der eigenen Unternehmensprozesse als möglichen Wettbewerbsvorteil gegenüber Konkurrenten.

Die Eigenschaften von Geschäftsprozessen lassen sich somit wie folgt zusammenfassen:

- Der Prozess besitzt eine abgeschlossene Menge von Aktivitäten, die zeitlich und logisch strukturiert sind.
- Der Prozess wandelt Inputgrößen, wie Zeit, Geld, Daten oder Material, in messbaren Output um.
- Der Prozess berücksichtigt die Kundenanforderungen. Der Kunde steht im Mittelpunkt.
- Der Prozess besitzt einen Verantwortlichen, der durch die Organisationsstruktur des Unternehmens bestimmt ist.

Das gesamte Geschäftsprozessmodell stellt dementsprechend alle Geschäftsprozesse des Unternehmens dar und ermöglicht einen hohen Grad an Transparenz. Diese Visualisierung ermöglicht es, Abläufe neuzugestalten und Vorgänge zu optimieren, mit dem Ziel Kosten zu senken und Ressourcen einzusparen. Die Konzipierung des Geschäftsprozessmodells und des Geschäftsprozessmanagements erhält infolgedessen einen sehr hohen wirtschaftlichen Stellenwert für das Unternehmen. Als einige der wichtigsten kritischen Erfolgsfaktoren bei der Umsetzung eines Geschäftsprozessmanagementsystems bezeichnet *Trkman* in seiner Studie den Ressourceneinsatz bei der Strategie- und IT-Implementierung, den Aufbau eines Kennzahlsystems zur Erreichung und Messung kontinuierlicher Verbesserungen, Mitarbeitertraining und klar definierte Verantwortlichkeiten sowie einen gewissen Grad an Dokumentation und Standardisierung der Prozesslandschaft [12].

In diesem Zusammenhang ist der **BPM-Lebenszyklus**, wie in Abbildung 1 dargestellt, zum besseren Verständnis über den Aufbau eines funktionierenden Managements von Geschäftsprozessen relevant [13] [14]. Der Zyklus beschreibt die unterschiedlichen Phasen eines Prozesses, die zur kontinuierlichen Optimierung durchlaufen werden sollten.

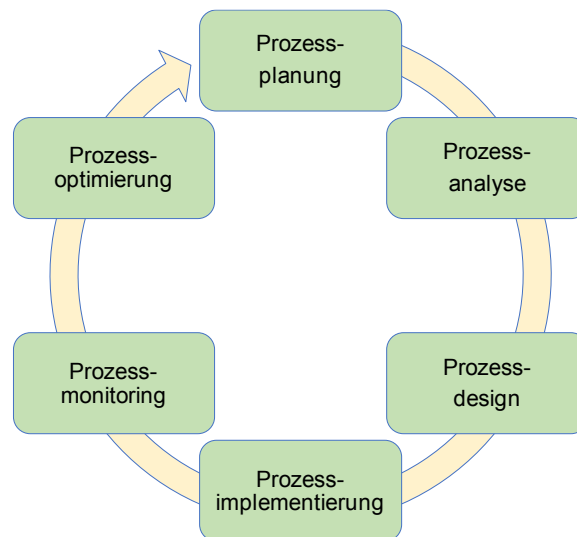


Abbildung 1: BPM-Lebenszyklus, in Anlehnung an [13]

Während der Phase der „Prozessplanung“ wird ein Ist-Zustand des Geschäftsprozess, der im weiteren Fokus der Betrachtung steht, identifiziert und modelliert. Anschließend werden die bestehenden Mängel und Verbesserungspotenziale dieses Prozesses in der „Analyse“-Phase herausgearbeitet, um in der „Design“-Phase einen optimierten Prozess zu gestalten. Diese Optimierung dient der Soll-Zustandsmodellierung des Prozesses, was dem Idealbild der Modelnutzer und -ersteller gleichkommt. In der Phase der „Implementierung“ erfolgt die Eingliederung und Anwendung des verbesserten Prozessmodells in das bestehende Geschäftsprozessmanagementsystem des Unternehmens.

Währenddessen überwacht die „Monitoring“-Phase die Leistung und Effizienz des Prozesses, beispielsweise mit Hilfe eines Kennzahlsystems. Auftretende Mängel, bestehende Schwachstellen oder ungelöste Probleme werden in der Phase der „Optimierung“ zusammengefasst und durch einen neuen Durchlauf des Zyklus behoben.

Eine weitere populäre Methodik, die eine ganzheitliche Betrachtung von Geschäftsprozessen anstrebt, ist das von *August-Wilhelm Scheer* formulierte „**ARIS-Konzept**“ (kurz für: Architektur integrierter Informationssysteme) [15]. Das ARIS-Konzept erhebt den Anspruch, eine umfassende Architektur zur vollständigen Beschreibung von Anwendungssystemen anzubieten sowie einen Bezugsrahmen bei der Geschäftsprozessmodellierung in Informationssystemen zu geben. Dazu unterteilt ARIS das Informations- und Anwendungssystem eines Unternehmens in unterschiedliche Modellierungs- und Implementierungsebenen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Aufteilung in Sichten- und Schichtenebenen ermöglicht eine Reduzierung der Komplexität bei der Modellierung von Geschäftsprozessen.

Es unterteilt fünf Sichten auf ein Informationssystem bzw. einen Geschäftsprozess: Organisations-, Daten-, Steuerungs-, Funktions- und Leistungssicht. Der Steuerungssicht kommt hierbei eine besondere Rolle zu, da sie die Koordination bei der Integration der anderen Sichten übernimmt.

Neben den Sichten unterscheidet ARIS drei Schichten, die der Prozess bei der Erstellung und Implementierung in den Sichten des Informationssystems durchläuft. Diese Aufteilung soll das Unternehmen bei der Modellierung und Optimierung von Geschäftsprozessen und ihrer anschließenden IT-Umsetzung vollumfänglich unterstützen [16].

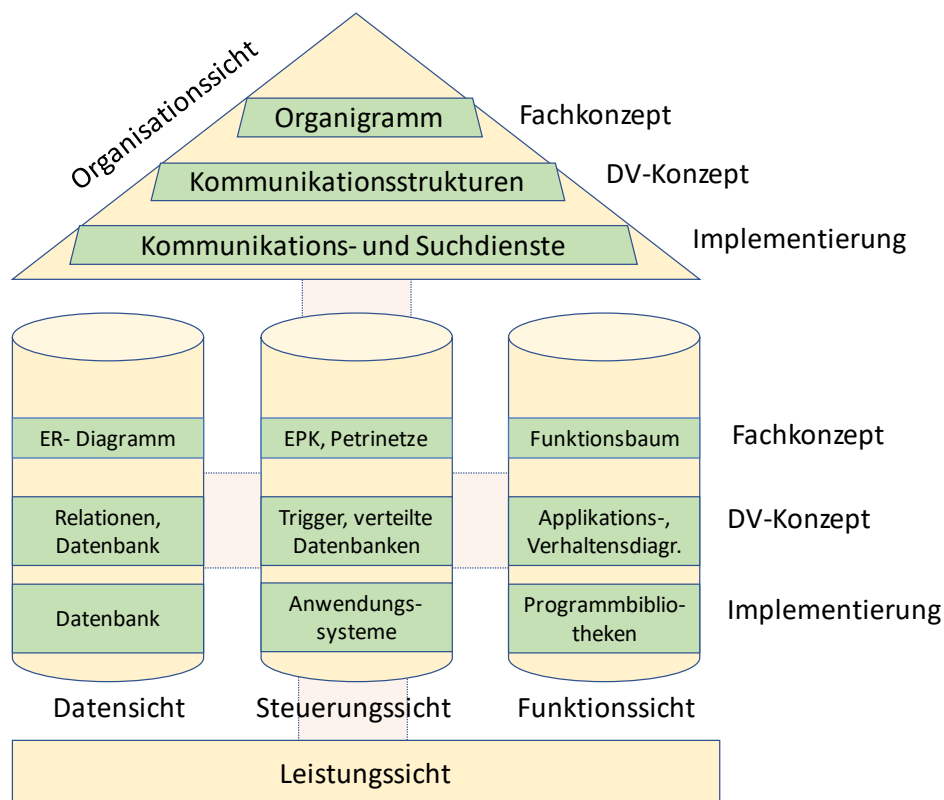


Abbildung 2: Sichten und Schichten des ARIS-Haus, in Anlehnung an [11]

Im folgenden Abschnitt werden die Bestandteile und Aufgaben der Sichten und Beschreibungsschichten des ARIS-Hauses kurz erklärt [6] [11] [15].

Die Organisationssicht definiert den Aufbau eines Unternehmens, das heißt sie beschreibt Standorte, Organisationseinheiten und Ressourcenverteilung und die Beziehungen zwischen

ihnen. Die Funktionsschicht beinhaltet alle Vorgänge des Unternehmens sowie deren verwendete Anwendungssoftware. Die Aufgaben erhalten Relationen zueinander und Zielhierarchien werden aufgestellt.

Die Datensicht dient der Sammlung und Speicherung aller Informationen des Informationssystems. Dies betrifft auch Eingaben, die Vor- oder Nachbedingung von Funktionen der Funktionssicht sind.

Die Leistungssicht beschreibt die Input- und Output-Größen des Unternehmens, alle Sach- und Dienstleistungen sowie Geldflüsse. Sie sind die Ergebnisse der Unternehmensprozesse. Abschließend verbindet die Steuerungsschicht die anderen Sichten. Sie enthält die vollständige Prozessbeschreibung. Dazu werden Prozesse als Abfolge von Funktionen aufgefasst und ereignisorientiert definiert. Diese Integration geschieht oftmals mittels ereignisgesteuerter Prozessketten (kurz EPK), die im folgenden Unterkapitel erläutert werden.

Die drei Schichten beziehungsweise Beschreibungsebenen definieren den Verlauf bei der Umsetzung zur Lösung einer betriebswirtschaftlichen Problemstellung in das Informationssystem. Das Fachkonzept liefert eine formalisierte Darstellung des angestrebten Soll-Zustandes für die spätere IT-Realisierung. In der nächsten Ebene wird das Fachkonzept an die Anforderungen der IT angepasst und das Prozessmodell für die Implementierung in ein Datenverarbeitungssystem vorbereitet. Im letzten Schritt der Implementierung werden konkrete Hardwarekomponenten und Anwendungen entsprechend der Anforderungen bestimmt.

Somit bietet die ARIS-Architektur einen umfangreichen Bezugsrahmen zur Beschreibung und Modellierung von Geschäftsprozessen in betriebswirtschaftlichen Anwendungssystemen. Die Wahl der Prozessmodellierungssprache steht dabei jedem Unternehmen offen. Das Unterkapitel 2.1.3 stellt zu diesem Zweck verschiedene Modellierungsmethoden beziehungsweise -sprachen vor.

2.1.3 Methoden der Prozessmodellierung

Eine Modellierungssprache bildet den Ausgangspunkt zur Visualisierung der Strukturen und Abläufe im Unternehmen. Sie sind mit ihrer jeweiligen Syntax und Semantik die Grundlage für die Beschreibung von Geschäftsprozessmodellen und schaffen Transparenz sowie ein komplexitätsreduziertes Abbild aller Unternehmensvorgänge.

Es existieren zahlreiche Modellierungssprachen in der Wirtschaft und Fachliteratur, jedoch werden im Rahmen dieser Arbeit nur drei ausgewählte Sprachen vorgestellt und ihre zugrunde liegenden Konzepte erläutert. Die Auswahl basiert auf den Ergebnissen zweier Befragungen von BPM-Experten [17] beziehungsweise von Führungskräften und BPM-Spezialisten im deutschsprachigen Raum [18].

Ein zentraler Bestandteil der SAP-Referenzmodelle und des ARIS-Konzeptes ist die „**Ereignisgesteuerte Prozesskette**“ (kurz: EPK), im englischen „*Event-driven process chain*“. Diese semiformale Modellierungssprache wurde von Scheer in Zusammenarbeit mit der SAP AG zur (Re-)Dokumentation von Geschäftsprozessen entwickelt und bietet die Basis modellgetriebener Ansätze für ein durchgängiges und anwendungsgestütztes Geschäftsprozessmanagement [19]. Die EPK beschreibt eine Methode zur Modellierung von zeitlichen und sachlogischen Abhängigkeiten zwischen Funktionen und Ereignissen eines Geschäftsprozesses [20].

Der Grundgedanke hinter dem Konzept ist, dass Funktionen durch Ereignisse ausgelöst werden, die wiederum Ergebnisse von anderen Funktionen sind. Visualisiert ist eine EPK ein zusammenhängender Graph, bestehend aus ein oder mehreren Start- und Endereignissen sowie aus sich abwechselnden Funktionen und Ereignissen. Der Kontrollfluss des Graphen wird dabei durch gerichtete Kanten und Konnektoren (AND, OR und XOR) gesteuert. Die EPK finden im ARIS-Konzept in der Steuerungssicht Anwendung.

Diese Sicht verlangt jedoch eine Zusammenführung und Verknüpfung aller übrigen ARIS-Ebenen, was eine Modellierung mit einfachen EPK verkompliziert. Zu diesem Zweck werden zusätzlich Prozessschnittstellen, Organisationseinheiten sowie Informationsobjekte mitsamt entsprechenden Ressourcen – und Informationsflüssen modelliert und man spricht von einer „**erweiterten EPK**“ [21]. Für eine vollumfängliche Modellierung auf der DV-Schicht des ARIS-Hauses benötigt man jedoch Modellierungssprachen, die sich stärker an den software-technischen Anforderungen für die Verhaltensmodellierung orientieren, wie die dynamischen Diagrammtypen der „Unified Modeling Language“ [20].

Die „**Unified Modeling Language**“ (kurz: UML) wurde als Modellierungssprache Mitte der 1990er Jahre konzipiert und hat sich aus dem Bereich der objektorientierten Programmierung entwickelt [11] [22]. Sie wird heutzutage als standardisierte und werkzeugunterstützte Sprache von der Object Management Group mit der aktuellen Version 2.5 weiterentwickelt und erfährt regelmäßig anwendungsbezogene Erweiterungen, sogenannte „Profile“. Die UML bietet insgesamt über 14 Diagrammtypen zur Spezifikation, Konstruktion und Dokumentation von Anwendungs- und Prozesssystemen.⁴

Diese Diagrammtypen lassen sich in drei Gruppen aufteilen:

- Strukturdiagramme, wie. Klassen-, Objekt- und Komponentendiagramm
- Verhaltensdiagramme, wie Aktivitäts-, Anwendungsfall- und Zustandsdiagramm
- Interaktionsdiagramme, wie Kommunikations-, Sequenz- und Zeitverlaufdiagramm

Strukturdiagramme beschreiben statische Aspekte des zu modellierenden Gegenstandes beziehungsweise des Prozesses. Es werden Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Klassen oder Objekten, meist im Ist-Zustand, dargestellt. Die anderen beiden Gruppen, die Verhaltens- und Interaktionsdiagramme, dokumentieren die Dynamik in einem objektorientierten System mithilfe von Interaktionen, Objektkonfigurationen und Zustandshistorien.

Sie beschreiben Verhaltensaspekte, Informationsflüsse, zeitliche Abläufe von Aktivitäten und Anwendungen und ermöglichen die Erstellung eines konsistenten Gesamtmodells. Diese objekt- und systemorientierte Art der Strukturierung geschieht auch in der Geschäftsprozessmodellierung und findet Beachtung sowie Anwendung in der Praxis und Forschung, beispielsweise in Aktivitätsdiagrammen [17] [23].

Einen anderen Blickwinkel der Systemdarstellung wählt die Modellierungssprache der „**Business Process Model and Notation**“ (kurz: BPMN) mit dem Fokus auf die grafische Notation von Geschäftsprozessen [24] [25]. Die BPMN hat sich in den vergangenen Jahren als der Standard für die Prozessmodellierung etabliert und wird, wie die UML, von der Object Management Group in der aktuellen Version 2.0 betreut [26].

⁴ Siehe Abbildung A-1 im Anhang, Beispiele der UML Diagrammtypen

Die Modellierungssprache zeichnet sich, neben ihrer festgelegten Ausführungssemantik, durch ihr einheitliches und umfangreiches System von Elementen zur Darstellung von Geschäftsprozessen aus.⁵ Die BPMN beschreibt einen Geschäftsprozess in Form eines *Prozessdiagramms*, das eine zeitlich-logische Abfolge von Ereignissen, Entscheidungen und Aufgaben beinhaltet. Dabei können alle unternehmensinternen und -fremden Bereiche sowie die Ressourcen-, Nachrichten -und Datenflüsse zwischen ihnen modelliert werden.

Weitere Diagrammtypen sind die hierarchische Modellierung von Interaktionsszenarien in *Konversationsdiagrammen* und die Visualisierung der detaillierten Ablaufreihenfolge konkreter Konversationen des Prozesses in *Choreographie-Diagrammen*.

Die hohe Ausdrucksfähigkeit trägt, unter Berücksichtigung der gewährleisteten hohen Prozessmodellqualität, zum leichteren Verständnis und Transparenz der Unternehmensvorgänge bei. In Verbindung mit der bereits vorgestellten objektorientierten UML-Methodik und ihren Verhaltensdiagrammen ermöglicht der prozessorientierte BPMN-Ansatz eine bessere und schnellere Umsetzung der grafischen Modelle in die Anwendungssysteme des Unternehmens [24].

⁵ Siehe Abbildung A-2 im Anhang, Elemente der „Business Process Model and Notation 2.0“

2.2 Industrie 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“ ist seit der erstmaligen öffentlichen Erwähnung auf der Hannover Messe ein Synonym für die Zukunft der Organisation und der Produktion in Unternehmen am Standort Deutschland. Ziel dieses Kapitels ist es, die wesentlichen Ausgangspunkte und den Ursprung dieser Thematik zu definieren.

Im Rahmen des Kapitels sollen die Grundlagen von Industrie 4.0 in Deutschland dargestellt, sowie die Begrifflichkeiten und technische Möglichkeiten des informationstechnologischen Fortschritts erläutert werden. Abschließend wird der aktuelle Entwicklungs- und Anwendungsstand anhand zweier Studien aus den letzten Jahren vorgestellt.

2.2.1 Entstehung und Begriffsbestimmung

Um die Bedeutung einer vermeintlich vierten industriellen Revolution für die Wirtschaft einschätzen zu können, muss man die vergangenen technologischen Umwälzungen und ihre Stellenwerte in den jeweiligen Epochen identifizieren.

In der neueren Geschichte der Menschheit gab es bislang drei große Entwicklungsstufen, auch industrielle Revolutionen genannt, welche einen umwälzenden und permanenten Wandel der wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse bewirkten. Diese sogenannten Revolutionen sind keineswegs vorausgeplante Abläufe, sondern haben sich über die Zeit schrittweise durchgesetzt und lassen sich heutzutage zurückblickend als Paradigmenwechsel bestimmen. Die Abbildung 3 zeigt die einzelnen Entwicklungsphasen aus produktionstechnischer Sicht im zeitlichen Verlauf. Die Grafik verdeutlicht, dass es in kürzer werdenden Zeitabständen einen kontinuierlichen Anstieg an Komplexität gab und dieser sich mit einer vierten Revolution fortsetzen wird. Erwähnenswert ist der Fakt, dass erstmalig in der Geschichte eine industrielle Revolution verkündet wurde, bevor sie stattgefunden hat.

Die **erste industrielle Revolution** wurde mit der Verbreitung der Massenproduktion durch den Einsatz von Maschinen, zum Beispiel der mechanische Webstuhl, eingeleitet. Erfindungen, wie das Prinzip der Dampfmaschine, führten in zahlreichen Wirtschaftszweigen, wie der Schwerindustrie, dem Transportwesen und dem Kohleabbau, zu fundamentalen Neuerungen. Die neuartige Nutzung der Wasserkraft diente auf dieser Entwicklungsstufe als grundlegende Energie zur Produktionssteigerung.

Ende des 19. Jahrhunderts wurde mit der Einführung der Elektrizität als primäre Energiequelle der nächste Wandel initiiert. Durch die **zweite industrielle Revolution** konnte die Arbeit in den Fabriken durch Motoren stärker automatisiert werden. Zudem ergaben sich aus der Produktionssteigerung durch Fließbandarbeit, neuen Telekommunikationstechniken und Erfindungen in der Luft- und Schifffahrt erste Schritte zur Bildung eines globalen Handelsmarkts.

Die Erforschung und Weiterentwicklung von Rechenmaschinen und digital freiprogrammierbaren Steuerungseinheiten lösten ab den 1970er Jahren die vorherrschenden analogen Logiken ab und bilden die Grundlage für den fortdauernden Automatisierungstrend.

Diese **dritte industrielle Revolution** gipfelt heutzutage in hochautomatisierten Industrieanlagen und modernen Prozessleitsystemen für eine effizientere, nahezu voll automatisierte Produktion.

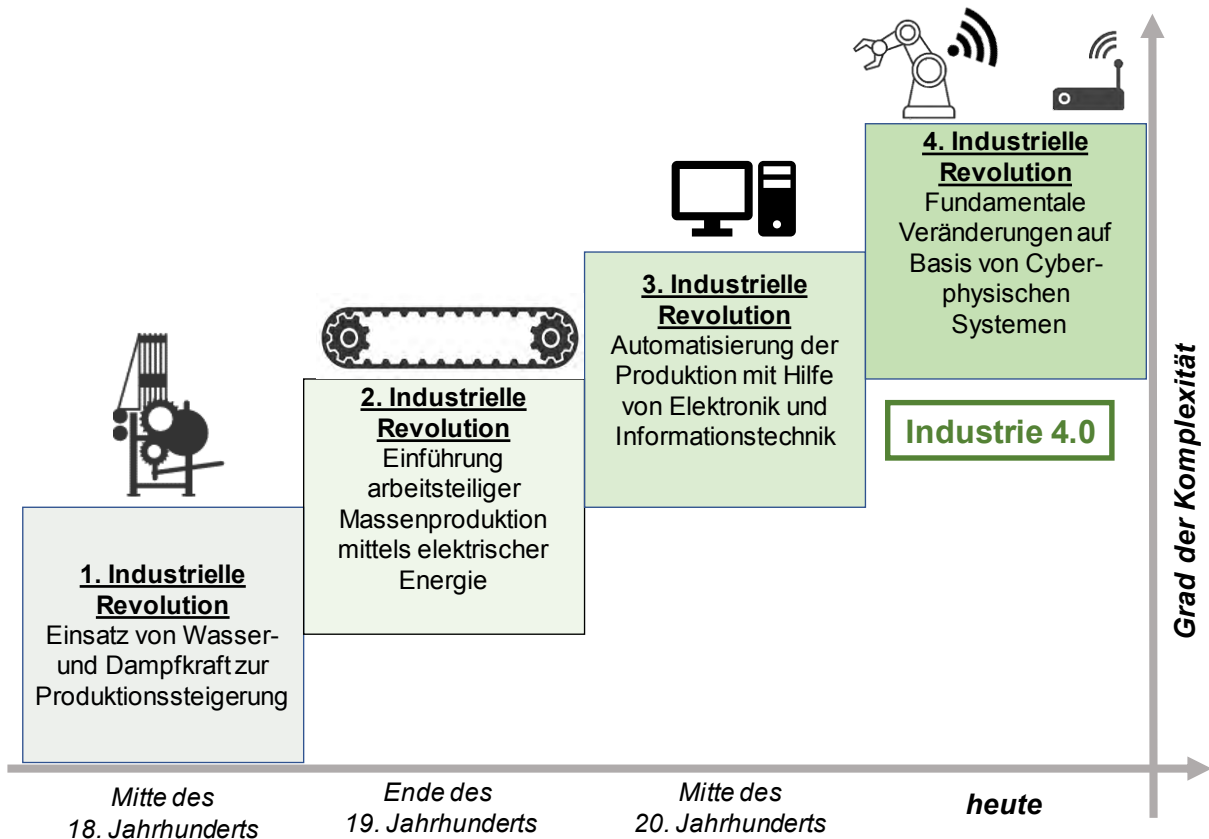


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des industriellen Fortschritts, in Anlehnung an [27]

Als nächste Stufe des technologischen Fortschritts wurde im Jahr 2011 erstmalig auf der Hannover Messe das Vorhaben der Industrie 4.0 vorgestellt [1].

Das Vorhaben gilt als wegweisendes Weiterentwicklungskonzept für die deutsche Wirtschaft und als Fahrplan einer **vierten industriellen Revolution** [2]. Es steht laut „Bundesministerium für Bildung und Forschung“ (kurz: BMBF), für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. Das Projekt zeichnet sich nach Meinung des BMBF durch den Charakter einer stark individualisierten Produktion bei gleichzeitig hoher Flexibilität sowie als echtzeit-optimierte Integration von Kunden und Geschäftspartnern entlang der Wertschöpfungskette aus [28].

Das „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie“ (kurz: BMWI) führt dieses Verständnis des Industrie 4.0-Konzeptes weiter aus. Ihrer Meinung nach steuern zukünftig intelligente Maschinen selbständig Fertigungs- und Logistikprozesse, die Mensch-Maschine-Interaktion erleichtert komplizierte Arbeiten und der gesamte Produktlebenszyklus kann digital abgebildet werden [29].

Darüber hinaus haben sich die wirtschaftlichen Trägerverbände „Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie“ (ZVEI), „Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau“ (VDMA) und der „Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien“ (kurz: BITKOM) im Jahr 2013 zusammengeschlossen, um eine gemeinsame Plattform zur Schaffung einheitlicher Rahmenbedingungen und der Erstellung von Handlungsempfehlungen für die deutsche Wirtschaft zu erstellen [30]. Diese „Plattform-Industrie 4.0“ beschreibt den bevorstehenden Strukturwandel durch die industrielle Revolution wie folgt:

„Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie.“⁶

Die „Deutsche Akademie der Technikwissenschaften“ (kurz: acatech) definiert das Konzept in ihrem Bericht sehr umfassend und schließt alle Bereiche des unternehmerischen Schaffens ein: [2]

„Die Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration von Cyber-Physischen-Systemen (CPS) in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation.“

Diese ausführliche Definition nach acatech dient dieser Arbeit als Begriffsgrundlage, denn sie enthält alle wesentlichen Gesichtspunkte der I4.0. Die in diesem Zusammenhang genutzten Begrifflichkeiten und Kernelemente von Industrie 4.0 werden in Kapitel 2.2.2 erläutert und voneinander abgegrenzt.

Des Weiteren nennt der Bericht wichtige Handlungsfelder, auf denen industrielle und industriepolitische Entscheidungen getroffen werden müssen, um die Wirtschaft bei der Umsetzung der digitalen Transformation zu unterstützen:

- Standardisierung und eine Referenzarchitektur bei firmenübergreifender Vernetzung
- Beherrschung komplexer Systeme durch angepasste Erklärungsmodelle
- Flächendeckende Breitbandinfrastruktur
- Betriebs- und Angriffssicherheit intelligenter Produktionssysteme
- Wandel der Arbeitsorganisation, sowie kontinuierliche Aus- und Fortbildungen der Mitarbeiter
- Rechtliche Rahmenbedingungen zum Datenschutz und zu innovativen Unternehmensstrukturen
- Ermittlung von Methoden zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Zusammenfassend lässt sich die konzeptionelle Idee einer vierten industriellen Revolution als Paradigmenwandel der automatisierten Wirtschaft zu einer vollständig digitalisierten Wirtschaft bezeichnen.

⁶<https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
(Zugriff am 24. 08. 2018)

Entscheidender Treiber dieser Entwicklung ist eine kostengünstige Kommunikationsinfrastruktur und die Möglichkeit zur vollumfassenden Abbildung aller unternehmerischen Prozessschritte im Netz. Geräte, Maschinen und Anlagen werden durch das Internet weltweit vernetzt und ihre virtuellen Abbilder können sich miteinander „selbstbewusst“ koordinieren [27].

Somit stellen die integrierten Systeme und eine autonome, selbstbestimmte Maschinensteuerung die Kernelemente für das Verwirklichen einer digitalen Transformation dar. Im Zentrum stehen hierbei die Cyber-physischen-Systeme und das „Internet der Dinge“ (kurz: IoT), welche die Basis für die komplexe Vernetzung darstellen. Diese und weitere essentielle Elemente werden im Kapitel 2.2.2 präzisiert.

2.2.2 Basiselemente der Industrie 4.0

Die bevorstehende industrielle Revolution ist im deutschsprachigen Raum mit dem Begriff der „Industrie 4.0“ belegt und soll die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft in einem globalen, digitalen Produktions- und Vertriebsmarkt sichern [2]. Jedoch dient der Begriff in der Presse beziehungsweise auch in den Köpfen einiger Entscheidungsträger bislang eher als ungenauer Sammelbegriff für Konzepte und Ideen der digitalen Transformation. Dieses Kapitel stellt die Kernelemente der Industrie 4.0 vor und soll eine terminologische Abgrenzung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, liefern.

Die grundlegenden Komponenten der digitalen Revolution beschreibt der Begriff der „**Cyber-Physical Systems**“ (kurz: CPS). Eine weitgefassete Einordnung der CPS liefern *Rajkumar et al.*, die die cyber-physischen Systeme als „*physical and engineered systems whose operations are monitored, controlled, coordinated and integrated by a computing and communicating core*“ erklären [31].

Die Verbindung von Maschinensystemen der realen Welt mit einem digitalen Abbild ist der Kern des CPS-Konzeptes. Als Verbindungsstücke beziehungsweise als Verbindungstechnologien sehen die Autoren die rasanten Fortschritte auf den Gebieten der kabellosen Kommunikation über das Internet und der kosten- und energieeffizienten Sensortechnologie. Diese Fortschritte

ermöglichen echtzeitbasierte Informationsübermittlung und wechselseitige Steuerungsmöglichkeiten, erfordern jedoch durch die erhöhte Komplexität ein gesteigertes Maß an Koordinationsaufwand und Sicherheit.

Ein weiterführender Ansatz zur Begriffsbestimmung ist die direkte Verknüpfung des CPS-Konzeptes mit dem IT-Konzept der eingebetteten Systeme, in der englischen Fachliteratur *embedded systems* genannt [32]:

A cyber-physical system (CPS) is an integration of computation with physical processes whose behavior is defined by both cyber and physical parts of the system. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa. As an intellectual challenge, CPS is about the intersection, not the union, of the physical and the cyber.

Dem Begriff der CPS wird die Stellung eines übergeordneten Systems zugeschrieben. Es bildet die von der I4.0 angestrebte Schnittmenge zwischen realen Netzwerken und deren Abbild in einer digitalen Umgebung. Dabei ist es jedoch von dessen reinen anwendungsorientierten Industrie-Gedanken losgelöst. Die CPS sollen ein universell anwendbares abstraktes Systemkonzept sein, das sicherer, robuster und effizienter als bestehende Netzwerke der rein physischen oder digitalen Sphären sein soll. [33]

Die Verknüpfung dieser beider Sphären kann durch die Anwendung und den Ausbau des „**Internet-of-Things**“ (kurz: IoT) und des „**Internet-of-Services**“ (kurz: IoS) erzielt werden. Wie es ihre Bezeichnungen andeuten, steht das Internet als primäres Element im Zentrum des *Internet der Dinge und Dienste*, wie sie in der deutschsprachigen Literatur genannt werden.⁷ Die Abbildung 4 illustriert die Beziehung zwischen CPS, IoT und IoS und nennt mögliche Anwendungsszenarien, die am Ende des Kapitels konkretisiert werden.

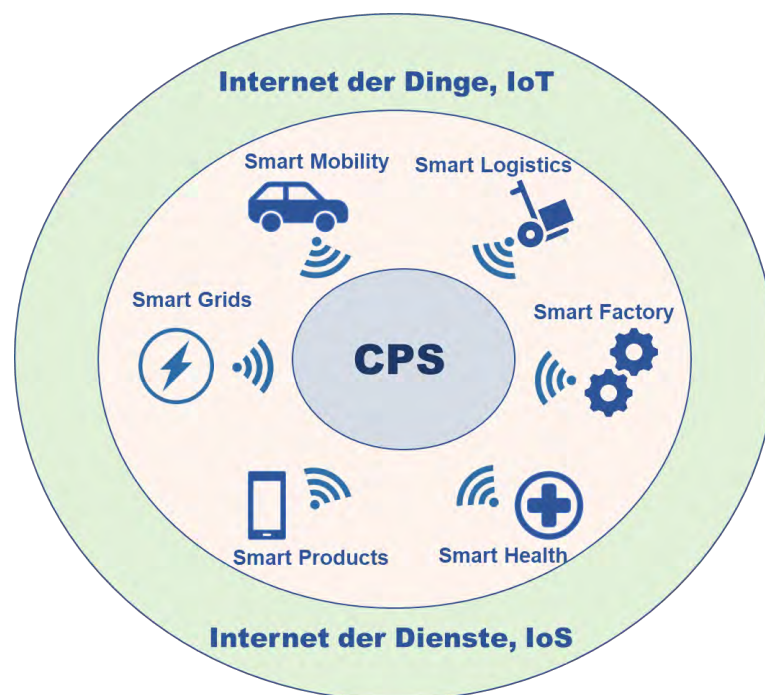


Abbildung 4: Cyber-physische Systeme als Teil des IoT und IoS, in Anlehnung an [2]

Der Kerngedanke des IoT liegt in der Verbindung intelligenter physischer Objekte über das Internet, um ein ortsunabhängiges Informationsnetzwerk zu schaffen, welches möglichst autonom handeln kann. Die sogenannte „Intelligenz“, oftmals mit dem Zusatz *smart* versehen, wird durch den Einsatz von Sensoren zur Informationssammlung, -übertragung und -empfang erreicht [34].

Die technischen Fortschritte auf dem Bereich der *Radio Frequency Identification* (kurz: RFID) und der flächendeckende Ausbau von Wifi und weiterer Mobilfunkstandards erlauben somit die exakte zeitliche und örtliche Bestimmung eines mit Sensortechnik ausgestatteten Produktes. Durch diese Bestimmung kann ein reales Objekt Daten senden und digital modelliert werden, sowie umgekehrt auch Informationen und Anweisungen aus dem Cybersystem erhalten.

⁷ Siehe Definition „Industrie 4.0“ nach acatech in Kapitel 2.2.1

Die gesammelten Daten und deren Verarbeitung werden durch die IT-Infrastruktur und Rechenleistung des IoS übernommen. Wohingegen die IoT-Objekte meist mit RFID und Chips mit geringer Rechenleistung und Speicherkapazität ausgestattet sind, bietet das IoS mit dem Bereich des **Cloud-Computing** eine leistungsstarke, quasi unbeschränkte Speicher- und Rechenleistung [35] [36]. Die Bereitstellung von dezentralen Rechnernetzen, Serverlandschaften und Software erlauben sowohl die dauerhafte Speicherung großer Datenmengen als auch die echtzeitbasierte automatisierte Verarbeitung der Informationen. Die cyber-physischen Objekte werden durch die Anwendungen des IoS kontrolliert, gewartet und gesteuert.

Dadurch leiten sich sinkende Energiekosten und eine erheblichen Effizienzsteigerung an Zeit ab. Somit bestehen CPS aus drei Ebenen: der physikalischen, der datenspeichernden und einem datenverarbeitenden System [27].

Bei der Migration mehrerer CPS in der produzierenden Industrie spricht man von CPPS, den cyber-physischen-Produktionssystemen [2]. Die CPPS beschreiben die durchgängige Betrachtung von Produkten, Produktionsmitteln und Produktionssystemen unter der Berücksichtigung sich stetig ändernder Prozesse. Sie ermöglichen eine autonome Adaptivität des gesamten Produktionsprozesses und können durch die Informationen der Sensoren die Produktion und Logistik des Unternehmens dezentral steuern.

Die Anwendungsgebiete, in denen der Einsatz von CPS und IoT/IoS eine Effizienzsteigerung oder ein Neudenken elementarer Prozesse bewirken könnte, sind zahlreich [2] [31] [34] [37] [38]. In der Tabelle 1 sind verschiedene Bereiche mit ihren Einsatzmöglichkeiten von CPS aufgelistet.

Branche	Anwendungsfälle und Szenarien
Automobil	Routenmanagement für batteriegetriebene Autos, Integration von Elektroautos in die Energienetze, Vernetzung der Fahrzeuge und Infrastruktur zur Verkehrsflusssteuerung
Medizintechnik	Telemedizinische Überwachung von Vitalwerten Integrierte Patientenbetreuung Optimierung von Notfalleinsätzen und Krankenhausmanagement
Energiewirtschaft	<i>Smart Grids</i> zur Verbrauchskoordination und- optimierung Verbesserte und störungsfreie Erzeugungsplanung
Maschinen- und Anlagenbau	Vernetzung bei Produktionsplanung, Energiemanagement u. Lagersystemen Selbstorganisierende kundenintegrierte Fertigung Optimiertes Instandhaltungsmanagement
Mobilkommunikation	Verbesserte Lokalisierung Routenoptimierung und Erstellung von Bewegungsprofilen Verbesserter Ausbau und Auslastung der Mobilfunknetze
Logistik	Selbstorganisierende adaptive Logistik mittels RFID-Sensorik Zustandsabfragen in Echtzeit
Heim- und Gebäudeorganisation	Integrierte Sicherheitskonzepte und Gebäudeleittechnik Intelligente Energienutzung und -erzeugung, z.B. Photovoltaik

Tabelle 1: Anwendungsbeispiele von CPS in verschiedenen Bereichen

All diese Neuerungen würden einen positiven Einfluss auf die Wirtschaft und unser tägliches Leben haben, jedoch bestehen die größten Herausforderungen für die Anwendung der CPS in der konkreten Konzipierung der cyber-physischen Systeme [37].

Es bedarf ein Umdenken und neuer semantischer Modelle, um eine Kompatibilität zwischen der fehlerbehafteten und schwer kontrollierbaren realen Welt und der logikgebundenen Cyberwelt herzustellen.

Die Trendwende einer digitalen Transformation ist nicht nur in Deutschland Gegenstand der Forschung und Wirtschaftspolitik.

In den USA ist die Thematik als „*smart manufacturing*“ [39], sowie in Korea unter dem Begriff „*connected smart factory*“ [40], Bestandteil der Forschungsliteratur. Das Prinzip des *smart manufacturing* und der damit verbundenen *smart factory* greifen die Kerngedanken und Visionen der I4.0 auf und verfolgen die Erstellung eines intelligenten, vernetzten Produktionssystems als Ziel. Die technischen Mittel zur Realisierung werden auch in den sich kontinuierlich weiterentwickelnden Möglichkeiten des IoT und IoS erkannt, beispielsweise Sensortechnik zum *Tracking* und *Cloud-Computing/Manufacturing*.

Wie die Ergebnisse einer Studie [39] zeigen, ist eine definitorische Abgrenzung des Begriffs *smart-manufacturing* von I4.0 schwer möglich. Somit werden im Rahmen dieser Arbeit beide Begrifflichkeiten als gleichbedeutend betrachtet.

2.2.3 Momentaner Anwendungsstand in Deutschland

Nachdem der Ursprung, die Bedeutung des Begriffs der Industrie 4.0 sowie dessen Bestandteile in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 besprochen wurden, soll der folgende Abschnitt den aktuellen Anwendungsgrad relevanter Technologien und Konzepte in deutschen Unternehmen beleuchten. Für diesen Zweck werden die Ergebnisse zweier großer Befragungen von Unternehmen und Experten des produzierenden Gewerbes der letzten Jahre vorgestellt.

Im Jahr 2016 hat der BITKOM eine anwendungsfallbezogene Befragung seiner Mitglieder durchgeführt. [41] Ziel der Studie war es, einen realitätsnahen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung von I4.0-relevanten Themen in verschiedenen Branchen zu gewinnen. Der Verband wählte dafür 203 konkrete Anwendungsfälle der I4.0 von Veröffentlichungen der „Plattform-Industrie 4.0“ aus und unterteilte diese in zehn distinkte Anwendungskategorien. Die befragten Unternehmen wurden in neun Branchensektoren eingeteilt, welche alle dem verarbeitenden Gewerbe zugeordnet werden.

Die Auswahl der Sektoren begründet BITKOM mit der starken Einflussnahme zur Effizienzsteigerung durch den Einsatz technischer Innovationen und Konzepte. Zudem stellt das produzierende Gewerbe einen bedeutenden Anteil von ca. 25 % an der deutschen Bruttowertschöpfung dar. Insbesondere die Wertschöpfung im Fahrzeugbau, im Maschinenbau und in der Elektronikherstellung steuern ungefähr die Hälfte dessen bei.⁸

⁸ Daten des „Statistisches Bundesamt“: Statistisches Jahrbuch 2017, S.330
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/VGR.pdf?__blob=publicationFile
(Zugriff am 26. 08. 2018)

Die aus dem Resultat der Befragungen resultierende 9x10 Marktsegmentematrix ist in Abbildung 5 ersichtlich. Aus der Matrix lassen sich zwei grundsätzliche Trends aus den gewählten Dimensionen ablesen.

Zum einen sind die Branchen des Maschinenbaus mit ca. 30%, gefolgt von der Elektronikindustrie mit 26% und dem Fahrzeugbau mit 16% die Sektoren mit den meisten Anwendungsfällen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sie Bereiche mit starkem Innovationsdrang sind und der digitalen Transformation und den Konzepten der I4.0 einen hohen Stellenwert beimessen.

		Anwendungskategorien										
		Auftragsgesteuerte Produktion innerhalb des Konzerns	Auftragsgesteuerte Produktion in einer „connected World“	Value-based Services bez. auf ausgelieferte Produkte	Value-based Services bezogen auf eigene Werke/Maschinen	Assistenzsysteme Automatisierungslösungen	Assistenzsysteme Steigerung der Energie Effizienz	Transparenz & Wandfähigkeit ausgelieferter Produkte	Wandlungsfähige Fabrik	Adaptive Logistik	Smart Engineering	
Branchensektoren	Fahrzeugbau	1	1	1	2	7	10	1	1	1	2	16
	Maschinenbau	1	1	2	4	10	7	7	7	1	7	28
	Herstellung von DV-, Elektronik, Optik-Erzeugnissen und elektronischer Ausrüstung	1	1	1	3	8	1	2	5	2	1	26
	Metallerzeugung und Bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	1	1	1	1	4	1	1	1	1	0	13
	Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	3
	Herstellung von Gummi-, Kunststoff-, Glaswaren und Keramik	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
	Herstellung von Nahrungsmitteln und Getränken, Tabakverarbeitung	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
	Herstellung von Möbeln und sonstigen Waren, Reparatur und Installation von Maschinen	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	4
	Sonstiges verarbeitendes Gewerbe	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	5
		5	4	7	12	34	6	7	9	10	5	100

Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der BITKOM-Studie auf die Marktsegmente [41]

Zum anderen fallen die am häufigsten praktizierten Anwendungsfälle in die Kategorie der „Assistenzsysteme“ auf, vordergründig mit den Schwerpunkten auf „Automatisierungslösungen“ und „Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz“.

Deutlich weniger umgesetzte Anwendungsfälle werden im Bereich der „Value-Based Services“-bezogenen Produkte, eigener Werke und Maschinen verzeichnet. In diese Kategorie fallen Anwendungsfälle wie Dienstleistungen für bereits ausgelieferte Produkte und Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Die zweite in diesem Kapitel vorgestellte Studie zum Thema „Industrie 4.0“ wurde von der STAUFEN AG im Jahr 2017 durchgeführt. [42] Die Unternehmensberatung Staufen befragte dazu über 390 deutsche Unternehmen, welche sich zu über 70 % aus Firmen des Maschinen-

und Anlagenbaus sowie der Elektro- und Automobilindustrie zusammensetzten. Den gleichen Bereichen, welchen die bereits erwähnte BITKOM-Studie die höchste Motivation bei der Umsetzung von Themen der digitalen Revolution nachwies.

Diese Beobachtung stimmt auch mit den Erfahrungen der Umfragersteller von STAUFEN überein. Sie stellten fest, dass bereits über die Hälfte aller befragten Industrieunternehmen konkrete Erfahrungen mit I4.0 gemacht haben und nur ein kleiner Bruchteil von 8% der Firmen sich diesem Thema noch komplett verschließen.⁹

Der Anteil der Firmen, welche die vorbereitende Beobachtungsphase verlassen haben und zum Planen und ersten Umsetzen einzelner Smart-Factory-Konzepte übergegangen sind, ist im letzten Jahr zudem auf 41% gestiegen. Ein deutliches Anzeichen für die wachsende Bedeutsamkeit bei den Firmen.

Dabei ist die Quote einer umfassenden operativen Umsetzung von I4.0 weiter gering und liegt nur bei 7%. Abbildung 6 stellt in diesem Zusammenhang die Unternehmensbereiche dar, in denen die Befragten den Einsatz von I4.0-Konzepten konkret planen beziehungsweise umsetzen.

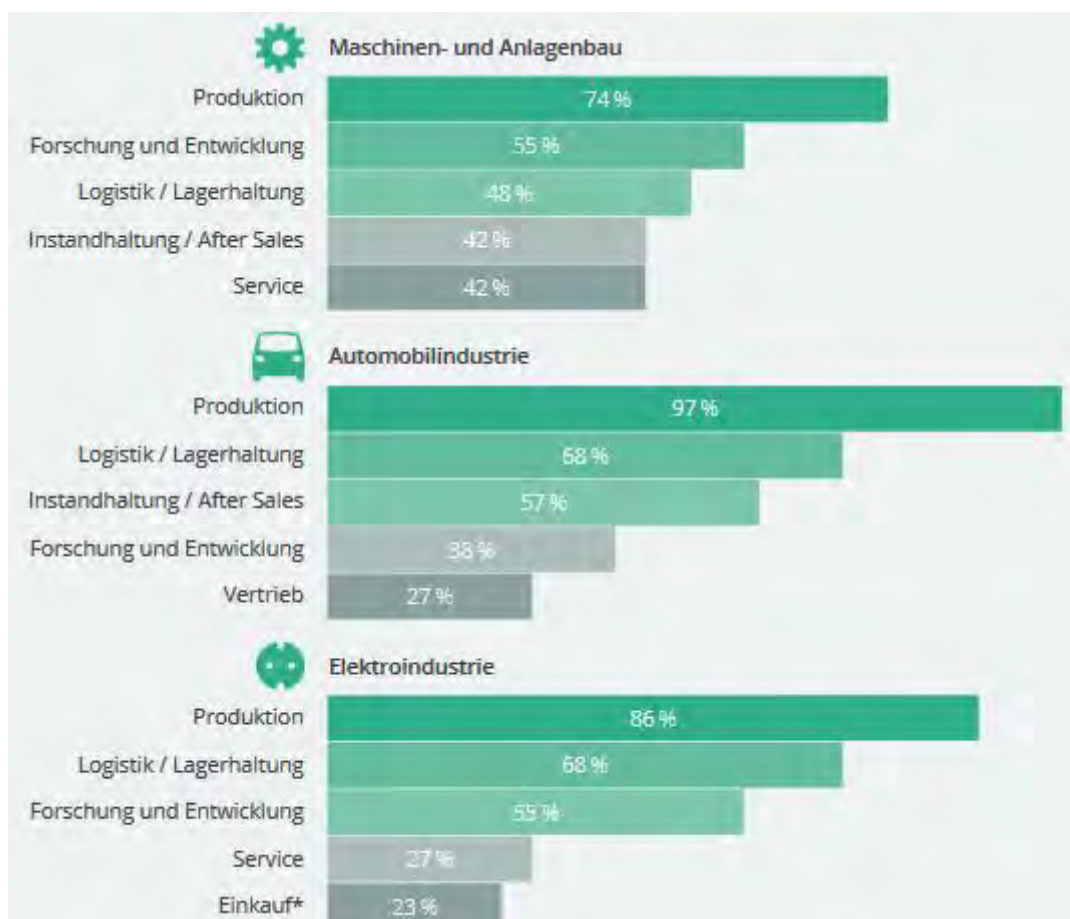


Abbildung 6: Unternehmensbereiche mit Planung bzw. Einsatz von I4.0-Konzepten [42]

⁹ STAUFEN (2017) S. 15ff

Die Fachbereiche „Produktion“ und der produktionsnahe Bereich „Logistik/ Lagerhaltung“ stehen im Fokus für eingeplante beziehungsweise zukünftige Projekte der Unternehmen. Diese Beobachtung erscheint insoweit plausibel, da diese Fachbereiche am meisten von Neuerungen und Verbesserungen durch eine digitale Transformation profitieren. Die Ausnahme im Maschinenbau, das die „Forschung und Entwicklung“ auf dem zweiten Platz liegt, ist darin begründet, dass diese Branche am stärksten unter einem Innovationsdruck steht, mit ihren „smarten“ Maschinen die Basis für die digitale Transformation in anderen Branchen zu legen.

Für diese Arbeit ebenfalls interessant ist die Befragung der Unternehmen hinsichtlich ihrer Motivation für die Umsetzung neuer Konzepte im Kontext der Industrie 4.0, siehe Abbildung 7.

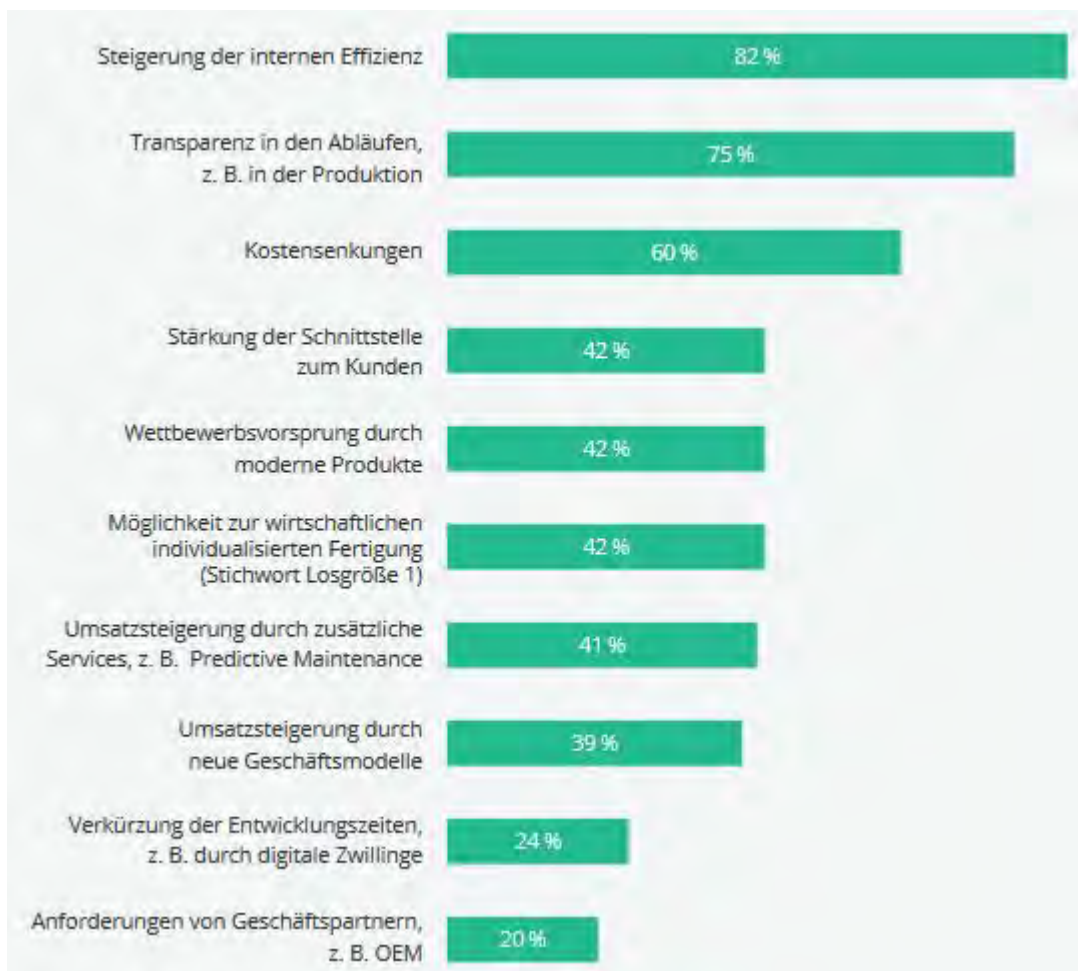


Abbildung 7: Motive der Unternehmen für Digitalisierungsmaßnahmen [42]

Die Umfrage sieht die klassischen produktionstechnischen Verbesserungspotenziale auf den vorderen Plätzen bei den Motiven der Unternehmen: Effizienzsteigerungen, transparente Abläufe und Kostensenkungen.

Jedoch haben auch andere, eher service-orientierte Aspekte einen hohen Stellenwert für die Firmen. Die Schaffung von Schnittstellen zu Kunden und Geschäftspartnern, individualisierte Losgrößenproduktion sowie neue Geschäftsmodelle und Services rücken in den Fokus der Unternehmen. Ein Paradigmenwechsel scheint also auch allmählich im Denken und Planen der Firmen einzusetzen und wird zukünftig Investitionskapital freisetzen.

Zusammenfassend lässt sich aus den zwei vorgestellten Studien die Gewissheit gewinnen, dass die Themen und Konzepte der Industrie 4.0 in der deutschen Wirtschaft wahrgenommen werden und ein Wandel bereits in ersten kleinen Schritten eingesetzt hat. Auch wenn sich die meisten Projekte noch in der Entwicklungs- beziehungsweise frühen Testphase befinden, so ist der Grundstein im Denken und Handeln hin zur digitalen Transformation gelegt.

Die Unternehmen suchen nach effizienten Automatisierungslösungen, ebenso wie nach Verbesserungen im Servicebereich, eine vorbeugende Instandhaltung, individualisierte Kundenlösungen und eine bessere Vernetzung der Schnittstellen zu Kunden und zu den Zulieferern.

Inwiefern für diese offenen Fragen bereits Lösungsansätze in der Forschung zu finden sind, wird in Kapitel 4 dieser Arbeit untersucht.

3. Methodik der Untersuchung

Dieses Kapitel erläutert die Vorüberlegungen und die Ausführungsweise der systematischen Analyse zum aktuellen Forschungsstand von Prozessmodellen im Kontext von I4.0. Durch den Einsatz von bibliometrischen Methoden und Konzepten des Literatur-Reviews versucht die Arbeit einen systematischen und reproduzierbaren Überblick zu dieser Thematik aufzuzeigen. Die Methoden des Literatur-Review dienen der Zusammenfassung eines Themengebietes, um bei der Identifikation und Beantwortung spezieller Forschungsfragen zu helfen [43].

Durch die Erarbeitung des Themengebietes mithilfe einer umfassenden eingehenden Untersuchung der Literatur im Vorfeld, können die für diese Arbeit relevanten Publikationen und Themenbereiche eingegrenzt werden. Aufgrund der Basis dieser Vorarbeit liefern die finalen Suchanfragen zur Beantwortung der Forschungsfragen qualitativ höherwertige und thematisch passende Dokumente als Ergebnisse.

Diese Ergebnisse müssen anschließend durch die Anwendung von zuvor dargelegten Aufnahme- und Ausschlusskriterien gefiltert werden, bevor sie inhaltlich klassifiziert und auf ihren Inhalt hin zur Beantwortung der Forschungsfragen überprüft werden.

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze und Methoden zur Erstellung eines Literatur-Reviews und der Anwendung bibliometrischer Konzepte. Die Methodik dieser Arbeit bedient sich verschiedener Konzepte und Ideen aus der Forschung und einigen Studien [43] [44] [45] [46] [47], um die angestrebte Analyse durchzuführen.

Die endgültige Vorgehensweise für die systematische Analyse von Prozessmodellen im Kontext der Industrie 4.0 besteht aus sechs Schritten:

- (1) Definieren mehrerer Forschungsfragen, um die Untersuchung aus verschiedenen Blickwinkeln durchzuführen
- (2) Auswahl von Aufnahme- und Ausschlusskriterien gefundener Literatur
- (3) Eingrenzung geeigneter Suchbegriffe
- (4) Konkretisierung der Suchanfragen für die jeweiligen Forschungsfragen
- (5) Bereinigung der Suchergebnisse anhand der festgelegten Kriterien
- (6) abschließende Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der Forschungsfragen

Die Schritte (1) bis (4) werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert und durchgeführt, wohingegen die letzten beiden Schritte (5) und (6) in Kapitel 4 umgesetzt werden.

3.1 Aufbau der Analyse und Forschungsfragen

Die Systematik der durchgeführten Untersuchung verfolgt das Ziel einer umfassenden Beleuchtung aktueller Forschungsergebnisse und -strömungen im Themenbereich der Geschäftsprozessmodellierung, vor dem Hintergrund der neuen Möglichkeiten mittels der Industrie 4.0. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die Analyse in mehrere Teilfragen zerlegt.

Die Aufteilung in mehrere separate Fragestellungen erlaubt die gezielte Fokussierung der Analyse auf eine bestimmte Facette des Forschungsziels. Die anschließende Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilfragen ermöglicht es, einen umfangreichen Überblick über den aktuellen Zustand zu geben.

Die Betrachtung der jährlichen Anzahl und Herkunft an Publikationen, eine Unterscheidung hinsichtlich der einzelnen Themengebiete der I4.0 sowie eine Überprüfung populärer Modellierungssprachen auf diesem Forschungsfeld wird durchgeführt und im Anschluss zusammenfassend ausgewertet.

Damit ergeben sich folgende Forschungsfragen dieser Arbeit:

F1: Welche Bedeutung haben Themen der Prozessmodellierung im Kontext von I4.0?

Durch die Beobachtung einer Zu- oder Abnahme der Anzahl an relevanten Veröffentlichungen kann ein Trend geschlussfolgert werden.

F2: Welche Industrien oder wissenschaftliche Themenbereiche sind Gegenstand oder Initiator der Forschung?

Eine Auswertung hinsichtlich der Industriebereiche und Forschungsfelder gibt möglicherweise Aufschluss über Problemfelder und Anwendungsszenarien von Prozessmodellierungsansätzen im Kontext von I4.0.

F3: In welchen Bereichen der I4.0 findet die Prozessmodellierung Anwendung?

Mit dieser Frage sollen die herausgearbeiteten Kernelemente der I4.0 hinsichtlich ihrer jeweiligen Nutzung und Bedürfnisse an Prozessmodellierungskonzepten untersucht werden.

F4: Welche Modellierungssprachen werden zu diesem Zweck am häufigsten genutzt?

Die Untersuchung kann Erkenntnisse über die Aussagekraft und mögliche Anwendungsszenarien einzelner Modellierungskonzepte liefern und dabei deren Verbesserungspotenziale benennen und einen Forschungsbedarf aufdecken.

Zur Beantwortung dieser Fragen werden Publikationen nach den in den folgenden Unterkapiteln erarbeiteten Kriterien und Anfragen ausgewählt und analysiert.

3.2 Auswahl der Aufnahme- und Ausschlusskriterien

Die Einbeziehung eines Dokuments in die Untersuchung basiert grundsätzlich auf der Überprüfung des Titels, dem Lesen der kurzen Inhaltsangabe (auch *Abstract* genannt) und der Kontrolle relevanter Stichworte (auch *keywords* genannt). Um den Umfang der Analyse zu reduzieren und ihre Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, werden folgende Aufnahme- und Ausschlusskriterien genutzt:

Aufnahmekriterien der Analyse sind, dass die Publikationen:

- einem Peer-Review in Zeitschriften und auf Konferenzen o.Ä. unterliegen
- elektronisch verfügbar und abrufbar sind
- im Titel, Abstract oder in den Stichworten eindeutige Bezüge für die Beantwortung der Forschungsfragen beinhalten
- im Zeitraum von 2014 bis Juni 2018 erschienen sind

Von der Analyse dieser Arbeit prinzipiell wurden Publikationen ausgeschlossen, die:

- vor 2014 und nach Juni 2018 erschienen sind
- nicht in englischer Sprache verfasst sind
- nur in Form von Präsentationen o. Ä. vorlagen

Zusätzlich kann eine manuelle Filterung der gefundenen Literatur hinsichtlich ihrer Relevanz für die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgen. Publikationen, die Prozessmodelle in einem anderen Kontext, wie den in dieser Arbeit definierten Bezugsrahmen einordnen, werden manuell aus der Untersuchung ausgeschlossen.

Insbesondere die Begrifflichkeiten im I4.0-Themenbereich verknüpfen oftmals „Prozessmodelle“ auf rein technisch-informatischer anstatt strukturell-konzeptioneller Ebene oder auch nicht im Kontext von Geschäftsprozessen, sondern im Kontext von reinen Programmierungsthemen.

Diese Recherche erfolgt im ersten Schritt durch die genaue Betrachtung des Titels, des *Abstract* und den Stichworten der gefundenen Publikation. Bei Zweifeln an der thematischen Eignung des Artikels wird der Inhalt, vor allem die Einleitung und die Schlussfolgerung, untersucht und anschließend über die Aufnahme entschieden.

3.3 Eingrenzung der Thematik und verwendete Suchanfragen

Für diese Arbeit wurde die *Thomson Reuter's Web of Science*-Datenbank als Datengrundlage ausgewählt. Die *Web of Science Core Collection* umfasst mehr als 20 000 wissenschaftliche Journale und mehr als eine Milliarde zitierte Referenzen¹⁰. Mit Hilfe des lizenzierten Zugangs zur Datensammlung durch die Universität Ulm ermöglicht dies eine umfangreiche Untersuchung der Forschungsfragen.

Um sich mit dem Themengebiet vertraut zu machen, wurden zunächst offen gehaltene Suchanfragen in *Web of Science* verfasst. Die Auswahl der anfänglichen Suchkriterien basierte dabei auf den theoretischen Grundlagen der Ausarbeitungen in Kapitel 2.

Der Zeitraum für die Analyse wurde auf Veröffentlichungen aus dem Jahr 2014 bis zum Juni 2018 beschränkt.¹¹ Diese Einschränkung wird vorgenommen, um Neuerscheinungen und möglichst aktuelle Fortschritte auf dem Forschungsgebiet der Prozessmodellierung und vor dem Hintergrund der Industrie 4.0 festzustellen.

Basierend auf diesem Anspruch wurden zwei thematische Blöcke als Untersuchungsgegenstände identifiziert.

Zum einen umfasst die **Thematik der Prozessmodellierung** die in Kapitel 2.1 gegebene Definition von einem Prozess und seiner Modellierung. Im Rahmen dieser Analyse werden Prozesse und Prozessmodelle somit im Kontext von Geschäftsprozessen der I4.0 und deren Visualisierungsmöglichkeiten untersucht. Hierzu wurden die, durch die vorher durchgeführte Sondierung der Literatur aufgedeckten Begrifflichkeiten der Tabelle 2, genutzt.

¹⁰ Siehe <https://clarivate.com/products/web-of-science/web-science-form/web-science-core-collection/> (Zugriff am 10. 09. 2018)

¹¹ Die Datenbankabfrage erfolgte im Juli 2018. Spätere Publikationen wurden nicht berücksichtigt.

Prozessmodellierung	Modellierungssprachen
business process	EPK bzw. Event-driven process chain und EPC
business process modeling	Business Process Model and Notation und BPMN
process modeling	UML und Unified-Modeling- Language
Im erweiterten Stichwort-Pool mit seperater Betrachtung	
business process management	Petri-Netz bzw. Petri net und Coloured Petri net
	Systems Modeling Language und SysML

Tabelle 2: Begriffe der Prozessmodellierung

Neben den allgemeinen Termen wurden auch spezielle Verfahren der Modellierung als separate Anfragebegriffe erkannt, da anwendungsorientierte Veröffentlichungen oftmals den spezifischen Sprachennamen anstelle der allgemeinen Bezeichnung als Stichwort verwenden. Insbesondere die weitverbreiteten Sprachen BPMN 2.0 und UML und deren Abwandlungen und Erweiterungen sind Gegenstand der Hauptuntersuchung. Im erweiterten Bereich befinden sich die Terme, die eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich ihrer Aussagekraft zur Beantwortung der Forschungsfragen erfordern. Die Suche auf dem Themengebiet des *business process management* liefert nur eingeschränkt relevante Ergebnisse. Die Literatur auf dem Gebiet befasst sich häufig mit sehr theoretischen Arbeiten und Studien, deren Aussagekraft und konstruktive Beiträge für die Forschungsfragen im Einzelfall herauszufinden sind.

Die zweite übergreifende Thematik sind die in Tabelle 3 abgebildeten **Themengebiete der Industrie 4.0** in der Forschungsliteratur. Wie in Kapitel 2.2 dieser Arbeit dargestellt, umfasst die Begrifflichkeit I4.0 mehrere verschiedene Konzepte und hat in der Literatur, je nach Region oder Forschergruppe, unterschiedliche Bezeichnungen.

Allgemeine Begriffe	Kernelemente
Industry 4.0	Cyber-Physical Systems und CPS
smart manufacturing	Internet of Things und IoT
smart factory	Internet of Services und IoS
Im erweiterten Stichwort-Pool mit seperater Betrachtung	
intelligent factory	Cloud-computing
intelligent manufacturing	CPPS
factory-of-the-future	Big Data

Tabelle 3: Begriffe der Industrie 4.0

Den Kern bilden die drei allgemeinen Terme, die das übergreifende Konzept der Industrie 4.0 sowohl im europäischen als auch außer-europäischen Forschungsraum beschreiben. Zusätzlich werden aus den Grundelementen des I4.0 Konzeptes drei weitere Suchfelder mit aufgenommen. Somit wird eine größtmögliche Abdeckung des Themengebietes erreicht und die Aussagekraft der systematischen Analyse verstärkt.

Im erweiterten Bereich wurden Begrifflichkeiten aufgelistet, die entweder nur sehr selten als Stichworte in der Literatur verknüpft sind, zum Beispiel *intelligent factory*, oder die Begriffe, welche bei der Voruntersuchung zum Themengebiet der I4.0 eher technisch-basierte anstatt konzeptionell-orientierte Artikel aufgedeckt haben.

Zur Zusammenführung der Tabellen 2 und 3 in eine Suchanfrage, die vom *Web of Science* korrekt verarbeitet werden kann, wurden die booleschen Operatoren AND und OR verwendet. Die Anfrage „A“ bildet das herausgearbeitete Verständnis der Prozessmodellierung im Kontext von Industrie 4.0 dieser Arbeit ab und ist die Grundlage der systematischen Analyse in Kapitel 4.

Suchanfrage A:

„*business process*“ OR „*process model*“ OR „*BPM*“ OR „*UML*“

AND

„*Industry 4.0*“ OR „*smart manufactur*“ OR „*smart factor*“ OR „*Internet of things*“ OR „*IoT*“ OR „*Internet of service*“ OR „*IoS*“ OR „*Cyber-physical system*“ OR „*CPS*“

Beschränkt durch die Syntax ist eine weitere Einschränkung der Ebenen der Suchanfrage nicht möglich. Das „*“ erlaubt in der Anfrage alle Worte mit den vorausgehenden Buchstaben als Wortanfang. Somit deckt der Suchterm „*business process*“ neben dem Plural auch alle Ergebnisse der Suche zu den Termen *business process* und *business process modeling* und *business process management* ab.

Die gleiche Vereinfachung ermöglicht der Suchbegriff „*BPM*“, er liefert alle Suchanfragen zur BPMN als auch für die in der Literatur inkonsistent verwendeten verkürzten Terme für *business process model/modeling* und *business process management*. Durch diese Syntax kann die Thematik der Prozessmodellierung sehr knapp in die Anfrage eingebunden werden.

Jedoch erfordert der zweite Teil der Analyse die Verwendung mehrerer Terme, um eine umfassende Suche in den wichtigsten Themengebieten, die der I4.0 zuzurechnen sind, zu gewährleisten. Eine differenzierte Betrachtung, die Einordnung und ggf. die Aussortierung der Suchergebnisse wurden anschließend manuell vorgenommen.

Vor allem die durch den „*process model*“-Term bedingten Ergebnisse müssen überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie mit dem Prozessmodellverständnis dieser Arbeit übereinstimmen. Die bereinigten Ergebnisse der Anfrage A werden die Basis für die Beantwortung aller Forschungsfragen bilden, vorrangig aber für F1 und F2. Um die anderen Forschungsfragen hinsichtlich der einzelnen Themengebiete der I4.0 und den verwendeten Modellierungssprachen zu beantworten, werden leicht modifizierte Anfragen gestellt.

Die „B“-Suchanfragen dienen der Erörterung der Forschungsfrage F3, die die Publikationen über Prozessmodellierungskonzepte mit den Themenbereichen und Kernelementen der I4.0 in Verbindung setzt.

Dabei fließen Duplikate, die durch mehrere der Einzelanfragen gefunden werden, im Rahmen der jeweiligen Einzelanfragen mit in die Bewertung ein. Viele Publikationen nennen häufig die

Überbegriffe wie *smart manufacturing* bei der Betrachtung der Kernelemente und werden deshalb, nach Prüfung ihres qualitativen Inhalts, der Vollständigkeit halber mehrfach in der Analyse berücksichtigt.

Die Anfrage B1 definiert den Einstieg in die Beantwortung der Forschungsfrage F3. Aus den Erkenntnissen der Voruntersuchung abgeleitet, haben die Ergebnisse vermutlich einen Übersichtscharakter, sind Studien oder Reviews und decken verschiedene Gebiete der I4.0-Thematik ab.

Suchanfrage B1:

„*business process*“ OR „*process model*“ OR „*BPM*“ OR „*UML*“

AND

„*Industry 4.0*“ OR „*smart manufactur*“ OR „*smart factor*“

Die Anfragen B2, B3 und B4 beantworten die Forschungsfrage aus der jeweiligen Sicht eines der Kernelemente: IoT, IoS und CPS. Die Ergebnisse dieser Anfragen sind Bestandteil der Ergebnismenge der Suchanfrage A, aber aufgesplittet nach den zu untersuchenden Bestandteilen der Industrie 4.0. Bei der Auswahl der Terme wurden spezielle Anwendungen und konkrete Ausprägungen der Themen ausgelassen, beispielsweise *Big Data* im Bereich des *Internet-of-Things*. Bei der Voruntersuchung ergaben diese Anfragen, die diese Art von speziellen Termen enthielten, eine zu große Anzahl an Dokumenten, die nicht den Aufnahmekriterien entsprechen.

Suchanfrage B2:

„*business process*“ OR „*process model*“ OR „*BPM*“ OR „*UML*“

AND

„*IoT*“ OR „*Internet of thing*“

Insbesondere die Verwendung des Suchterms „*process model*“ vergrößert den Bereich möglicher Publikationen, mit der Folge, dass viele gefundenen Veröffentlichungen nach manueller inhaltlicher Untersuchung von der Analyse ausgeschlossen werden. Der Suchterm ist jedoch aufgrund seiner Universalität ein wichtiger Bestandteil der Anfrage, um Prozessmodellkonzepte im Sinn der Arbeit zu entdecken, die nicht mit „*business*“ deklariert wurden.

Suchanfrage B3:

„*business process*“ OR „*process model*“ OR „*BPM*“ OR „*UML*“

AND

„*Internet of service*“ OR „*IoS*“

Abschließend wird die vierte Forschungsfrage, F4, durch die Ergebnisse dreier weiterer Suchanfragen (C1-C3) beleuchtet. Die Aufteilung der Suchanfrage A auf mehrere Einzelanfragen unterliegt der gleichen Logik, wie bei den „B“-Anfragen. Diese Aufteilung soll einen Hinweis

über die Häufigkeit und daraus schlussfolgernd die Popularität der Modellierungssprachen geben.

Des Weiteren können die Sprachkonzepte hinsichtlich ihrer Eignung und Aussagekraft bezüglich der verschiedenen I4.0 -Aspekte untersucht werden. Es ist zu erwarten, dass bestimmte Sprachen und ihre Modifizierungen sich zur Darstellung gewisser Teilprozesse besser eignen beziehungsweise Erweiterungen zu den bestehenden Sprachen erforscht werden, um die Anforderungen der Industrie 4.0 zu bewältigen.

Suchanfrage B4:

„business process“ OR „process model“ OR „BPM“ OR „UML“

AND

„cyber-physical system“ OR „CPS“

Durch die beiden Terme *„BPM“* und *„UML“* sollen aktuelle Forschungsströmungen zu Erweiterungen und Anpassungen der beiden weitverbreiteten Prozessmodellierungssprachen BPMN und UML erkannt werden. Es wird aufgrund der Popularität und Vielseitigkeit erwartet, dass diese beiden Konzepte im Fokus der zu untersuchenden Forschung stehen.

Eine Verwendung von Termen, die die Forschungsergebnisse zum Themengebiet der EPK aufdecken sollten, hat sich in der Voruntersuchung als nicht zielführend erwiesen und wurde deshalb nicht in den Suchanfragen berücksichtigt.¹²

Die separate Abfrage der beiden allgemeinen Terme *„business process“* und *„process model“* ermöglicht auch die Aufdeckung anderer Prozessmodellierungskonzepte, die, nach Überprüfung ihrer Eignung, von Relevanz zur umfassenden Beantwortung der Forschungsfrage sind.

Suchanfrage C1-C3:

„Industry 4.0“ OR „smart manufactur“ OR „smart factor“ OR „Internet of things“ OR „IoT“ OR „Internet of service“ OR „IoS“ OR „Cyber-physical system“ OR „CPS“

AND

(C1) *„business process“ OR „process model“*

(C2) *„BPM“*

(C3) *„UML“*

¹² Sowohl „EPK“ als auch „Event-driven process chain“ lieferten keine Ergebnisse. Der Term „EPC“ steht in Verbindung mit den Themen des IoT und der CPS für den *Electronic Product Code*. Bis auf eine einzige Publikation hatten alle der 133 anderen Suchergebnisse des Terms „EPC“ somit keine ereignisgesteuerten Prozessketten zum Thema.

4. Aktueller Forschungsstand von Prozessmodellen im Kontext von Industrie 4.0

Dieses Kapitel präsentiert die Ergebnisse der Suchanfragen aus Kapitel 3.3 und versucht die Thematik der Prozessmodellierung in Verbindung mit den Möglichkeiten der vierten industriellen Revolution zu ergründen. Die Erkenntnisse der Untersuchungsergebnisse dienen dieser Arbeit als Grundlage zur bestmöglichen Beantwortung der Forschungsfragen und zur späteren Diskussion.

Aus diesem Grund wurden die gefundenen Publikationen im ersten Schritt anhand der in Kapitel 3.2 definierten Kriterien auf ihre Zulässigkeit zur Analyse geprüft. Die übergeordnete Suchanfrage A lieferte 323 potenziell-relevante Publikationen im Zeitraum von 2014 bis 2018. Die Anwendung der Aufnahme- und Ausschlusskriterien erfolgte in mehreren Teilschritten.

Durch die zeitliche Beschränkung des Untersuchungszeitraumes wurden sechs Dokumente aus dem Jahr 2018 von der Analyse ausgeschlossen.¹³ Zwei Publikationen wurden aufgrund der Tatsache, dass sie nur in nicht-englischen Sprachen vorlagen, aus der Ergebnismenge entfernt. Zudem entsprachen 11 Suchergebnisse nicht den festgelegten formalen Kriterien und wurden deshalb nicht in den weiteren Analysen berücksichtigt.¹⁴

Durch fehlende oder unzureichende Lizenzen der Universität Ulm mussten 64 Suchergebnisse aus Gründen der Verfügbarkeit von der Kriterienprüfung als auch der späteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Insbesondere vermeintlich thematisch-relevante Veröffentlichungen, wie *Domingos et al.* [48] oder *Saraeian et al.* [49], fehlen somit in der Analyse.

Dokumente und Publikationen, die den allgemeinen Kriterien entsprachen, wurden abschließend hinsichtlich ihrer thematischen Eignung zur Beantwortung der Forschungsfragen geprüft. Neben der anfänglichen Untersuchung des Titels, der *Keywords* und des *Abstract*, gab es eine oberflächliche Prüfung der Einleitung und des Schlussteils der Publikation, sowie ggf. eine Überprüfung des gesamten Volltextes. Durch dieses Vorgehen konnten Veröffentlichungen, die thematisch absolut unstimmig waren, zum Beispiel Dokumente über Prozessmodelle in der Physik, schnell identifiziert und ausgeschlossen werden.

Gleiches gilt für Suchergebnisse, die thematisch die Erstellung von allgemeinen Referenzarchitekturen im Kontext der Bestandteile der I4.0 vorstellen oder Prozessmodelle in einem anderen Sinn nutzen und durch die weitgefasste Bedeutung des Suchterms „*process model*“ entdeckt worden sind.¹⁵ Ferner wurden Publikationen aussortiert, welche sich mit der IT-seitigen Implementierung von Geschäftsprozessen befassen.¹⁶

Insgesamt wurden 181 Suchergebnisse aufgrund ihrer fehlenden oder unpassenden thematischen Eignung aus dem Datensatz an Dokumenten entfernt.

¹³ Dabei vermeintlich interessante Veröffentlichungen: [110] und [111]

¹⁴ Dabei vermeintlich interessante Publikation: [117]

¹⁵ Beispielsweise Modelle, als Abbildung IT-seitiger Systemabläufe einer Produktionskette

¹⁶ Beispielsweise Publikationen wie [112] oder [113]

Alles in allem wurden 264 der anfänglichen 323 gefundenen Suchergebnisse von den Analysen dieser Arbeit ausgeschlossen. Die verbliebenen 59 Publikationen bilden den Datensatz zur Erörterung des aktuellen Forschungsstandes von Prozessmodellen im Kontext der Industrie 4.0 in den folgenden Unterkapiteln.

4.1 Analyse des zeitlichen Verlaufs und der beteiligten Forschungsländer

Die erste Forschungsfrage (F1) hat als Zielstellung, die Bedeutung der Themen der Prozessmodellierung im Kontext von Industrie 4.0 zu erörtern. Zu diesem Zweck werden sowohl die Anzahl der veröffentlichten Publikationen über den Untersuchungszeitraum als auch die Länder beziehungsweise Regionen, aus denen sie stammen, analysiert. Die Prämisse bei der Wahl dieser beiden Untersuchungsdimensionen ist die Annahme, dass die Publikationshäufigkeit und deren relatives jährliches Wachstum die Aktualität und Bedeutsamkeit der Prozessmodellierung in den Themen der I4.0 zum Ausdruck bringt. Eine anschließende Betrachtung der Herkunftsregionen der Veröffentlichungen gewährt Erkenntnisse über die regionalen Unterschiede und Forschungsschwerpunkte.

Die anteilige Aufteilung der Anzahl der Publikationen der vergangenen vier Jahre ist in Abbildung 8 dargestellt. Dabei ist für das Jahr 2018 zu berücksichtigen, dass nur Veröffentlichungen des ersten Halbjahres in die Bewertung einfließen konnten.

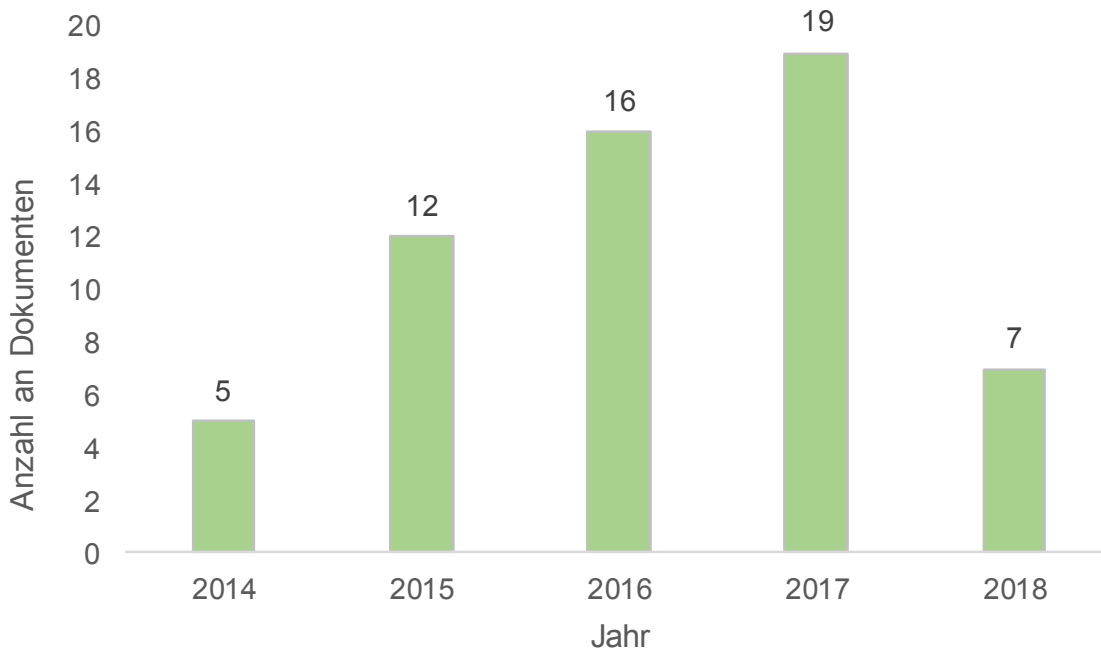


Abbildung 8: Jährliche Anzahl an Veröffentlichungen von 2014 bis Juni 2018

Die Auswertung zeigt einen deutlich positiven Anstieg in der Publikationshäufigkeit über die letzten Jahre. Wurden im Jahr 2014 nur fünf Dokumente mit relevanten Inhalten publiziert, kam es bis zum Jahr 2017 fast zu einer Vervielfachung auf 19 themenbezogene Veröffentlichungen. Diese Beobachtung lässt die Schlussfolgerung zu, dass Prozessmodellierungskonzepte im Zusammenhang mit den Themen der I4.0 an Bedeutung gewonnen haben. Ferner verspricht der anhaltende Trend einen weiteren Zuwachs für die Zukunft und begründet die wichtige Rolle der Prozessmodellierung auf der Suche nach Lösungsvorschlägen für die Herausforderungen der I4.0.

Die Analyse der Länderzugehörigkeit der beteiligten Forscher und Forschergruppen identifiziert 30 unterschiedliche Nationen, die Forschung auf den relevanten Gebieten betreiben (siehe Abbildung 9).

Spitzenreiter unter den Publizisten und Miterstellern der Dokumente sind Forscher aus Deutschland (17), gefolgt von Frankreich (11) und Portugal und Tunesien (je 5). Insbesondere der europäische Forschungsraum nimmt die Führungsposition in den relevanten Themengebieten ein. Europäische Forscher waren an der Erstellung von 36 der 59 betrachteten Publikationen beteiligt. Außerhalb Europas sind Forscher aus den Ländern der USA und Kanada (5), Tunesien (5) und den Ländern des asiatischen Raumes (10), wie China (4), Südkorea (2) und Pakistan (2), an der Forschung und Weiterentwicklung von Konzepten auf diesen Themengebieten beteiligt.

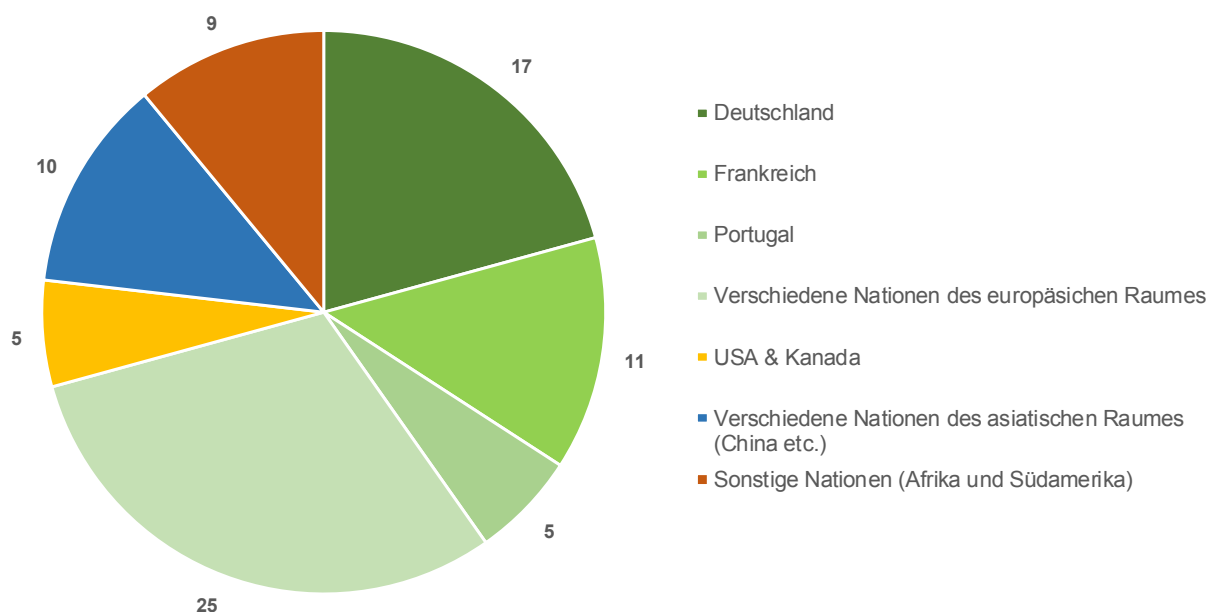


Abbildung 9: Übersicht der beteiligten Forschungsnationen

Die Dominanz europäischer Forscher kann darin begründet sein, dass die Industrie 4.0 ihren gedanklichen Ursprung in Europa hat. Demzufolge haben europäische Forschungseinrichtungen seit längerem Fördermittel und Zuschüsse aus der Politik und Industrie erhalten und somit ihre Kompetenzen ausgebaut. Nichtsdestotrotz belegen die Ergebnisse, dass die Thematik ein globales Bewusstsein und weltweite Aufmerksamkeit in der Forschung hervorruft.

Zusammenfassend belegen die Erkenntnisse aus der Forschungsfrage F1 die steigende Relevanz der Forschung an Prozessmodellierungskonzepten im Kontext der I4.0 und ihren verwandten Themen. Bei Betrachtung der positiven Entwicklung der letzten Jahre ist eine weitere Zunahme an Forschungsprojekten und relevanter Veröffentlichungen anzunehmen.

4.2 Analyse der Forschungsgebiete und Industriebranchen

Mit der zweiten Forschungsfrage (F2) sollen bestimmte Forschungsfelder und Themenschwerpunkte in den Arbeiten identifiziert werden. Mit der Einordnung der Dokumente des Datensatzes können Erkenntnisse bezüglich des allgemeinen Forschungsstandes gewonnen werden, das heißt ein Überblick über die Vorgehensweise und Präsentation der bisherigen Forschung.

Aufgrund der Tatsache, dass für die Suche und die Auswahl relevanter Publikationen die wissenschaftliche *Web-of-Science* Datenbank genutzt wurde, beinhaltet der Datensatz keine expliziten Präsentationen oder veröffentlichte Konzeptvorstellungen von Industrieunternehmen. Die wissenschaftlichen Publikationen beschreiben vielmehr verallgemeinerbare Konzepte und vielseitig anwendbare Methoden. Eine direkte Betrachtung der Industriebranchen ist deshalb schwierig. Jedoch erlaubt die Betrachtung der Forschungsgebiete eine Aussage über die Forschungsschwerpunkte und damit indirekt über spätere Anwendungsgebiete.

Die Einordnung der Dokumente in eine oder mehrere Forschungsgebiete erfolgte auf Grundlage der wissenschaftlichen Disziplinen der Fachzeitschriften, in denen sie veröffentlicht wurden. Mehrfachzählungen waren bei der Analyse nicht ausgeschlossen. Da das Themenspektrum der I4.0 ebenfalls mehrere Facetten und Ausprägungen hat, kann der Forschungsbeitrag einer Arbeit auch Relevanz auf verschiedenen Gebieten besitzen.¹⁷

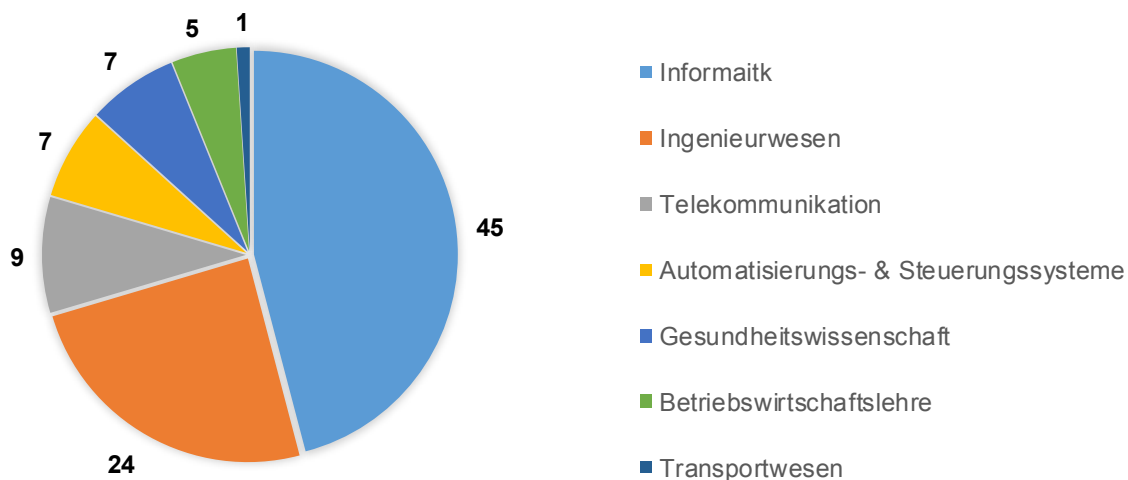


Abbildung 10: Übersicht der Forschungsgebiete

Dies entspricht der Erwartungshaltung, dass ein digitaler Paradigmenwechsel, ausgehend von Forschungsbemühungen auf dem Gebiet der Informatik, eingeleitet und forciert werden muss. Der Einsatz neuer Technologien verlangt eine informationstechnische Einbettung in bestehende Systeme beziehungsweise deren Neustrukturierung.

Betrachtet man die weiteren Forschungsgebiete, so finden sich auf den folgenden Plätzen Veröffentlichungen aus den industrienahen Forschungsgebieten des Ingenieurwesens, der Telekommunikation sowie der Automatisierungs- und Steuerungssysteme.

Diese Bereiche decken sich mit den Unternehmensbereichen aus Kapitel 2.2.3, in denen die befragten Industrieunternehmen den zukünftigen Einsatz von I4.0-Konzepten planen. Automatisierungskonzepte in der Produktion [50], sowie die Verknüpfung und Einbindung von IoT-Komponenten in die Geschäftsprozessmodellierung, beispielsweise in [51] oder [52], sind häufig auftretende Gegenstände bei den Untersuchungen.

Die durchgeführte Suchanfrage deckt zudem mehrere thematisch-relevante Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Gesundheitswissenschaften auf.

Die Forschungsbemühungen dieses Feldes umfassen zum einen die Darstellungsmöglichkeiten von Prozessabläufen in Gesundheitseinrichtungen [53], zum anderen aber auch die realisierbaren Verbesserungspotenziale durch den Einsatz von I4.0-Elementen in der Prozessmodellierung. Denkbare Anwendungsszenarien finden sich beispielsweise bei der Überwachung und Analyse von Infektionen durch Krankenhauskeime [54] oder bei der Koordination aller an der Behandlung beteiligter Ärzte und Fachangestellten [55].

Die Forschungen über die Darstellungsmöglichkeiten von Prozessmodellen in Verbindung mit IoT-Elementen bieten auch für die Implementierung in produktionstechnischen Bereichen von Industrieunternehmen relevante Erkenntnisse und werden deshalb in den nächsten Unterkapiteln beleuchtet.

Neben der thematischen Einordnung kann eine Typisierung hinsichtlich des formalen Aufbaus und Art des Forschungsbeitrages vorgenommen werden. Diese Gliederung ermöglicht einen fachübergreifenden Überblick über die qualitative Struktur des Datensatzes. In diesem Zusammenhang wurde eine Auswertung der Dokumente hinsichtlich ihres formalen Charakters vorgenommen.

Dabei wurden, in Anlehnung an [56], drei Typen unterschieden (siehe Abbildung 11):

- **Analysen:** Die Dokumente liefern keine neuen konstruktiven Erkenntnisse. Sie besitzen einen Übersichtscharakter und dienen eher der Zusammenfassung eines Themengebietes, wie in [57].
- **Konzepte:** Die Veröffentlichungen schlagen neue Denkweisen, Metamodelle, Modellsprachen oder Klassifikationsschemata vor, wie in [58]
- **Methoden:** Die Publikationen erklären konkrete Lösungsansätze mit bestehenden und ggf. erweiterten Methoden, wie in [59].

Von den 59 Dokumenten des Datensatzes wurden 16 als der Kategorie „Konzepte“ zugeordnet, 5 dem Bereich der „Analysen“ und 38 der Kategorie der „Methoden“.

Insgesamt dominieren die Veröffentlichungen, die aktuelle Herausforderungen und neue Möglichkeiten im Kontext der I4.0 durch die Anwendung und Modifizierung etablierter Prozessmodellierungskonzepte erforschen.

Diese Beobachtung bekräftigt die Annahme, dass auf dem Themengebiet der Prozessmodellierung bereits relevante Lösungsansätze für Problemstellungen des digitalen Wandels erarbeitet werden.

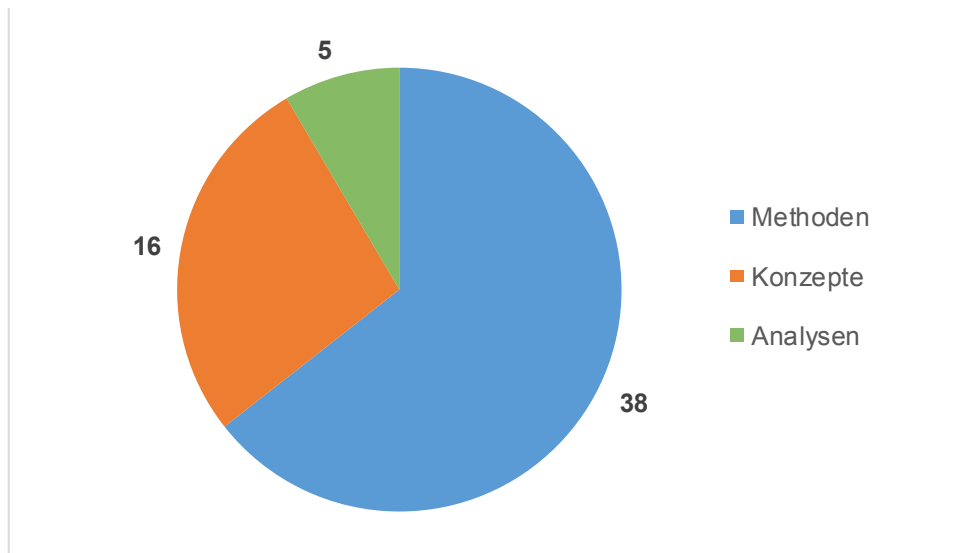


Abbildung 11: Einteilung der Publikationen hinsichtlich ihres Forschungsbeitrages

Erweitert man die Klassifizierung der Dokumente auf die Betrachtung der Art und Weise ihres Forschungsbeitrages, stellen über 64% der Publikationen spezielle Anwendungsszenarien oder konkrete Lösungsvorschläge im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 vor.

Diese Tatsache beweist die praktische Relevanz und die Vielfalt an Möglichkeiten für den Einsatz von Prozessmodellen. Merklich kleinere Teilmengen des Datensatzes evaluieren Möglichkeiten verschiedener Prinzipien und Methoden (20%), beispielsweise in [60], oder beschreiben Visionen und Forschungsagenden (16%), beispielsweise in [61] und [62].

Eine abschließende Untersuchung hinsichtlich explizit genannter Auswirkungen und Erwartungshaltungen bei Anwendung der erforschten Modelle identifiziert drei Hauptziele:

- Kostenreduzierung durch verbesserte Abläufe, leichtere Prozessimplementierungen und Optimierungen durch erweitertes *Process-Mining*¹⁸
- Zeitersparnisse in der Anwendung durch adaptive Systeme und bei der Prozessmodellerstellung und -anpassung
- Steigerung des Verständnisses über die Prozessabläufe im Unternehmen und bei der Konzipierung einer „smarten“ Produktion im Kontext der I4.0

Diese Zielstellungen in der Forschung stimmen mit den Bedürfnissen und Zielen der Industrieunternehmen, wie in Kapitel 2.2.3 ausgeführt, überein.

Der Ergebnisse der Untersuchung bezüglich der zweiten Forschungsfrage zeichnen das Bild einer multidisziplinären und methoden-orientierten Erforschung von Prozessmodellen im

¹⁸ Siehe [114] über Definitionen und Methoden des Process-Mining

Kontext der I4.0. Die technologischen Innovationen und die damit vorstellbaren Verbesserungspotenziale sind nicht nur Gegenstand produktionstechnisch naher Forschungsgebiete, die sich mit dem Aufbau von CPS in der Fertigung und der Integrierung von IoT-Elementen im Industrieunternehmen befassen. Die informationstechnischen Optionen bieten auch bei der Erstellung, Verwendung und Monitoring von Prozessmodellen im Allgemeinen vielseitige Szenarien. Die untersuchten Publikationen konzentrieren sich in diesem Zusammenhang auf die aktuellen Möglichkeiten durch Prozessmodellierungskonzepte und die Beschreibung notwendiger Änderungen und Erweiterungen und testen diese oftmals an konkreten Anwendungsbeispielen.

Durch die Modifizierung und Neukonzipierung von Modellierungssprachen werden Lösungsansätze für die Herausforderungen der vierten industriellen Revolution angeboten, welche im Unterkapitel 4.3 analysiert werden.

4.3 Analyse der I4.0-Themengebiete

Die dritte Forschungsfrage (F3) dient der Untersuchung, inwiefern die Beiträge der gefundenen Publikationen den verschiedenen Kernelementen der I4.0 zuzuordnen sind. Insbesondere die Gründe für die Verwendung eines Konzeptes der Prozessmodellierung sowie die angebotenen Lösungsideen zur Bewältigung der Problemstellungen werden genauer betrachtet.

Die in Kapitel 2.2.2 herausgearbeiteten Basiselemente bildeten das Grundgerüst dieser Analyse: *Smart Manufacturing/ Smart Factory*, die cyber-physischen Systeme, das *Internet-of-Things* und das *Internet-of-Services*. Die Dokumente wurden hinsichtlich ihres Beitrages zu einem oder mehreren der jeweiligen Bestandteile eingeordnet. Da sich die Themengebiete der vierten industriellen Revolution aus vielen verschiedenen Teilbereichen zusammensetzen, die jedoch zusammen interagieren oder einander bedingen, können die vorgestellten Prozessmodellierungskonzepte Lösungen für Herausforderungen mehrerer Basiselemente der I4.0 beisteuern. Das Forschungsziel vieler Publikationen, einen verallgemeinerbaren Lösungsansatz für eine Problemstellung aufzuzeigen, unterstützt dies zusätzlich.

Die Einordnung lässt eine fast gleichmäßige Verteilung des Datensatzes über die Themenbereiche der Kernelemente erkennen (siehe Abbildung 12). Die thematischen Anknüpfungspunkte zwischen den Teilbereichen erlauben unter Umständen die gleichzeitige Beantwortung mehrere Problemfelder, was für weitere Forschungsanstrengungen und für deren erwartbaren Nutzen spricht. Der Fakt, dass der Bereich der IoS scheinbar unterrepräsentiert ist, wird im späteren Verlauf dieses Kapitels erörtert.

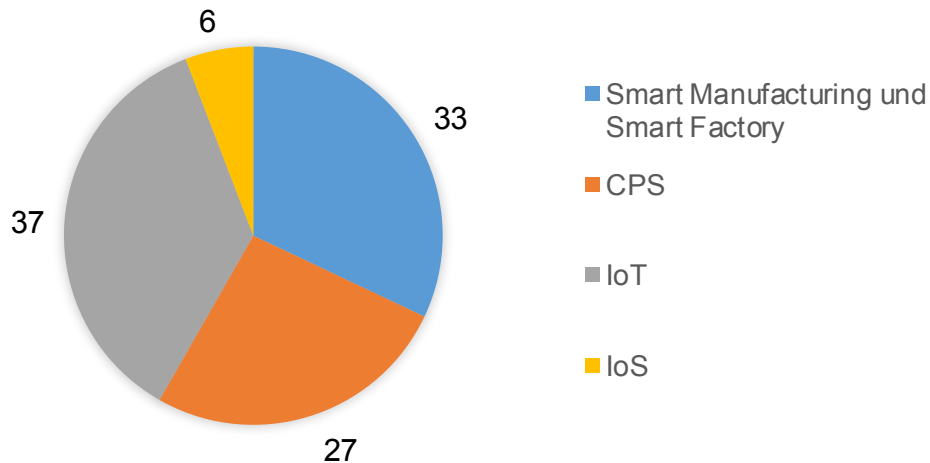


Abbildung 12: Übersicht der Basiselemente der I4.0

Smart Manufacturing und Smart Factory

Viele Publikationen nehmen direkten Bezug zu den jeweiligen Kernelemente der I4.0, auf deren Herausforderungen und mögliche Lösungsideen. Nur wenige Publikationen thematisieren explizit den allgemeinen Bereich des *Smart Manufacturing* und der *Smart Factory*.

In den Ausführungen von *Petrasch und Hentschke* [63] wird das Zusammenspiel aller Basiselemente als essentielle Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung von I4.0-Anwendungen und im Lebenszyklus von Geschäftsprozessmodellen identifiziert. Sie fordern ein Modellierungskonzept, welches Prozessdarstellungen unter Berücksichtigung von Aspekten der Sicherheit, Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Verständlichkeit ermöglicht. Aus diesem Grund entwerfen die beiden Autoren eine neue Modellierungssprache, welche versucht den Ansprüchen gerecht zu werden, ohne dabei zu viele technische Details auf Kosten der Verständlichkeit darstellen zu müssen.

Dem hinzufügend thematisieren die Arbeiten von *Suri et al.* [50] [64] die Bedeutung einer anpassungsfähigen und standardisierten Verhaltensmodellierung in der gesamten unternehmerischen Prozessumgebung.

Zum einen beschreiben sie ein Konzept zur unternehmensinternen Integration und Kommunikation von Prozessabläufen entlang der vollständigen Wertschöpfungskette [64]. Mit einer nachvollziehbaren Vorgehensweise bei der Prozessmodellierung soll ein besseres Informationsmanagement zwischen allen organisatorischen Ebenen einer *Smart Factory* erreicht werden. Sie empfehlen dabei ein Modellierungskonzept, ähnlich dem der UML, welches neben der grafischen Darstellung auch die einfache Verknüpfung mit Softwareanwendungen zur Ausführung und Anpassung der Vorgänge bietet.

Zum anderen erarbeiten die Forscher ein modellbasiertes Vorgehen zur Darstellung und Kommunikation von Geschäftsstrategien und den damit verbundenen operativen Geschäftsprozessen im Umfeld des *Smart Manufacturing* [50]. Der entworfene Bezugsrahmen dient der Realisierung von Geschäftszielen und deren kontrollierbare Umsetzung auf allen Ebenen der Organisation. Durch die Visualisierungsmöglichkeiten von Prozessmodellierungskonzepten

sollen Kosteneinsparungspotenziale in den Abläufen frühzeitig erkannt und Zielstellungen bis zur untersten Produktionsebene effizient vermittelt und umgesetzt werden.

Um diese geforderte hohe Flexibilität im Fertigungsprozess abzubilden, müssen die eingesetzten Prozessmodelle in der Lage sein, dynamische Vorgänge zeitnah in das Modell zu integrieren. Die Wissenschaftler *Jin & Jäkel* [65] sehen dynamische Konzepte als beste Möglichkeit, Faktoren wie Kosten oder Zeit in der virtuellen Umgebung abzubilden und die Informationen zur gezielten Unternehmenssteuerung einzusetzen. Vor allem Geschäftsvorgänge in Bereichen wie der Logistik, in denen sich jederzeit das Umfeld und die Anforderungen ändern können, benötigen ein flexibles Prozessmodellierungskonzept [66].

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Auswertbarkeit der verfügbaren Informationen und abrufbaren Maschinendaten innerhalb und zwischen den Prozessen einer *Smart Factory*. Mit Hilfe der in Echtzeit gewonnenen Informationen über die tatsächlichen Abläufe können bestehende Prozessmodelle überarbeitet und leichter kommuniziert werden [67].

Die Möglichkeiten der automatischen Überwachung aktueller Prozesse und deren ständige Optimierung versprechen dem Unternehmen zudem nachweisbare Zeit- und Kostenersparnisse, wie *Maryam & Khan* [68] präsentieren.

Cyber-physische Systeme (CPS)

Die Verknüpfung von physischen Objekten mit ihren digitalen Abbildern im Informationssystem erzeugt ein CPS, welches die Nachbildung und Simulation realer Prozessabläufe in einer digitalen Umgebung erlaubt. Das Ziel dieser Systeme ist es, durch eine geeignete Prozessmodellierung Verbesserungspotenziale zu entdecken und diese in die realen Abläufe zu integrieren. In der untersuchten Literatur wurden häufig Anwendungsszenarien aus dem gesundheitswissenschaftlichen Bereich zu Präsentationszwecken verwendet.

Die Forschergruppe um *Graja et al.* [69] klassifiziert relevante Eigenschaften, die sowohl die physischen als auch digitalen Prozesse bei der Erstellung eines Modellierungskonzeptes besitzen müssen. Ein Prozessmodell muss einerseits in der Lage sein, physische Abläufe der realen Welt, welche beispielsweise zeitlichen Schwankungen unterliegen, kontextabhängig sind und wechselnde Verfügbarkeitszustände besitzen, abzubilden. Andererseits muss das Modell eine Umgebung für digitale Objekte bieten, welche es erlaubt, Informationen zu empfangen und dynamisch zu verarbeiten. In gleicher Weise müssen Beschränkungen hinsichtlich verfügbarer Ressourcen und zeitlicher Bestimmungen gewährleistet sein.

In einer weiteren Arbeit [70] nehmen *Graja et al.* eine Konkretisierung der zeitlichen Beschränkungen und diesbezügliche formale Anforderungen an ein Modellierungskonzept von Geschäftsprozessen im Umfeld eines CPS vor.

Weitere Eigenschaften eines CPS, die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind, beschreiben die Autoren *Seiger et al.* [58] in ihren Überlegungen über ein objekt-orientiertes Management in CPS. Sie sehen neue Herausforderungen bei der Darstellung der heterogenen Prozessobjekte in realen und digitalen Umgebungen, bei deren komplexen Zusammenspiel sowie bei dadurch bedingten Abhängigkeiten und Parallelitäten, die es in der Modellierung zu berücksichtigen gilt.

Sie schreiben den cyber-physischen Systemen einen evolutionären Charakter zu, das heißt das modellierte Prozesse an situationsabhängige Anforderungen auch kurzfristig adaptierbar sein müssen.

Diese geforderte Fähigkeit zur Adaption verlangen auch die Forschergruppe um *Galaske et al.* [71]. Die verschiedenen Prozessvarianten, die durch das dynamische Umfeld einer cyber-physischen Umgebung in der Produktion entstehen, bedürfen einer gewährleisteten Anpassungsfähigkeit des Modellierungskonzeptes.

Im Optimalfall erfolgt die Anpassung an sich wechselnde Abläufe und die Berücksichtigung neuer Einschränkungen zeitnah und weitestgehend automatisch im Kontext eines CPS.

Die Autorengruppe *Seiger et al.* [72] schlägt für eine Automatisierung bei der Aufdeckung und Implementierung von abweichenden Prozessschritten die modellseitige Unterstützung sogenannter Feedback-Schleifen vor. Ein realer Geschäftsvorgang wird als Prozess modelliert und digital nachgebildet. Während der Steuerung und Durchführung des Prozessablaufes können durch den kontinuierlichen Abgleich des realen Maschinenzustandes mit dem entsprechenden verknüpften digitalen Prozessstatus auftretende Abweichungen automatisch erkannt und im Modell berücksichtigt werden. Anschließend kann ein abgeänderter Prozess implementiert werden, welcher erneut durch die Feedback-Schleifen-Methodik automatisch überwacht wird.

Vor diesem Hintergrund eignen sich nach [73] und [74] insbesondere die Prozessmodellierungssprachen, die neben vielseitigen grafischen Darstellungsoptionen auch eine flexible IT-seitige Übersetzung in Softwarelösungen anbieten.

Internet-of-Things (IoT)

Die Ausstattung physischer Objekte mit Sender- und Empfängereinheiten erschafft ein Cybernetzwerk digitaler Abbilder, welches sich über die gesamte Wertschöpfungskette eines Produktes erstreckt. Die traditionell statischen Modellierungskonzepte müssen an die Möglichkeiten dieses flexiblen sensorgestützten Netzwerkes anpassen werden. Die verbauten Sensoreinheiten können dabei als aktuelle Informationsquelle und Steuerungselemente der Objekte in den Prozessabläufen dienen und über internetbasierte Anwendungen miteinander kommunizieren und in Echtzeit gelenkt werden.

Die Autoren *Culic & Radovici* [75] sehen deshalb die Aufgabe der Geschäftsprozessmodellierung darin, eine getreue Abbildung und Einbindung der IoT-Objekte in das BPM-System eines Unternehmens zu ermöglichen. Eine standardisierte Vorgehensweise schafft dafür das nötige Verständnis und eine Kommunikationsgrundlage bei der Modellerstellung, sowie eine leichtere Umsetzung bei der Verknüpfung mit IT-Anwendungen.

Die Forschungsarbeiten von *Meyer et al.* [59] und [76] beschreiben weitere Anforderungen, die bei der Konzipierung von IoT-Elementen in einer Prozessmodellierungssprache berücksichtigt werden müssen. Die Unterschiede zu traditionellen Geschäftsprozessen liegen beispielsweise in der Skalierbarkeit, der Flexibilität, den Unsicherheiten über verfügbare Informationen und der zeitlichen Beschränkungen eines abzubildenden Systems.

Die Modellierungskonzepte müssen in der Lage sein, beliebig viele verschiedene Elemente und deren Informationsströme vor dem Hintergrund der wandelbaren IoT-Umgebung im Modell zu integrieren. Das Ziel einer gelungenen Integration ist die automatisierte Ausführung von Geschäftsprozessen in einer internetbasierten Umgebung verteilter Systeme.

Die Autoren *Martinho & Domingos* [77] identifizieren wichtige Limitationen der realen Objekte, die bei deren erfolgreichen digitalen Transformation in der Prozessmodellierung zu berücksichtigen sind. Technische Beschränkungen, wie eine begrenzte Energieladung oder Betriebskosten, müssen bei der Modellerstellung und Optimierung integriert werden, um eine effiziente Kostenverteilung und einen minimalen Energieverbrauch zu garantieren. Durch diese Qualitätsgarantien können IoT-basierte Prozesse verlässliche Wettbewerbsvorteile für das Unternehmen generieren.

Aufgrund der formalen Beschreibungsweise in der Geschäftsprozessmodellierung kann diese Verlässlichkeit automatisch geprüft und eventuell auftretende Anpassungsbedürfnisse aufgedeckt werden [78].

Internet-of-Services (IoS)

Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, finden sich nur wenige Anknüpfungspunkte von Prozessmodellierungskonzepten im Zusammenhang mit dem IoS im Datensatz. Gründe für diese Beobachtung könnten einerseits in dem begrenzten Zeitraum liegen, sowie an der Auswahl der Suchterme. Die Abbildung und Modifizierbarkeit von Prozessmodellen in einer dezentralen Softwareumgebung und IT-Infrastruktur, der sogenannten *Cloud*, ist in nur wenigen gefundenen Dokumenten Bestandteil der Untersuchung.

Beispielsweise berücksichtigen die beiden Autoren *Petrasch & Hentschke* [63] in ihrer I4.0 spezifischen Modellierungsmethodik und -sprache neue Elemente zur Beschreibung von Cloud-Anwendungen in Geschäftsprozessen. Generell werden Cloud-Applikationen in den untersuchten Dokumenten immer in Verbindung mit dem IoT präsentiert und untersucht.

Die Autoren *Bibani et al.* [79] beschreiben eine Demoversion, die als Prototyp bei der Umsetzung von IoT-unterstützten Prozessmodellen in einer Cloud-Umgebung eingesetzt werden kann. Ihrer Auffassung nach ermöglichen die Bereitstellung von Software, IT-Infrastrukturen und eine Plattform zur Verwaltung und Ausführung der digitalen Prozesse über das Internet, die Grundlage, die eine bessere Steuerbarkeit und Anpassungsfähigkeit bei Abläufen mit hoher Latenz verspricht.

In diesem Zusammenhang verweisen *Chang et al.* [57] auf die Ideen von *Schulte et al.* [80] [81], die das Konzept des *Cloud-Manufacturing* vorstellen. Dieses Konzept umfasst die Abbildung der gesamten Produktionsprozesse in einer digitalen Umgebung, deren Darstellung in der Cloud erfolgt und angepasst werden kann. Dadurch sollen sowohl Kosten eingespart, als auch die erhöhte Flexibilität in der Produktion gewährleistet werden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, erfordert es nach Meinung der Autoren den Aufbau eines *elastisches BPM-Systems*. Die Prozesse lenken aus Cloud-Anwendungen heraus den aktuellen Bedarf an Ressourcen in der Produktion und das zugrunde liegende Prozessmodell adaptiert neue Prozessschritte zeitnah und ortsunabhängig.

Dieses System verlangt Prozessmodellierungskonzepte, die flexibel und adaptierbar sind, sowie neben einer grafischen Darstellung auch praktische Implementierungsmöglichkeiten in die Softwareanwendungen einer Cloud-Umgebung bieten.

Inwiefern diese Art von Modellierungskonzepten in der Forschung vertreten sind, wäre durch eine Erweiterung der Suchanfrage (B3) mit der Hinzunahme weiterer themennaher Suchbegriffe realisierbar. Ausgehend von den Ausführungen in [63] und [79] sind Begrifflichkeiten, wie *Service-oriented Architecture*, *Cloud Computing*, *Infrastructure-as-a-Service*, *Software-as-a-service* oder *Platform-as-a-service*, als wichtige Konzeptideen unter dem Oberbegriff des *IoS* zu verstehen. Eine Berücksichtigung der genannten Begrifflichkeiten findet im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht statt.¹⁹

Abschließend betrachtet haben die Untersuchungen der dritten Forschungsfrage (F3), hinsichtlich der Ansprüche der I4.0-Basiselemente an Prozessmodellierungskonzepten, eine Vielzahl von Bedürfnissen und zu berücksichtigende Beschränkungen aufgedeckt. Eine zusammenfassende Auflistung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Eigenschaft	Ausprägung
Verständlichkeit	Unternehmensweite Kommunikation der Prozesse Klarheit über die Struktur komplexer Prozessabläufe
Flexibilität	Ermöglicht dynamische Darstellung der Abläufe Erlaubt Adaption an veränderte Bedingungen und Ressourcen
Automatisierung	Konzipierung sich selbststeuernder Prozessabläufe Fehlererkennung und Behebung durch Prozessvariationen
Implementierbarkeit	Vorhandensein von Schnittstellen zur IT-Implementierung Möglichkeiten zur Unterscheidung verschiedener Rollen und Objekten

Tabelle 4: Wünschenswerte Eigenschaften von Prozessmodellen im Kontext der I4.0

Die Umsetzung der Erkenntnisse der Teilanalysen verlangt eine Anpassung bestehender Modellierungskonzepte beziehungsweise die Erforschung neuer Modellierungssprachen. Inwiefern diese Anpassungen bereits Gegenstand der Forschung bestehender Sprachkonzepte sind oder in welchen Bereichen der Prozessmodellierung noch Handlungsbedarf besteht, wird im folgenden Unterkapitel 4.4 erörtert.

¹⁹ Eine angepasste Suchanfrage hat über 510 ungefilterte Dokumente ergeben. Hauptsächlich haben die Publikationen software-orientierte Lösungsansätze für die Verknüpfung von BPM mit IT-Systemen, was nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist. Für eine detaillierte Analyse müssten neue Aufnahme- und Ausschlusskriterien definiert und angewendet werden.

Weitere interessante Paper für zukünftige Betrachtungen sind u.a. [115] oder [116].

4.4 Analyse der verwendeten Modellierungssprachen

Zur Beantwortung der vierten Forschungsfrage (F4) wurde die gefundene Literatur hinsichtlich der verwendeten Modellierungskonzepte untersucht. Dabei wurden die Dokumente mit Hinblick auf die Erforschung von möglichen Anwendungsszenarien bestehender Modellierungskonzepte, der Anpassung und Erweiterung etablierter Darstellungsmethoden und der Entwicklung neuer Prozessmodellsprachen vor dem Hintergrund der Herausforderungen der I4.0 analysiert.

Am Anfang dieses Kapitels wird ein Überblick über die Verteilung der Dokumente auf die in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Prozessmodellierungssprachen gegeben. Danach erfolgt die Vorstellung der Analyseergebnisse zu den Ideen aus den Bereichen der UML und der BPMN. Abschließend werden neuentdeckte Konzepte, Sprachen und Metamodelle präsentiert.

Aus den Beiträgen der untersuchten Publikationen können zwei populäre Konzeptbereiche und eine Gruppe diverser Ideen als Forschungsschwerpunkte auf dem Gebiet der Prozessmodellierung identifiziert werden.

Wie in Abbildung 13 dargestellt, ist der Bereich der Modellierung mit BPMN am häufigsten vertreten. Diese Beobachtung lässt sich mit den zahlreichen grafischen Darstellungsmöglichkeiten und der weitverbreiteten Akzeptanz in der Wirtschaft begründen. Die Anpassung und Erweiterung dieses Konzeptes zur Prozessmodellierung im Kontext der Ansprüche und Bedürfnisse der Industrie 4.0 stehen im Fokus der Wissenschaft.

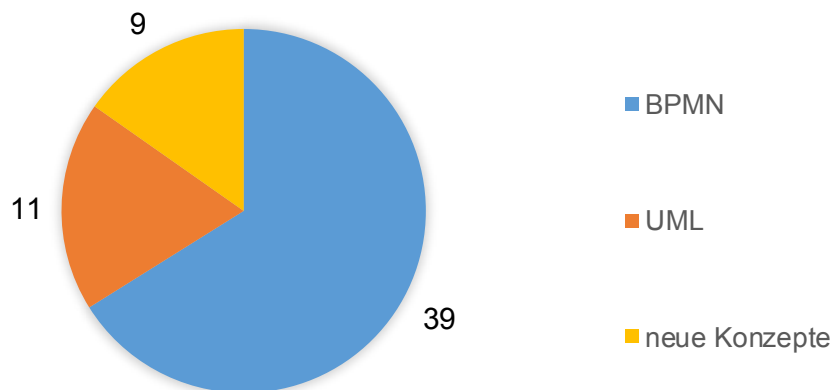


Abbildung 13: Anzahl der Dokumente mit Bezug zu BPMN oder UML

Am zweithäufigsten werden Lösungsvorschläge für die zukünftigen Herausforderungen der Geschäftsprozessmodellierung mit den Konzepten der UML erforscht. Die Sprache, die ihren Ursprung in der objekt-orientierten Programmierung hat, verfolgt einen für Laien schwerer zugänglichen technisch-fokussierten Ansatz und ist eher in Software- und Systementwicklerkreisen populär.

Zudem konnten neun entwickelte Konzepte und Metamodelle keinem der vorherigen Bereiche zugeordnet werden. Sie bieten neue Notationen und Vorgehensweisen zur Modellierung von I4.0-relevanten Prozessen.

Unified Modeling Language (UML)

In dem analysierten Datensatz finden sich nur wenige Dokumente, die die Konzepte der UML zum grafischen Beschreiben von Geschäftsvorgängen vorschlagen. Die Stärken dieser Modellierungsmethode liegen in der Modellierung von Abläufen in einer Systemumgebung, in der die Beziehungen zwischen Hardware, Software, Informationsflüssen und Prozesslogiken konzipiert und ausgeführt werden können [82] [83] [84] [64].

Sie bietet anwendungsorientierten Experten viele Möglichkeiten technische Details des Prozessablaufes darzustellen, was die Sprache im Kontext der Herausforderungen der I4.0 interessant macht. Die Forschergruppe *Galaske et al.* [71] beschreiben in ihrer Arbeit den Aufbau eines cyber-physischen Produktionssystems (CPPS) mithilfe der Darstellungsmöglichkeiten, die die Standard-UML bietet. Sie modellieren und simulieren mit Aktivitäts- und Klassendiagrammen den Aufbau eines CPPS und inwiefern auftretende Prozessabweichungen automatisch erkannt und behandelt werden (siehe Abbildung A-3 und A-4 im Anhang).

Um Klarheit über das Zusammenwirken und die Einbindung von IoT-Komponenten und menschlichen Akteuren zu gewinnen, bieten die UML-Methoden vielseitige Möglichkeiten. *Afzaal & Zafar* [85] nutzen UML-basierte Modelle zum besseren Verständnis für den Einsatz von RFID-Sensoren. Wie in den Abbildungen A-5 und A-6 im Anhang dargestellt, beschreiben Anwendungsfalldiagramme die funktionalen Anforderungen der Prozessteilnehmer und Sequenzdiagramme bilden das Verhalten im System ab.

Da die Verknüpfung und die ständige Kommunikation aller Prozessteilnehmer und CPS-Objekte über das Internet geschehen, muss die Sicherheit der Daten und die Funktionalität gewährleistet werden. Das Prozessmodell eines sicheren cyber-physischen Systems muss neue Regeln, Rollenzuweisungen und Objekte berücksichtigen.

Eine Ergänzung des UML-Standards, wie in *Robles et al.* [86] präsentiert, hilft bei der Abbildung von sicherheitsrelevanten Prozessen auf allen Ebenen einer IoT-basierten IT-Architektur. Diese Erweiterung, von den Autoren als **IoTsec** bezeichnet, hilft Prozessmodellierern eine sichere Systemarchitektur in der UML-Umgebung zu konzipieren.

Um die Verständlichkeit und Implementierbarkeit dieses Lösungsansatzes zu garantieren, wurden IT-sicherheitspezifische Begrifflichkeiten und Vorgänge in die UML-Modellierungslogiken aufgenommen. Beispiele für die erweiterten UML-Diagrammtypen finden sich im Anhang dieser Arbeit (Abbildungen A-7 bis A-10).

Damit sowohl UML-Experten als auch Endnutzer ohne Vorkenntnisse ein IoT-System konfigurieren und nutzen können, haben *Eterovic et al.* [87] eine eigene UML-basierte Modellierungssprache entworfen. Die Variante umfasst eine an die IoT-Landschaft angepasste UML-Notation. Diese sogenannte *visual domain specific modeling language* (kurz: **VDSML**) unterstützt mit grafischen Elementen die Konzipierung eines IoT-Systems, ohne zwingend Vorwissen über UML vorauszusetzen. Diese einfache Zugänglichkeit der Sprache konnten sie anhand eines Experimentes, der erfolgreichen und fehlerfreien Modellierung eines *Smart Home*-Prozesses, mit unterschiedlich vorgebildeten Teilnehmern belegen.

Die untersuchten Dokumente zeigen die bedingte Eignung des UML-Konzeptes zur Geschäftsprozessmodellierung im Kontext dieser Arbeit. Setzt man ein gewisses Grundverständnis beim Umgang mit den zahlreichen Diagrammtypen und Profilen voraus, können Modellersteller umfangreiche und flexible Prozessabläufe samt technischer Details abbilden. Durch die eher objekt-orientierte Notation und Semantik bieten UML-Modelle jedoch gute Möglichkeiten bei der Implementierung und Ausführung in IT-Systemen.

Business Process Model and Notation (BPMN)

Die am häufigsten angewandte und modifizierte Modellierungssprache des analysierten Datensatzes ist der de-facto Industriestandard zur Geschäftsprozessmodellierung, die BPMN. Aufgrund der hohen Popularität bei der Darstellung von Unternehmensabläufen ist diese grafische Spezifikationssprache im Fokus der Forschung, um eine I4.0 angepasste Modellierung zu konzipieren.

Viele Publikationen präsentieren die Eignung und Fähigkeiten des BPMN-Konzeptes bei der Darstellung von I4.0 relevanter Anwendungen. Beispielsweise werden einfache BPMN-Modelle zur Abbildung von IoT-gestützten Objekten und ihre Einbindung in Webapplikationen vorgestellt [75] oder Überlegungen zum Aufbau einer IoT-gestützten Systemarchitektur, die eng mit einem Geschäftsprozessmanagementsysteme verbunden ist, präsentiert [52] [88].

Insbesondere im Umfeld zukünftiger Anwendungsbereiche von IoT-Lösungen wird der Einsatz von BPMN-Konzepten veranschaulicht. Forschungsfelder aus dem Gesundheitssektor, wie dem *Ambient Assisted Living*²⁰ [78] [89], der medizinischen Notfallversorgung [79] und dem Krankenhausmanagement [54] [53] [90] [91] dienen oftmals als Beispiele.

In [78] erstellen *Domingos et al.* zusätzlich eine Methodik, um sensorbasierte Informationen über die Zuverlässigkeit und die Betriebssicherheit bei der Modellierung mit BPMN abzubilden und zu überwachen.

Die BPMN-Konzepte können auch zur effektiven Umsetzung von Unternehmenszielen in der Produktion eines auf die I4.0 ausgerichteten Unternehmens eingesetzt werden, wie *Suri et al.* [50] zeigen. Die Konzepte ermöglichen das bereichsübergreifende Implementieren und Kommunizieren innerhalb einer Organisation. Zum einen helfen sie beim Abbilden realer Prozessabläufe, die eventuell vom Soll-Zustand im Modell abweichen [92]. Zum anderen erlauben sie das Aufdecken von Kosten- und Zeiteinsparungen bei der Ausführung von Prozessschritten, welche im Modell optimiert und später verbessert umgesetzt werden können [68].

Die Aufdeckung verlangt den erhöhten Einsatz von IoT-Objekten in der Fertigung, zum Beispiel Sensoreinheiten oder Messgeräte. Ein Mehraufwand, dessen Kosten in der Geschäftsprozessmodellierung berücksichtigt werden sollten [77].

Um den wechselnden Anforderungen möglicher Einsatzszenarien bei der Modellierung gerecht zu werden, müssen weitere Anpassungen an den Konzepten und Methoden der BPMN vorgenommen werden [59].

²⁰ „Das „*Ambient Assisted Living*“ steht für Konzepte, Produkte und Dienstleistungen, die neue Technologien in den Alltag einführen, um die Lebensqualität für Menschen in allen Lebensphasen, vor allem im Alter, zu erhöhen. Ins Deutsche übersetzt steht AAL für Altersgerechte Assistenzsysteme für ein gesundes und unabhängiges Leben.“ Quelle: <http://www.aal-deutschland.de/> (Zugriff am 01. 10. 2018)

Dies kann sowohl einfach durch Anmerkungen, *Annotations* genannt, an Prozessaktivitäten erfolgen [66], als auch umfangreichere Konzeptänderungen an sich erfordern [59].

Die Arbeiten der Forschergruppe *Graja et al.* [69] [93] [94] beschreiben eine CPS-fähige Erweiterung der BPMN-Methodik, die **BPMN4CPS**. Das Konzept hat die Ermöglichung einer genauen und effizienten Prozessmodellierung im Kontext von cyber-physischen Elementen, Ressourcen und Anforderungen als Ziel. Zu diesem Zweck erweitern sie die BPMN-Logik und führen neue grafische Elemente in der Darstellung ein.

Die Erweiterung der Logik erfolgt zum einen durch die Einführung neuer Meta-Klassen zur Darstellung von Abläufen und deren Interaktionen in der Cyber-Umgebung, wie in Abbildung 14 dargestellt. Bei der grafischen Abbildung eines Geschäftsprozesses werden fortan immer drei Pools konzipiert:

- **Physische Ebene:** Vergleichbar mit den BPMN üblichen *Pools*, Abbildung physischer Aktivitäten
- **Cyber-Ebene:** *Pool*, der nur Aktivitäten der Cyberkomponenten abbildet
- **Kontroll-Ebene:** *Pool*, der zentrale Kontrollprozesse abbildet und die Kommunikation leitet

Zum anderen werden auch neue Typen an Aktivitäten, den Aufgaben und Anforderungen der jeweiligen Ebenen entsprechend, eingeführt. Die Darstellungen hierzu finden sich im Anhang, zusammen mit einem Beispielprozess eines Rettungsdrohneneinsatzes (Abb. A11-13).

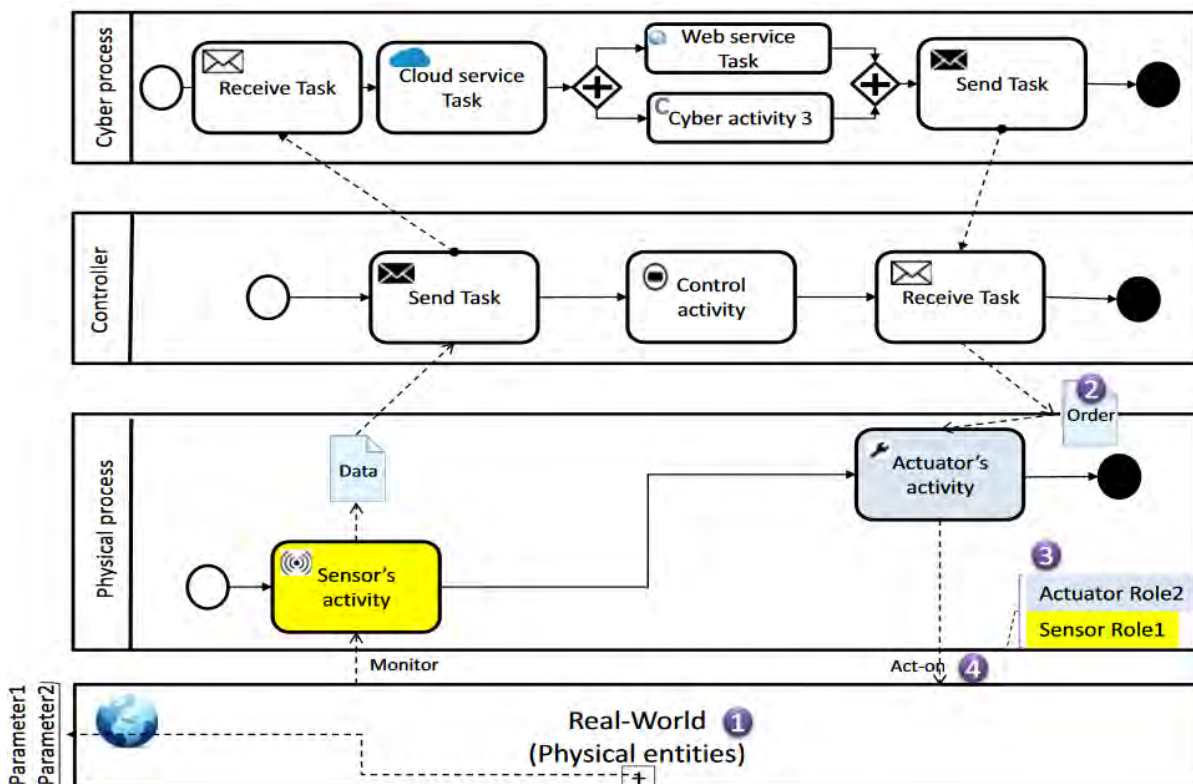


Abbildung 14: Prozesslogik in BPMN4CPS [69]

In ihren späteren Arbeiten haben die Forscher das BPMN4CPS-Konzept an die Anforderungen zukünftiger cyber-physischer Prozesse angepasst. In [93] wurden zeitbezogene Elemente aufgenommen. Diese neuen Elemente helfen dynamische Prozesse mit ihrem zeitlichen Kontext abzubilden. Außerdem konzipierten die Wissenschaftler in [94] eine Schnittstelle zur besseren Implementierung in IT-Systeme und Softwareanwendungen.

In [95] analysieren *Chiu & Wang* die *Event*-Elemente der BPMN-Modellierung hinsichtlich ihrer Eignung zur Darstellung von IoT-unterstützten Prozessen und orientieren sich dabei an den Anforderungen von *Meyer et al.* [76]. Die beiden Forscher identifizieren die Bedingungs-, Nachrichten- und Fehlerelemente als aussichtsreiche Typen und schlagen mehrere Erweiterungen vor, um den Anforderungen der Prozesse im Kontext des IoT gerecht zu werden. Zudem definieren sie den neuen Typ eines „Lage-Events“, mit dem sich ortsbezogene Abläufe modellieren lassen, beispielsweise die Position oder Bewegung eines Gegenstandes als Auslöser für Aktivitäten.

Um die Sicherheit sensibler Daten und Informationsflüsse in einer IoT-Umgebung sicherzustellen, schlagen *Sang & Zhou* [96] eine zusätzliche Erweiterung des BPMN-Standards vor. Diese Erweiterung soll sowohl bei der Prozesserstellung als auch während der späteren Prozessdurchführung verschiedene Sicherheitsaspekte vollumfänglich abbilden. Durch die vorangestellte Definierung von Sicherheitskriterien und der Erweiterung bestehender Darstellungselemente können die Geschäftsprozesse entsprechend dargestellt werden (siehe Abbildung A-14 und A-15 im Anhang). Zusätzlich führen sie noch die neue Klasse der „Sicherheits-Indikatoren“-Elemente in die BPMN ein. Diese Elemente kategorisieren die Prozessschritte hinsichtlich Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit und verschaffen ein besseres Prozessverständnis.

Kombination von UML und BPMN

Die Anforderungen an die Prozessmodellierung im Kontext der Industrie 4.0 sind bei der Darstellung von Prozessen sehr vielseitig. Darüber hinaus muss auch deren Implementierung in eine ausführende IT-Architektur sehr leicht und effizient durchführbar sein.

Inwiefern eine Verknüpfung der Modellierungskonzepte der UML und BPMN zur Lösung dieser Herausforderung realisierbar ist, haben *Ćwikła et al.* [82] untersucht. In ihrer Arbeit beschreiben sie eine Analyse über die Möglichkeiten beider Modellierungssprachen beim Aufbau eines Informationsgewinnungssystem in der Produktion. Das zukünftige cyber-physische System muss die Datenerzeugung, -verarbeitung und -analyse im Produktionsprozess steuern, sowie den menschlichen Faktor in die Systemmodellierung mit einbeziehen.

Die BPMN bietet in diesem Zusammenhang die zugänglichere grafische Darstellungsweise und ist vielseitig bei der Modellierung von Geschäftsprozessen. Sie besitzt jedoch Schwächen bei der Bereitstellung von Softwaretools oder der notwendigen technischen Beschreibungsgenauigkeit. Wohingegen die technische Detailtiefe und Nähe zur Implementierung in Anwendungssoftware als die Stärken der UML herausgearbeitet werden.

Insbesondere die UML-basierte Systemmodellierungssprache **SysML**, die *System Modeling Language* der Object Management Group [97], eignet sich nach Auffassung von *Ćwikła et al.* dafür. Die zahlreichen Diagrammtypen ermöglichen eine tiefgehende Sicht auf die Prozessstruktur und deren technische Realisierung. Im Fazit beschreiben sie die gemeinsame Verwendung von Konzepten der BPMN und der UML als vielversprechendste Lösung zum Modellieren eines cyber-physischen Informationssystems.

Eine ähnliche Verbindung setzen auch *Petrasch & Hentschke* bei ihrer Konzipierung einer allgemeinen Modellierungssprache im Kontext der Industrie 4.0 um. In [63] stellen die beiden Forscher die **I4PML**, die *Industry 4.0 Process Modeling Language*, vor. Diese Sprache soll bei der Modellierung von Unternehmensprozessen alle Elemente der Bestandteile der I4.0 einbeziehen und abbilden. Ihre grafische Notation basiert teilweise auf einer Erweiterung von BPMN (Abbildung A-16 im Anhang). Wohingegen die zugrunde liegenden Anforderungen und Definitionen der Objekte und die Rollen der Prozessteilnehmer in Diagrammen der UML und SysML vorgenommen werden (Abbildung A-17 im Anhang). In Abbildung 15 ist ein in I4PML modelliertes Beispiel eines vorbeugenden Instandhaltungsprozesses dargestellt.

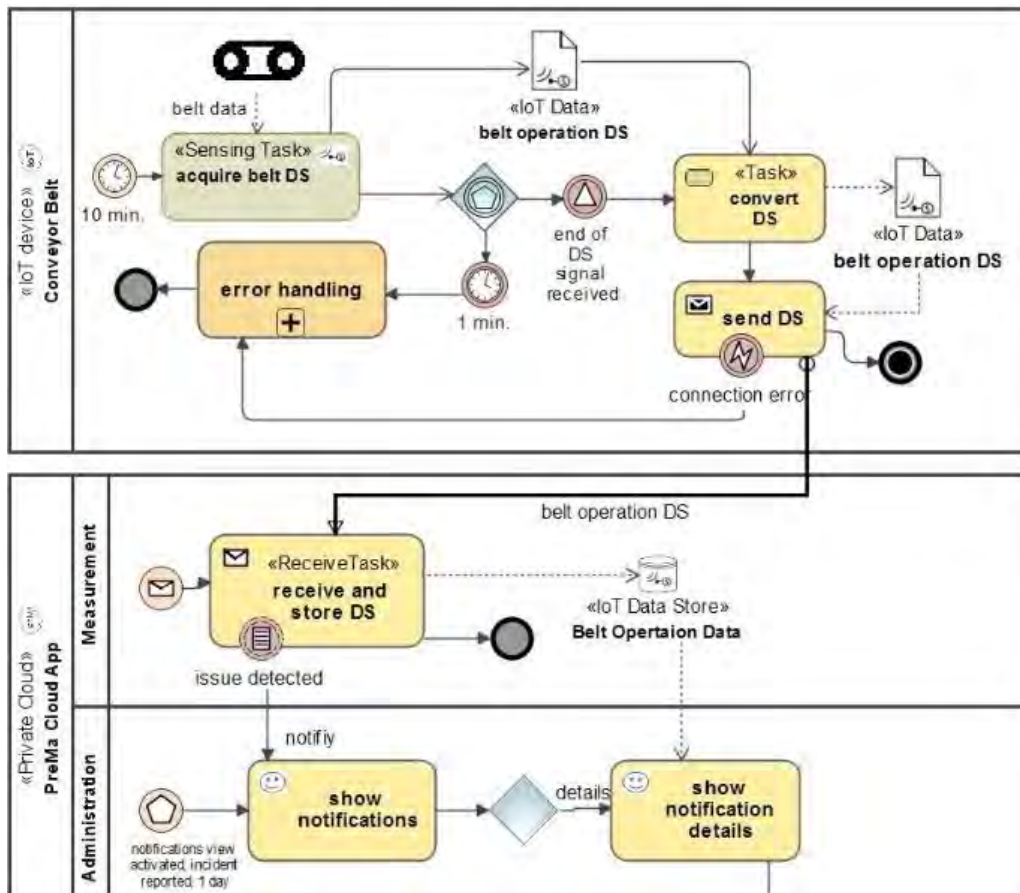


Abbildung 15: Vorbeugende Instandhaltung eines Förderbandes in I4PML [63]

Die Vorteile der I4PML liegen in der grafisch-ausdrucksfähigen Darstellungsform, der ausreichenden technischen Detailtiefe und der systemnahen Beschreibung von Prozessobjekten. Die Sprache ist somit in vielen Bereichen der Industrie 4.0 anwendbar und liefert auch Schnittstellen für Softwareanwendungen, was eine gute Implementierbarkeit und Möglichkeiten zur Automatisierung bietet.

Abseits konkreter Modellierungsweisen präsentieren *Vitali & Pernici* [98] [99] einen neuen Ansatz zum *Process-Mining*. Aus den großen Datenmengen der Abläufe in der realen Welt können mit der Nachbildung im Digitalen neue Zusammenhänge erkannt werden. Die Autorinnen entwickeln einen Algorithmus, um mithilfe der BPMN und den Informationen sensorgestützter IoT-Systeme bislang unerkannte Verflechtungen im Modell aufzudecken. Ein Algorithmus, der sowohl die Flexibilität wie auch das Verständnis über das abgebildete System bei der Prozessmodellierung verbessert.

Neue Modellierungssprachen und Konzepte

Bei der Analyse der Dokumente hinsichtlich neuer Modellierungskonzepte wurden drei relevante Ansätze identifiziert. Sie unterscheiden sich zu den bisherigen sowohl in den verwendeten Modellierungssprachen als auch in der Modellierungslogik im Allgemeinen.

Um die Möglichkeiten des *Smart Manufacturing* im Produktionsprozess zu visualisieren und verschiedenen Prozessteilnehmern zugänglich zu machen, schlagen *Jin & Jäkel* [100] eine unternehmensweite dynamische Modellierungsmethodik vor. Die Dynamik wird bei der Prozessmodellierung durch die Verwendung einer einfachen grafischen Darstellung von Prozessaktivitäten und einer zugrundeliegenden hinterlegten Petri-Netz Logik erreicht.

Petri-Netze, von *Carl Adam Petri* entwickelt [6] [101], sind Token-basierte Graphen mit Knoten und Kanten, die durch ihre simple Ausführungslogik dabei helfen, Zustandsänderungen im dynamischen Prozessverlauf effizient zu analysieren und das Modell anzupassen. Prozessabläufe können im Detail mit Petri-Netzen modelliert werden, welche in den Aktivitäten einer vorangestellten Visualisierungsmethode abgebildet werden. Dieser granulare Aufbau sichert die Verständlichkeit und Adaptierbarkeit des Prozessmodells.

Bei der Abbildung von Bestellungen- und Fertigungsprozessen eines CPPS in [102] nutzen *Westermann et al.* die objektorientierte Methode zur Geschäftsprozessmodellierung und -analyse, kurz **OMEGA**. Dieses Konzept entstand 1995 an der Universität Paderborn [103] und wird heute von der UNITY AG weiterentwickelt.²¹

Das Ziel der OMEGA-Methodik ist es, die vollständige Modellierung einer Ablauforganisation zum Planen und Optimieren von Leistungserstellungsprozessen mittels einfacher Visualisierungen zu ermöglichen. Dabei werden Objekte der Ablauf- und Objekte der Prozessorganisation in einem Modell abgebildet. In der Abbildung 16 sind die grundlegenden Konstrukte der Methode dargestellt und im Anhang findet sich in Abbildung A-18 ein Beispiel für einen mit OMEGA modellierten cyber-physischen Produktionsprozess.

Das OMEGA-Konzept bietet in seiner Semantik ausreichende Möglichkeiten, um Prozesse im Kontext der Industrie 4.0 grafisch darzustellen. Sie fördert eine sehr hohe Verständlichkeit über die Abläufe komplexer CPS und hilft bei deren flexibler Gestaltung.

Inwiefern die IT-seitige Einbindung in die Softwarearchitektur realisiert wird und inwiefern sie zusammen mit bestehenden Modellierungskonzepten genutzt werden kann, ist fraglich.

²¹ <https://www.unity.de/de/leistungen/prozessmanagement/> (Zugriff am 03.10.2018)

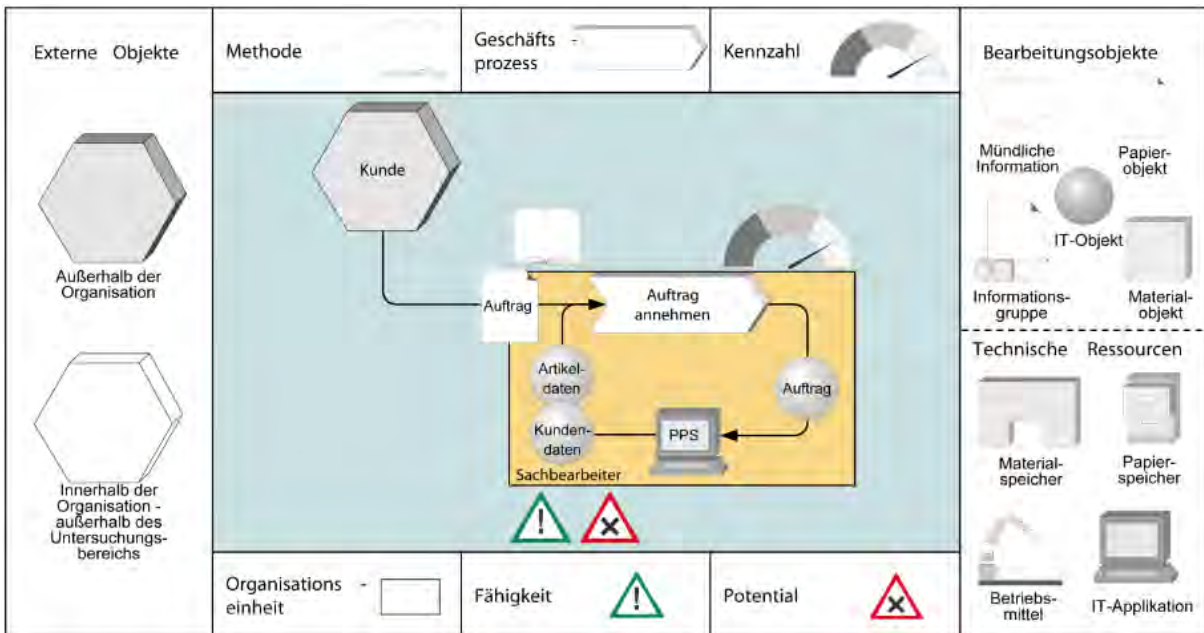


Abbildung 16: Überblick über die Elemente der Methode OMEGA [104]

Aufgrund der relativen Unbekanntheit und geringen Popularität in der Wissenschaft müssen noch weitere Forschungsbemühungen in dieser Hinsicht unternommen werden. Löst man die Problemstellungen hinsichtlich der Implementierbarkeit und der Automatisierung, bietet sich OMEGA als potenzielle Modellierungssprache in der Industrie 4.0 an.

Nach Auffassung von *Appel et al.* [105] findet der kontinuierliche Strom an Daten, der durch die Objekte des IoT erzeugt wird, keine hinreichende Berücksichtigung bei der Geschäftsprozessmodellierung. Aus diesem Grund haben die Forscher das Konzept der *Event Stream Processing Units* (kurz **SPUs**) entwickelt.

Mit diesem Konzept soll der fortdauernde Fluss an Ereignissen (*Event Stream*), der durch die IoT-Objekte generiert wird, bei der Geschäftsprozessmodellierung abgebildet und zur Optimierung der Abläufe genutzt werden. Das Konzept unterstützt dabei sowohl die Modellierung von Prozessen mit EPK als auch mit BPMN.

In der EPK werden die SPUs zur Anreicherung der Funktionen mit prozessrelevanten Funktionen, beispielsweise dauerhafte Abfrage der Standortdaten, konzipiert. Dieser Informationsfluss dient als Grundlage für die Ausführung von Funktionen. Im Anhang befinden sich in den Abbildungen A-19 und A-20 die Erweiterungselemente und die Anreicherung mit SPUs bei der Konfiguration von Aktivitäten. Die Darstellung der erweiterten Prozesse in EPKs bietet sich im Kontext der weitverbreiteten Anwendung der ARIS-Konzepte an.

Dahingegen werden die SPUs in der Prozessmodellierung mit BPMN als Erweiterung von *Service*-Aktivitäten eingeführt. Diese Aktivitätentypen bilden Aufgaben ab, die während des Geschäftsprozesses mit dem ständigen Informationsfluss arbeiten beziehungsweise selbst kontinuierlich prozessrelevante Daten produzieren.

In Abbildung 17 sind die SPU-Erweiterungen in BPMN und deren Verwendung am Beispiel eines Sendeverfolgungsprozesses abgebildet. Der gleiche Prozess wurde auch mit einer EPK in Abbildung A-21 im Anhang modelliert.

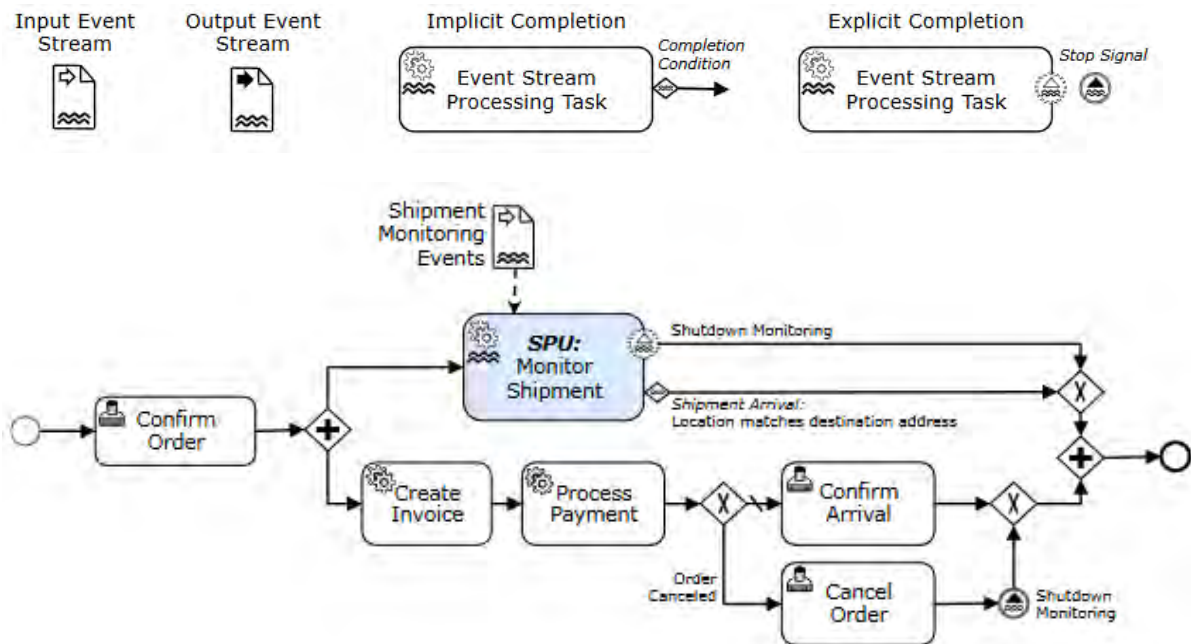


Abbildung 17: SPU-erweiterte Elemente zur Versandüberwachung in BPMN [105]

Das Konzept bietet die Möglichkeit der wechselseitigen Umwandlung zwischen den Modellierungssprachen, wie in Abbildung A-22 dargestellt. Da die EPKs eher abstrakte Darstellungen der Prozesslandschaft sind, wird die BPMN mit ihren Schnittstellen zu prozessausführenden Anwendungssystemen benötigt. Mithilfe der BPMN-Methoden können die recht abstrakt modellierten EPKs zur Ausführung in der IT-Systemarchitektur gebracht und umgekehrt auch effizient analysiert werden.

Die **Untersuchungsergebnisse** der vierten Forschungsfrage (F4) identifizieren eine breitaufgestellte Erforschung von Prozessmodellierungskonzepten im Kontext der Industrie 4.0.

Je nach Fokus bei der Modellerstellung können sowohl die Konzepte und Methodenerweiterungen der UML als auch der BPMN genutzt werden.

Die UML wird durch ihre Nähe bei der Konzipierung von Softwaresystemen häufig in der Prozessmodellierung mit hoher technischer Detailtiefe angewendet. Die erweiterten Diagrammtypen bieten zahlreiche Anpassungsmöglichkeiten, um die Anforderungen von cyber-physischen Prozessen zu erfüllen.

In der ausgewerteten Forschung dominieren eindeutig die Anwendungsbeispiele und Erweiterungen für die populäre und grafisch vielseitige BPMN. Die Notation sowie die semantischen Zusammenhänge werden mit neuen Lösungsansätzen angereichert, um so die gewünschten Anforderungen aus Tabelle 4 im Kapitel 4.3 zu erfüllen.

Vielversprechende Prozessmodellierungskonzepte sind die I4PML [63] und BPMN4CPS [69]. Beide Methodiken bieten aussichtsreiche Möglichkeiten Geschäftsprozesse im Kontext der I4.0 vollumfänglich abzubilden. Inwiefern sich die neuen Modellierungskonzepte, wie OMEGA oder SPU [105] eignen, bedarf weiterer Forschungsarbeit.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die wirtschaftlichen Chancen und Risiken, die die Technologien und Leitideen der Industrie 4.0 versprechen, stellen die Unternehmen vor große Herausforderungen. Um Wettbewerbsvorteile wie Kostensenkungen oder eine effiziente Produktionsmittelverteilung zu generieren, erfordert es eine passende Einbindung der neuen Ressourcen und Informationen in die Geschäftsprozessorganisation.

Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit zuerst eine Vorstellung der Themen der Industrie 4.0 und aus dem Bereich der Geschäftsprozessmodellierung vorgenommen. Anschließend wurde eine Methode entwickelt, die die Forschungsbemühungen im Zeitraum von 2014 bis 2018 aufdeckte und auf deren Grundlage eine Analyse der Forschung an Prozessmodellierungskonzepten im Kontext der Industrie 4.0 durchgeführt wurde.

Die Untersuchung hinsichtlich der Aktivität auf diesem Forschungsgebiet belegte einen konstanten Anstieg in der Häufigkeit an relevanten Veröffentlichungen in der Wissenschaft. Diese Beobachtung legt nahe, dass sich die Prozessmodellierung als Methodik zur Überwindung der Herausforderungen der Industrie 4.0 eignet.

Obwohl die Forschung hauptsächlich durch europäische Forscher forciert wird, genießt sie dennoch globale Aufmerksamkeit und wird in Kooperation vieler Forschungsnationen betrieben. Sollte das Bewusstsein für die Chancen, die sich durch eine an die Industrie 4.0 angepasste Prozessmodellierung ergeben, weiterhin wachsen, ist ein weiterer Anstieg an relevanten Forschungsarbeiten zu erwarten.

Momentan werden die meisten Veröffentlichungen auf den Forschungsfeldern der Informatik publiziert, jedoch finden sich auch in Forschungsbereichen wie den Gesundheitswissenschaften relevante Arbeiten. Die Mehrzahl der gefundenen Dokumente präsentiert methodenorientierte Lösungsansätze oder beschreibt notwendige Konzeptanpassungen im Rahmen der Anforderungen der Industrie 4.0. Die Forscher wollen durch die angestrebten Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Prozessmodellierung Kostenreduzierungen, Ressourcenoptimierungen und eine Steigerung des Verständnisses über die Prozessabläufe in Unternehmen erreichen.

Die Auswertung der Forschungsliteratur mit Hinblick auf die Bedürfnisse und Anforderungen der jeweiligen Aspekte der Industrie 4.0 deckte mehrere wichtige Eigenschaften auf, die es bei der Prozessmodellierung zu berücksichtigen gilt.

Die Prozessmodelle sollen helfen, Klarheit über die Struktur komplexer Prozessabläufe im Unternehmen zu schaffen und diese verständlich auf allen Organisationsebenen zu kommunizieren.

Die Modellierungskonzepte müssen in der Lage sein, die dynamischen Abläufe in cyber-physischen Umgebungen darzustellen und flexibel auf sich verändernde Vorgänge und Ressourcenverfügbarkeiten zu reagieren.

Die Möglichkeiten zur Automatisierung bei der Fehlererkennung und Fehlerbehebung sollten in der Modellierungsmethodik bedacht sein. Der Aufbau sich selbst steuernder Prozesssysteme steht dabei im Mittelpunkt.

Außerdem muss eine Integration der modellierten Prozesse in die IT-Architektur möglich sein. Aus diesem Grund sollten die Modellierungskonzepte geeignete Schnittstellen bieten, die es erlauben, den modellierten Prozess mitsamt seiner Funktionen und Anforderungen auszuführen.

Die auf diesen Erkenntnissen aufbauende Analyse der verwendeten Modellierungssprachen identifizierte vielversprechende Modellierungskonzepte, zum Beispiel die SPU, und neue Modellierungssprachen, wie die I4PML. Außerdem konnten zahlreiche Anpassungen und notwendige Erweiterungen der populären Modellierungssprachen UML und BPMN aufgedeckt werden. Die Forschung auf dem Gebiet der Prozessmodellierung ist umfangreich, aber bedarf noch weiterer Anstrengungen, um die Herausforderungen im Kontext der Industrie 4.0 zu überwinden.

Eine weiterführende Recherche zu aktuellen Studien oder Veröffentlichungen mit einem ähnlichen Forschungsziel wie diese Arbeit blieb erfolglos. Ein vergleichender Überblick über verschiedene aktuelle Geschäftsprozessmodellierungskonzepte und deren Lösungsideen für die Aufgaben im Kontext der Industrie 4.0, wie ihn diese Arbeit anbietet, existiert meines Wissens nach nicht.²²

Neben der Nutzung anderer wissenschaftlicher Datenbanken können zukünftige Untersuchungen themenverwandte Forschungsfelder, wie das der Arbeitsablauforganisation und deren Methoden zur Prozessmodellierung im Kontext der Industrie 4.0, analysieren. In gleicher Weise bietet eine Vertiefung der Analyse in die speziellen Anforderungen der Kernelemente, wie dem *Internet-of-Services*, neue Erkenntnisse für die Forschung.

Die Betrachtung des Forschungsstandes von visualisierender und ausführender Anwendungssoftware könnte zusätzliche Einblicke über Anforderungen an Prozessmodellierungskonzepte generieren.

Mit Hinblick auf die technologischen Möglichkeiten und Herausforderungen der Industrie 4.0 sowie dem Bewusstseinswandel bezüglich der Chancen in den Unternehmen und in der Wissenschaft, ist diese Arbeit nur eine Momentaufnahme. Thematisch vergleichbare Analysen zu Prozessmodellierungskonzepten sollten in den kommenden fünf bis zehn Jahren wiederholt werden.

²² Die Recherche erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Kagermann, L. Wolf-Dieter und W. Wahlster , „Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution,“ *VDI Nachrichten*, <https://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>, April 2011. [Zugriff am 23. 08. 2018]
- [2] acatech, „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0,“ 2013. [Online]. Available: https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. [Zugriff am 23. 08. 2018].
- [3] H. G. Baum, A. G. Coenenberg, T. Günther , J. Fischer, C. Kriegbaum und T. Muche, *Strategisches Controlling*, Stuttgart, Schäffer-Poeschel, 2004.
- [4] Q. Ingenieurbüro, „Prozessmanagement/ Qualitätsmanagement (DIN/EN/ISO-9000/9001),“ 2016. [Online]. Available: http://www.qmti.de/prozm/prozessmanagement_e.htm. [Zugriff am 20. 08. 2018].
- [5] Deutsche Gesellschaft für Qualität, „Was ist ein Prozess in ISO 9001:2015?,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.dgq.de/fachbeitraege/prozesse-in-iso-90012015/>. [Zugriff am 20. 08. 2018].
- [6] C. Richter-von Hagen und W. Stucky, *Business-Process- und Workflow-Management*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2004.
- [7] J. Becker, M. Kugeler und M. Rosemann, *Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*, Berlin, Springer-Gabler, 2012.
- [8] T. Benker, C. Jürck, M. Wolf und S. Strahringer, „Modelle und Metamodellierung,“ in *Geschäftsprozessorientierte Systementwicklung: Von der Unternehmensarchitektur zum IT-System*, Wiesbaden, Springer-Vieweg, 2016.
- [9] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, „Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung: 6.2.4 Prozessmodelle,“ Februar 2018. [Online]. Available: https://www.orghandbuch.de/OHB/DE/ohb_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=28. [Zugriff am 22. 08. 2018].
- [10] T. H. Davenport, *Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology*, Boston, Harvard Business School Press, 1992.
- [11] K. C. Laudon, J. P. Laudon und D. Schoder, *Wirtschaftsinformatik, Eine Einführung*, München, Pearson Studium, 2006.
- [12] P. Trkman, „The critical success factors of business process management,“ *International Journal of Information Management*, pp. 125-134, 2010.

- [13] R. M. de Morais, S. Kazan, S. I. de Padua und A. L. Costa, „An analysis of BPM lifecycles: from a literature review to a framework proposal,“ *Business Process Management Journal*, pp. 412-432, 2014.
- [14] W. M. van der Aalst, A. H. ter Hofstede und M. Weske, „Business Process Management: A Survey,“ in *BPM 2003*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, pp. 1-12.
- [15] A. W. Scheer und M. Nüttgens, „ARIS-House of Business Engineering: Von der Geschäftsprozessmodellierung zur Workflow-gesteuerten Anwendung; vom Business Process Reengineering zum Continuous Process Improvement,“ *Veröffentlichungen des Institut für Wirtschaftsinformatik*, Nr. 133, 1996.
- [16] A. W. Scheer, *ARIS — Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2002.
- [17] A. Marrella, M. Mecella, A. Russo, S. Steinau, K. Andrews und M. Reichert, „A Survey on Handling Data in Business Process Models (Discussion Paper),“ in *Italian Symposium on Advanced Database Systems (SEBD)*, Gaeta, Italy, 2015.
- [18] C. Minonne und S. Loretan, „Business Process Management: wie wird es in der Praxis eingesetzt?,“ *ZFO-Zeitschrift für Führung und Organisation*, pp. 203-209, 2012.
- [19] A. W. Scheer, G. Keller und M. Nüttgens, „Semantische Prozessmodellierung auf der Grundlage "Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK)",“ *Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik*, 1992. [Online]. Available: http://www.uni-saarland.de/fileadmin/user_upload/Fachrichtungen/fr13_BWL/professuren/PDF/heft89.pdf. [Zugriff am 23. 08. 2018].
- [20] H. R. Hansen und G. Neumann, *Wirtschaftsinformatik 1: Grundlagen und Anwendungen*, Stuttgart, Lucius & Lucius, 2009.
- [21] M. Nüttgens und F. J. Rump, „Syntax und Semantik Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK),“ *Promise Vol.2*, pp. 64-77, 2002.
- [22] Object Management Group, „Unified Modeling Language,“ 2018. [Online]. Available: <http://uml.org/what-is-uml.htm>. [Zugriff am 24. 08. 2018].
- [23] N. Russell, W. M. van der Aalst, A. H. ter Hofstede und P. Wohed, „On the suitability of UML 2.0 activity diagrams for business process modelling,“ *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific conference on Conceptual modelling-Volume 53*, Australian Computer Society, 2006.
- [24] Object Management Group, „BPMN - Business Process Model and Notation,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.bpmn.org/>. [Zugriff am 25. 08. 2018].
- [25] T. Allweyer, *BPMN 2.0 - Business Process Model and Notation : Einführung in den Standard für die Geschäftsprozessmodellierung*, Norderstedt, Books on Demand, 2009.
- [26] Object Management Group, „Business Process Model and Notation: Specs,“ 12. 2013. [Online]. Available: <https://www.omg.org/spec/BPMN/>. [Zugriff am 24. 08. 2018].
- [27] R. Drath und H. Koziol, „Industrie 4.0 - Im Spannungsfeld zwischen Machbaren und Sinnvollen,“ *atp Edition 1-2/2015*, pp. 28-35, 2015.

- [28] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „Industrie 4.0,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>. [Zugriff am 23. 08. 2018].
- [29] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Industrie 4.0,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>. [Zugriff am 24. 08. 2018].
- [30] Plattform Industrie. 4.0, „Was ist Industrie 4.0?,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de>. [Zugriff am 24. 08. 2018].
- [31] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha und J. Stankovic, „Cyber-physical Systems: The next computing revolution,“ *Proceedings ACM Design Automation Conference*, pp. 731-736, 2010.
- [32] E. A. Lee und S. A. Seisha, *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach*, MIT Press, 2017.
- [33] K. J. Park, R. Zheng und X. Liu, „Cyber-physical Systems: Milestones and Research Challenges,“ *Computer Communications*, pp. 1-7, 2012.
- [34] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic und M. Palaniswami, „Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,“ *Future Generation Computer Systems*, Bd. 29, Nr. 7, pp. 1645-1660, 2013.
- [35] R. Moreno-Vozmediano, R. S. Montero und I. M. Llorente, „Key Challenges in Cloud Computing: Enabling the Future Internet of Services,“ *IEEE internet Computing*, pp. 18-25, 2013.
- [36] M. Díaz, C. Martín und B. Rubio, „State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing,“ *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 99-117, 2016.
- [37] E. A. Lee, „Cyber Physical Systems: Design Challenges,“ *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, pp. 363-369, 2008.
- [38] E. Geiselberger und M. Broy, *agendaCPS - Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*, Berlin, Springer, 2012.
- [39] S. Mittal, M. Khan, D. Romero und T. Wuest, *Smart manufacturing; Characteristics, technology and enabling factors*, Columbia USA, *Journal of Engineering Manufacture*, 2017.
- [40] S. Park, „Development of Innovative Strategies for the Korean Manufacturing Industry by Use of the Connected Smart Factory (CSF),“ *Procedia Computer Science*, pp. 744-750, 2016.
- [41] BITKOM, „Industrie 4.0 - Status und Perspektiven: Studie,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2016/Leitfaden/Industrie-40-Status-und-Perspektiven/160421-LF-Industrie-40-Status-und-Perspektiven.pdf>. [Zugriff am 26. 08. 2018].
- [42] STAUFEN, „Industrie 4.0 : Deutscher Industrie 4.0 Index 2017,“ 2017. [Online]. Available: https://www.staufen.ag/fileadmin/HQ/02-Company/05-Media/2-Studies/STAUFEN.-studie-deutscher-industrie-4.0-index-2017-de_DE.pdf. [Zugriff am 25. 08. 2018].
- [43] M. Borrego, M. J. Foster und J. E. Froyd, „Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields,“ *Journal of Engineering Education*, Bd. 103, Nr. 1, pp. 45-76, 01. 2014.

- [44] J. Rowley und F. Slack, „Conducting a literature review,“ *Management research news*, Bd. 27, Nr. 6, pp. 31-39, 2004.
- [45] J. vom Brocke, A. Simons, B. Niehaves, K. Riemer, R. Plattfaut und A. Cleven, „Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process,“ *Ecis*, Nr. 9, pp. 2206-2217, 2009.
- [46] J. Cruz-Benito, „Systematic Literature Review & Mapping,“ GRIAL Research Group, 09. 11. 2016. [Online]. Available: <https://de.slideshare.net/knowledgesociety/systematic-literature-review-mapping>. [Zugriff am 03. 09. 2018].
- [47] A. Andrés, *Measuring academic research: How to undertake a bibliometric study*, Oxford, Elsevier, 2009.
- [48] D. Domingos, F. Martins und L. Caiola, „Decentralising Internet of Things Aware BPMN Business Processes,“ *International Conference on Sensor Systems and Software*, pp. 110-119, 2014.
- [49] S. Saraeian, B. Shirazi und H. Motameni, „Towards an extended BPMS prototype: Open challenges of BPM to flexible and robust orchestrate of uncertain processes,“ *Computer Standards & Interfaces* 57, pp. 1-19, 2018.
- [50] K. Suri, M. Alferez, S. Dhouib und S. Tucci-Piergiovanni, „Modeling Business Motivation and Underlying Processes for RAMI 4.0-Aligned Cyber-Physical Production Systems,“ *Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A)*, pp. 1-6, 2017.
- [51] F. Martins und D. Domingos, „Modelling IoT behaviour within BPMN Business Processes,“ *Procedia Computer Science* 121, pp. 1014-1022, 2017.
- [52] K. Dar, A. Taherkordi, H. Baraki, F. Eliassen und K. Geihs, „A resource oriented integration architecture for the Internet of Things: A business process perspective,“ *Pervasive and Mobile Computing* 20, pp. 145-159, 2015.
- [53] R. Braun, M. Burwitz, H. Schlieter und M. Benedict, „Clinical processes from various angles-amplifying BPMN for integrated hospital management,“ *Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), 2015 IEEE International Conference*, pp. 837-845, 2015.
- [54] M. I. Bocicor, A. J. Molnar und C. Taslitchi, „Preventing hospital acquired infections through a workflow-based cyber-physical system,“ *arXiv preprint, arXiv:1702.08010*, 2017.
- [55] D. Ruiz-Fernández, D. Marcos-Jorquera, V. Gilart-Iglesias, V. Vives-Boix und J. Ramírez-Navarro, „Empowerment of patients with hypertension through BPM, iot and remote sensing,“ *Sensors* 17(10), p. 2273, 2017.
- [56] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba und M. Mattsson, „Systematic Mapping Studies in Software Engineering,“ *EASE Vol.8*, pp. 68-77, 2008.
- [57] C. Chang, S. N. Srirama und R. Buyya, „Mobile cloud business process management system for the internet of things: A survey,“ *ACM Computing Surveys (CSUR)* 49(4), p. 70, 2017.
- [58] R. Seiger, C. Keller, F. Niebling und T. Schlegel, „Modelling complex and flexible processes for smart cyber-physical environments,“ *Journal of Computational Science* 10, pp. 137-148, 2015.

- [59] S. Meyer, A. Ruppen und L. Hilty, „The things of the internet of things in BPMN,“ *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, pp. 285-297, 2015.
- [60] K. Nagadi, L. Rabelo, M. Basingab, A. T. Sarmiento, A. Jones und A. Rahal, „A hybrid simulation-based assessment framework for smart manufacturing systems“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(2), pp. 115-128, 2018.
- [61] T. R. Rúbio, H. L. Cardoso und E. Oliveira, „Adaptive Multi-agent System for Smart Grid Regulation with Norms and Incentives,“ *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, pp. 315-322, 2016.
- [62] S. Cherrier und V. Deshpande, „From BPM to IoT,“ *International Conference on Business Process Management*, pp. 310-318, 2017.
- [63] R. Petrasch und R. Hentschke, „Process modeling for Industry 4.0 applications: Towards an Industry 4.0 process modeling language and method,“ *Computer Science and Software Engineering (JCSSE), IEEE*, pp. 1-5, 2016.
- [64] K. Suri, A. Cuccuru, J. Cadavid, S. Gérard, W. Gaaloul und S. Tata, „Model-based Development of Modular Complex Systems for Accomplishing System Integration for Industry 4.0,“ *MODELSWARD* , pp. 487-495, 2017.
- [65] G. Jin und F. W. Jäkel, „Execution and evaluation of enterprise models in IEM/MO,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (96)*, pp. 4517-4537, 2018.
- [66] A. Baumgraß, M. Botezatu, C. Di Ciccio, R. Dijkman, P. Grefen, M. Hewelt und H. Völzer, „Towards a methodology for the engineering of event-driven process applications,“ *International Conference on Business Process Management*, pp. 501-514, 2015.
- [67] D. Panfilenko, P. Poller, D. Sonntag, S. Zillner und M. Schneider, „BPMN for knowledge acquisition and anomaly handling in CPS for smart factories,“ *Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A), IEEE*, pp. 1-4, 2016.
- [68] N. Maryam und S. A. Khan, „Business process re-engineering for smart manufacturing,“ *Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference (UEMCON), IEEE*, pp. 424-430, 2017.
- [69] I. Graja, S. Kallel, N. Guermouche und A. H. Kacem, „BPMN4CPS: A BPMN extension for modeling cyber-physical systems,“ *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE), IEEE*, pp. 152-157, 2016.
- [70] I. Graja, S. Kallel, N. Guermouche und A. H. Kacem, „Time patterns for cyber-physical systems,“ *Computers and Communication (ISCC), IEEE*, pp. 1208-1211, 2016.
- [71] N. Galaske , D. Strang und R. Anderl, „Process deviations in cyber-physical production systems,“ *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 2)*, 2015.
- [72] R. Seiger, S. Huber, P. Heisig und U. Assmann, „Enabling self-adaptive workflows for cyber-physical systems,“ *Enterprise, Business-Process and Information Systems Modeling, Springer*, pp. 3-17, 2016.

- [73] A. Marrella und M. Massimo, „Cognitive Business Process Management for Adaptive Cyber-Physical Processes,“ *International Conference on Business Process Management*, Springer, pp. 429-439, 2017.
- [74] D. Chen , D. V. Panfilenko, M. R. Khabbazi und D. Sonntag, „A Model-Based Approach to Qualified Process Automation for Anomaly Detection and Treatment,“ *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, IEEE, pp. 1-8, 2016.
- [75] I. M. Culic und A. Radovici, „Development platform for building advanced Internet of Things systems,“ *Networking in Education and Research (RoEduNet)*, IEEE, pp. 1-5, 2017.
- [76] S. Meyer, K. Sperner, C. Magerkurth und J. Pasquier, „Towards modeling real-world aware business processes,“ *Proceedings of the Second International Workshop on Web of Things*, ACM, p. 8, 2011.
- [77] R. Martinho und D. Domingos, „Quality of information and access cost of IoT resources in BPMN processe,“ *Procedia Technology* 16, pp. 737-744, 2014.
- [78] D. Domingos, A. Respicio und R. Martinho, „Reliability of IoT-aware BPMN healthcare processes,“ *Internet of Things and Advanced Application in Healthcare*, IGI Global, pp. 214-248, 2017.
- [79] O. Bibani, C. Mourdadian, S. Yangui, R. H. Glitho, W. Gaaloul, N. B. Hadj-Alouane und P. Polakos, „A Demo of IoT Healthcare Application Provisioning in Hybrid Cloud/Fog Environment,“ *Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, pp. 472-475, 2016.
- [80] S. Schulte, P. Hoenisch, C. Hochreiner, S. Dustdar, M. Klusch und D. Schuller, „Towards process support for cloud manufacturing,“ *Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC)*, IEEE, pp. 142-149, 2014.
- [81] O. Skarlat, M. Borowski und S. Schulte, „Towards a methodology and instrumentation toolset for cloud manufacturing,“ *1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)*, IEEE, pp. 1-4, 2016.
- [82] G. Ówikła, A. Gwiazda, W. Banaś, Z. Monica und K. Foit, „Analysis of the possibility of SysML and BPMN application in formal data acquisition system description,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 227 Nr. 1, IOP, p. 012034, 2017.
- [83] E. Castellanos, C. A. Garcia, C. Rosero, C. Sanchez und M. V. Garcia, „Enabling an Automation Architecture of CPPs based on UML combined with IEC-61499,“ *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, IEEE, pp. 471-476, 2017.
- [84] F. Christoulakis und K. Thramboulidis, „IoT-based Integration of IEC 61131 Industrial Automation Systems: The case of UML4IoT,“ *Industrial Electronics (ISIE)*, IEEE, pp. 322-327, 2016.
- [85] H. Afzaal und N. A. Zafar, „Modeling of IoT-based Border Protection System,“ *Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, IEEE, pp. 1-6, 2017.
- [86] D. A. Robles-Ramirez, P. Escamilla-Ambrosio und T. Tryfonas, „IoTsec: UML extension for Internet of things systems security modelling,“ *Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)*, IEEE, pp. 151-156, 2017.

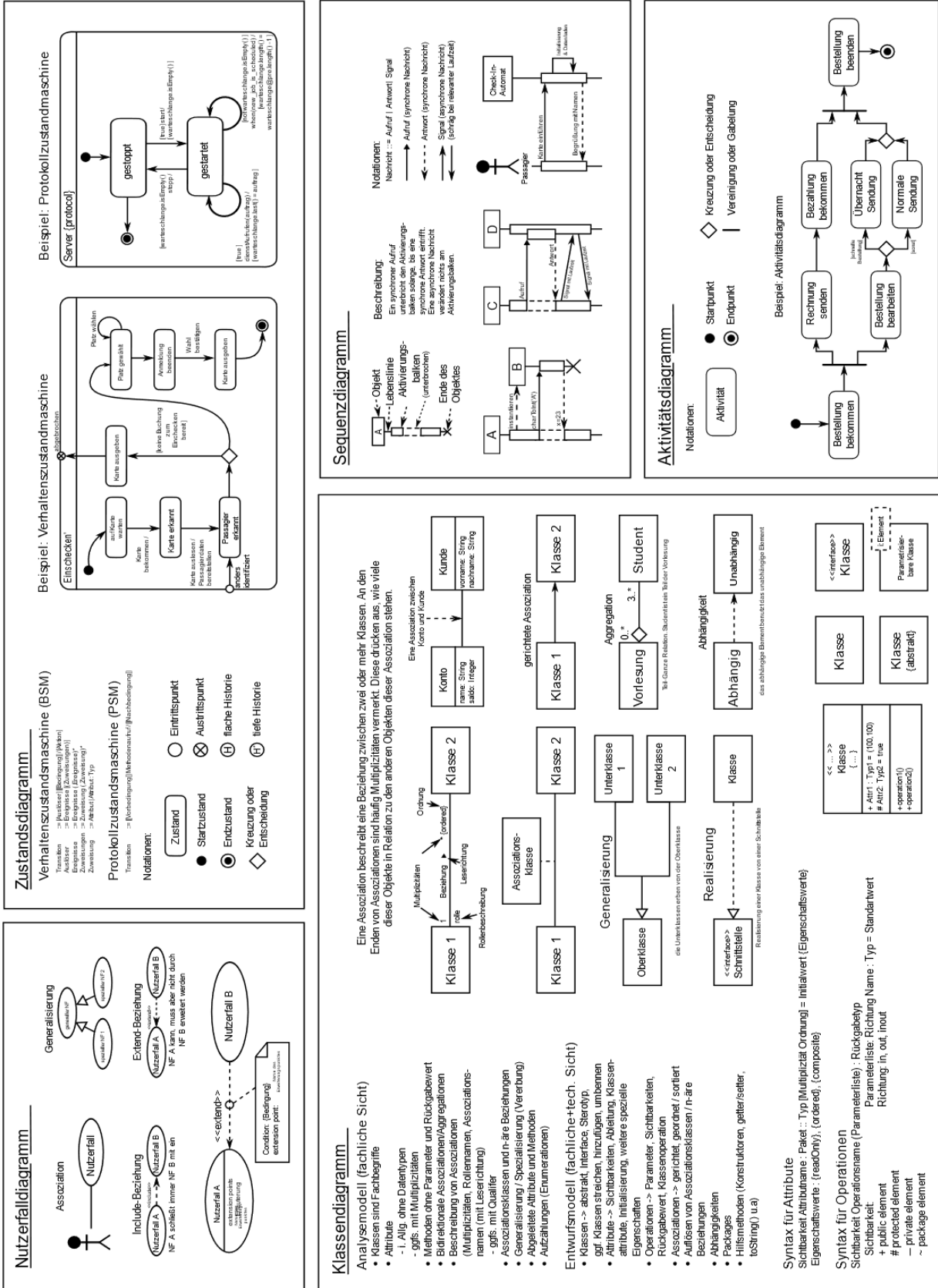
- [87] T. Eterovic, E. Kaljic, D. Donko, A. Salihbegovic und S. Ribic, „An Internet of Things Visual Domain Specific Modeling Language based on UML,“ *Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), IEEE*, pp. 1-5, 2015.
- [88] A. Marrella und M. Massimo, „Adaptive process management in cyber-physical domains,“ *Advances in Intelligent Process-Aware Information Systems, Springer*, pp. 15-48, 2017.
- [89] L. Rusu, B. Cramariuc, D. Bența und M. Mailat, „Implementing BPMN 2.0 scenarios for AAL@ Home solution,“ *International Journal of Computers Communications & Control 10.2*, pp. 230-237, 2015.
- [90] R. Braun und H. Schlieter, „Requirements-based development of bpmn extensions: The case of clinical pathways,“ *Interrelations between Requirements Engineering and Business Process Management (REBPM), IEEE*, pp. 39-44, 2014.
- [91] R. Braun, H. Schlieter, M. Burwitz und W. Esswein, „BPMN4CP Revised--Extending BPMN for Multi-perspective Modeling of Clinical Pathways.,“ *System Sciences (HICSS), IEEE*, pp. 3249-3258, 2016.
- [92] H. Yan, P. Van Gorp, U. Kaymak, X. Lu, L. Ji, C. C. Chiau und H. Duan, „Aligning event logs to task-time matrix clinical pathways in BPMN for variance analysis,“ *Journal of biomedical and health informatics 22.2, IEEE*, pp. 311-317, 2018.
- [93] I. Graja, S. Kallel, N. Guermouche und A. H. Kacem, „Modeling and verification of temporal properties in cyber-physical systems,“ *Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), IEEE*, pp. 325-330, 2017.
- [94] I. Graja, A. Mechim, S. Kallel, N. Guermouche und A. H. Kacem, „Demonstrating BPMN4CPS: Modeling and verification of cyber-physical systems,“ *Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), IEEE*, pp. 593-593, 2017.
- [95] H. H. Chiu und M. S. Wang, „Extending event elements of business process model for internet of things,“ *Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM), IEEE*, pp. 783-788, 2015.
- [96] K. S. Sang und B. Zhou, „BPMN security extensions for healthcare process,“ *Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing (CIT/IUCC/DASC/PICOM), IEEE*, pp. 2340-2345, 2015.
- [97] Object Management. Group, „OMG Systems Modeling Language,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.omgsysml.org/>. [Zugriff am 29. 09. 2018].
- [98] M. Vitali und B. Pernici, „Pie-processes in events: Interconnections in ambient assisted living,“ *OTM Confederated International Conferences- On the Move to Meaningful Internet System, Springer*, pp. 157-166, 2015.
- [99] M. Vitali und B. Pernici, „Interconnecting processes through IoT in a health-care scenario,“ *ISC2*, pp. 1-6, 2016.

- [100] G. Jin und F. W. Jäkel, „Execution and evaluation of enterprise models in IEM/MO 2 GO based on Petri net,“ *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9-12), pp. 4517-4537, 2018.
- [101] C. A. Petri und W. Reisig, „Petri net“. *Scholarpedia* 3(4):6477.
- [102] T. Westermann, H. Anacker und R. Dumitrescu, „IMPROVING ORDER FULFILLMENT PROCESSES WITH MBSE,“ *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 7*, pp. 237-246, 2017.
- [103] U. Fahrwinkel, „Methode zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering,“ *Dissertation*, 1995.
- [104] H. N. I. Paderborn, „VPS-Benchmark: Leitfaden zur Leistungssteigerung der Produktentwicklung durch den Einsatz von Virtual Prototyping & Simulation,“ 2012. [Online]. Available: http://www.viprosim.de/fileadmin/VPS-Benchmark/VPS-Benchmark_Leitfaden.pdf. [Zugriff am 29. 09. 2018].
- [105] S. Appel, P. Kleber, S. Frischbier, T. Freudenreich und A. Buchmann, „Modeling and execution of event stream processing in business processes,“ *Information Systems* 46, pp. 140-156, 2014.
- [106] unbekannter Ersteller, Wikipedia, „UML Diagramme,“ 2010. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:UML-Diagramme.svg#file>. [Zugriff am 24. 08. 2018].
- [107] BPMN Offensive Berlin, „BPMN Poster,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.bpmb.de/index.php/BPMNPoster>. [Zugriff am 23. 08. 2018].
- [109] verschiedene Autoren, „Digitalisierung nutzbar machen, Wege zum digitalen Geschäftsmodell, Digitalisierung ist mehr als reine Technologie,“ *Smart factory - So ziehen sie Gewinn aus dem Digital Twin ; atp magazin 08/2018*, pp. 82-97, 2018.
- [110] J. Luis und P. S. Dunston, „Integrating IoT into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations,“ *Automated in Construction* 94, pp. 317-327, 2018.
- [111] B. Bordel, R. Alcarria, D. S. de Rivera und T. Robles, „Process execution in Cyber-Physical Systems using cloud and Cyber-Physical Internet services,“ *The Journal of Supercomputing*, pp. 1-43, 2018.
- [112] E. d. S. Zancul, S. M. Takey und A. P. B. Barquet, „Business process support for IoT based product-service systems (PSS),“ *Business Process Management Journal* 22(2), pp. 305-323, 2016.
- [113] U. Raza, J. Lomax, I. Ghafir, R. Kharel und B. Whiteside, „An IoT and business processes based approach for the monitoring and control of high value-added manufacturing processes,“ *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, 2017.
- [114] W. van der Aalst, *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*, Springer: Berlin, 2011.

- [115] B. Di Martino, A. Esposito und G. Cretella, „From Business Process Models to Cloud Deployment: A Semantic Approach,“ *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2016 30th International Conference*, pp. 121-126, 2016.
- [116] D. Campagna, S. Costanzo, C. Kavka, A. Turco und C. Poloni, „Leveraging the BPMN standard to govern engineering processes in a collaborative environment,“ *Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium*, pp. 318-323, September 2015.
- [117] G. Meroni und P. Plebani, „Artifact-Driven Monitoring for Human-Centric Business Processes with Smart Devices: Assessment and Improvement,“ September 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Giovanni_Meroni/publication/320471893_BPM-Forum-2017_Presentation/data/59e76f1b4585152d5f04f030/BPM-Forum-2017-Presentation.pdf. [Zugriff am 24. 09. 2018].

Anhang

Abbildung A - 1: Beispielhafte UML Diagrammübersicht [106]



Aktivitäten

Aufgabe
Eine Aufgabe ist eine Aktivität, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

Transaktion
Eine Transaktion ist eine Gruppe von Aktivitäten, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

Ergebnis-Teilprozess
Ein Ergebnis-Teilprozess ist eine Gruppe von Aktivitäten, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

Aufgabe-Aktivität
Eine Aufgabe-Aktivität ist eine Gruppe von Aktivitäten, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

Markierungen
Sie beschreiben das Verhalten von Aktivitäten.

- Teilprozess
- Sendung
- Empfangen
- Benutzer
- Manuell
- Isoliertes Ereignis
- Service
- Start

Standardfluss
Standardfluss

Bedingter Fluss
Bedingter Fluss

Standardfluss
Standardfluss

Bedingter Fluss
Bedingter Fluss

Standardfluss
Standardfluss

Bedingter Fluss
Bedingter Fluss

Gateways

Exklusives Gateway
Bei einer Verzweigung wird der Fluss abhängig von bestimmten Bedingungen zu genau einer ausgehenden Lane weitergeleitet. Ein Fluss, der auf ein exklusives Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren. Diesem Gateway folgen zwei oder mehrere Ereignisse oder Empfänger-Aufgaben. Der Sequenzfluss wird zu dem Ereignis geleitet, das zuerst eintritt.

Ergebnis-basiertes Gateway
Wenn der Sequenzfluss verzweigt wird, werden alle ausgehenden Lanes simultan aktiviert. Bei der Zusammenführung wird auf alle eingehenden Lanes gewartet, bevor der ausgehende Sequenzfluss aktiviert wird (Synchronisation).

Inklusives Gateway
Es werden je nach Bedingung ein oder mehrere ausgehende Lanes simultan aktiviert. Ein Fluss, der auf ein inklusives Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.

Paralleles Gateway
Ein Fluss, der auf ein paralleles Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren. Ein Fluss, der auf ein paralleles Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.

Exklusives Ergebnis-basiertes Gateway (Instanzsteuerung)
Ein Fluss, der auf ein exklusives Ergebnis-basiertes Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren. Ein Fluss, der auf ein exklusives Ergebnis-basiertes Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.

Paralleles Ergebnis-basiertes Gateway (Instanzsteuerung)
Ein Fluss, der auf ein paralleles Ergebnis-basiertes Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren. Ein Fluss, der auf ein paralleles Ergebnis-basiertes Gateway zeigt, wird als eingehender Fluss bezeichnet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.

Konversationen

Konversationen
Eine Konversation ist eine Gruppe von Aktivitäten, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

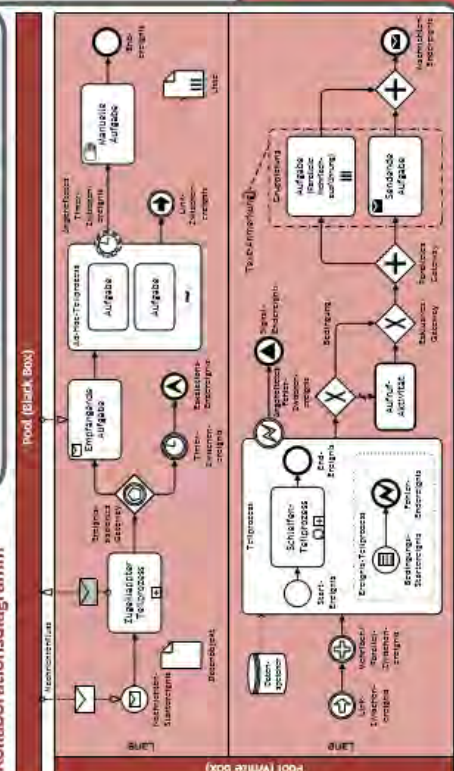
Konversationsdiagramm
Ein Konversationsdiagramm stellt die Kommunikation zwischen Teilnehmerrollen dar. Es zeigt die Rollen, die an der Konversation teilnehmen, und die Nachrichten, die zwischen ihnen ausgetauscht werden.

Choreographien

Choreographien
Eine Choreographie ist eine Gruppe von Aktivitäten, die als Teilprozess dargestellt werden kann. Ein zusätzliches markiert eine Aktivität als zusätzlichen Teilprozess.

Choreographie-Diagramm
Ein Choreographie-Diagramm stellt die Interaktion zwischen Teilnehmerrollen dar. Es zeigt die Rollen, die an der Choreographie teilnehmen, und die Nachrichten, die zwischen ihnen ausgetauscht werden.

Kollaborationsdiagramm



Ereignisse

Start	Ergebnis-Teilprozess	Ergebnis	Ergebnis-Teilprozess	Zwischen	Zwischen	Ausgang	Ende

Abbildung A - 3: Verhalten bei Auftreten einer Abweichung im CPPS [71]

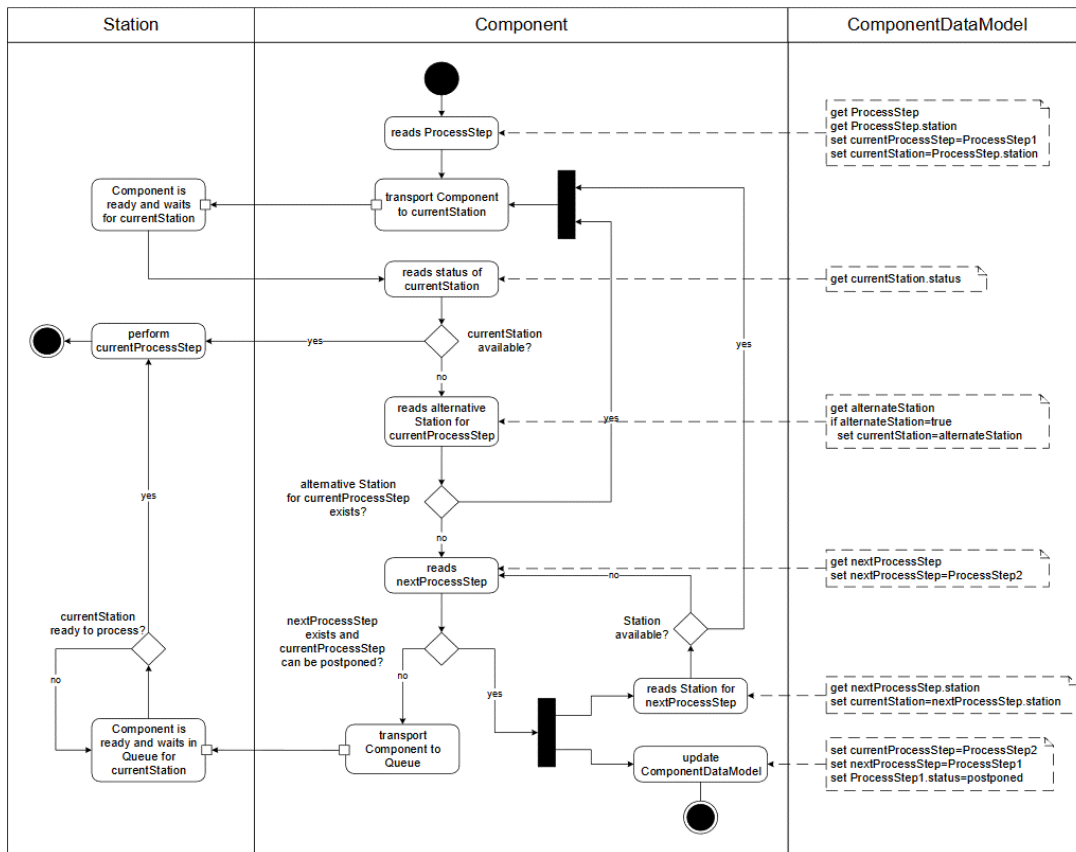


Abbildung A - 4: Metamodell eines cyber-physischen Fertigungsprozesses [71]

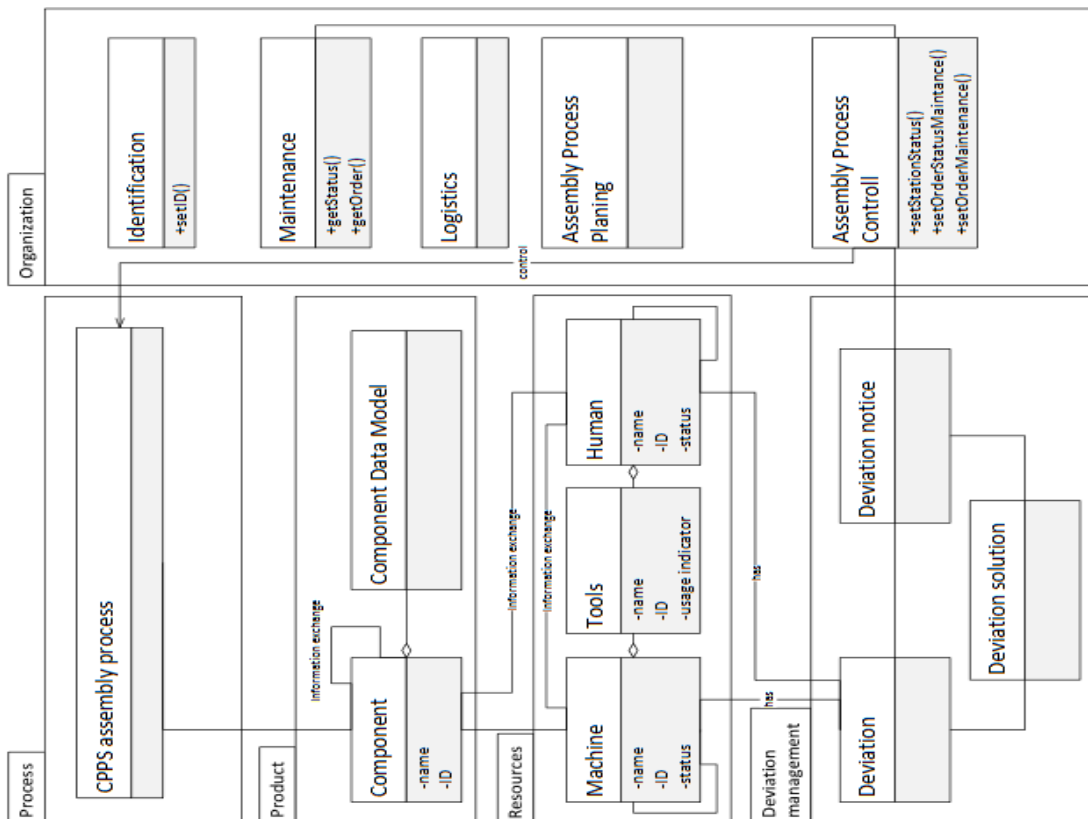


Abbildung A - 5: Anwendungsfalldiagramm am Beispiel „Grenzschutz“ [85]

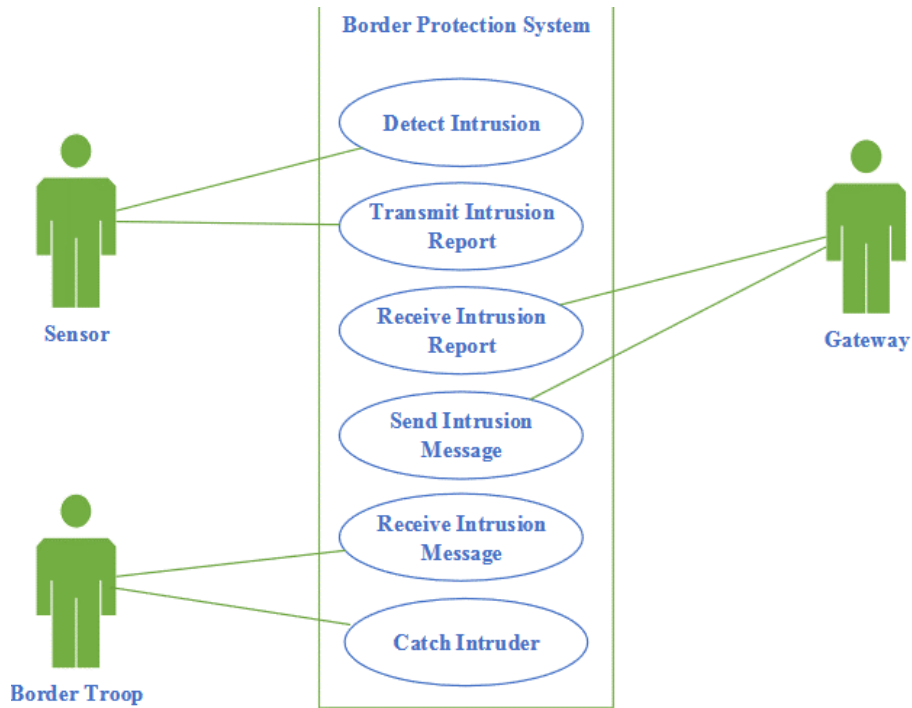


Abbildung A - 6: Sequenzflussdiagramm am Beispiel „Grenzschutz“ [85]

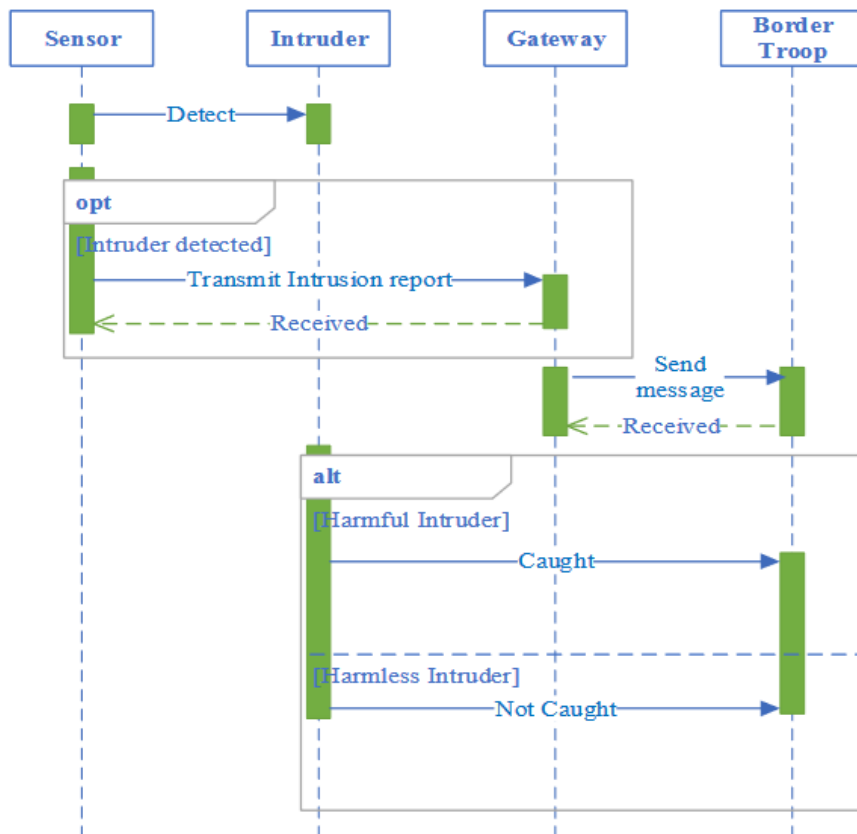


Abbildung A - 7: Rollen und Anwendungsfalldiagramm in IoTsec [86]

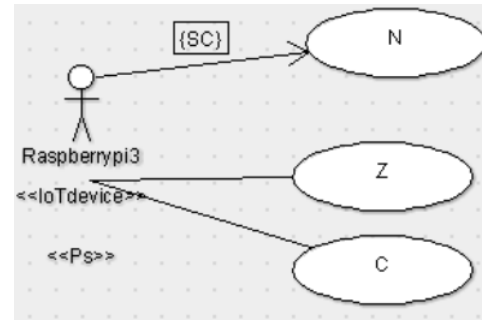
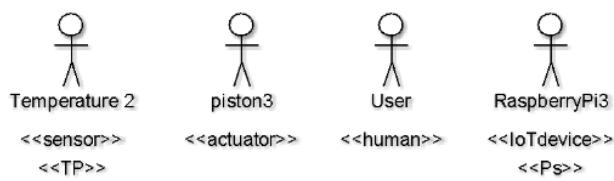


Abbildung A - 8: Kommunikationsdiagramm in IoTsec [86]

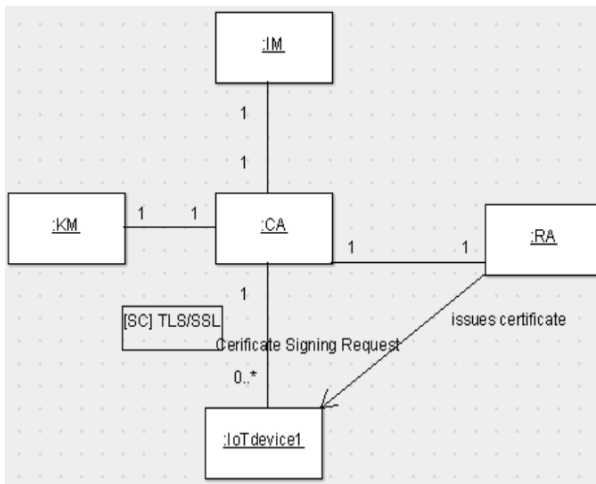


Abbildung A - 10: Aktivitätsdiagramm in IoTsec [86]

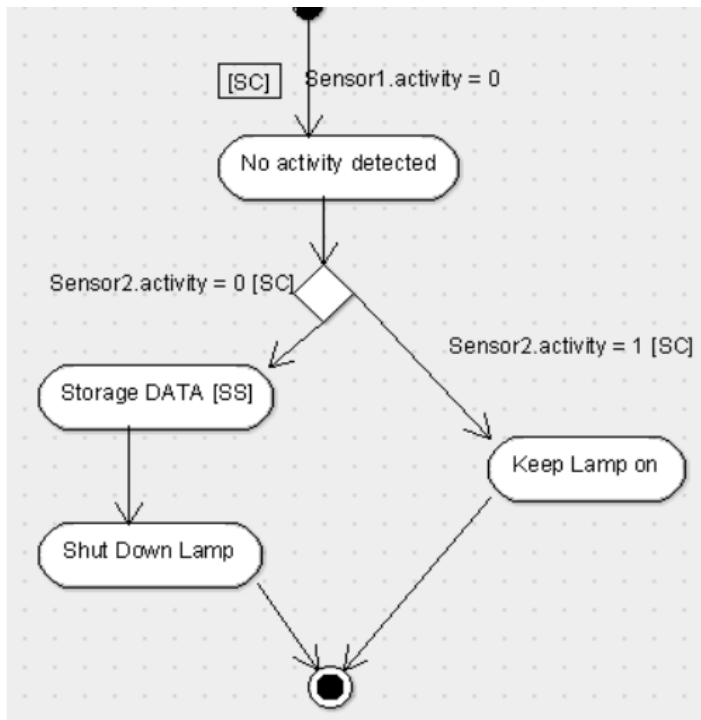


Abbildung A - 9: Verwendete Abkürzungen [86]

- N: Authentication
- Z: Authorization
- C: Cypher
- D: Decipher
- SS: Secure Storage
- SC: Secure Communication
- B&B: IoT Broker or Bridge
- T&R: Trust and Reputation
- KM: Key Management
- IM: Identity Management
- Ps: Pseudonym
- CA: Certification Authority
- RA: Registration Authority
- TP: Tampering Protection
- CC: Custom Control

Abbildung A - 12: Physische Aktivitäten [69]

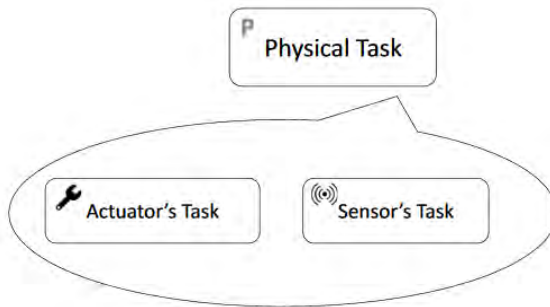


Abbildung A - 11: Cyber-Aktivitäten [69]

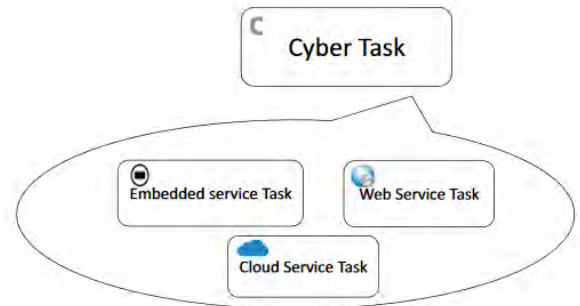


Abbildung A - 13: BPMN4CPS-Modell eines Rettungsdrohneinsatzes [69]

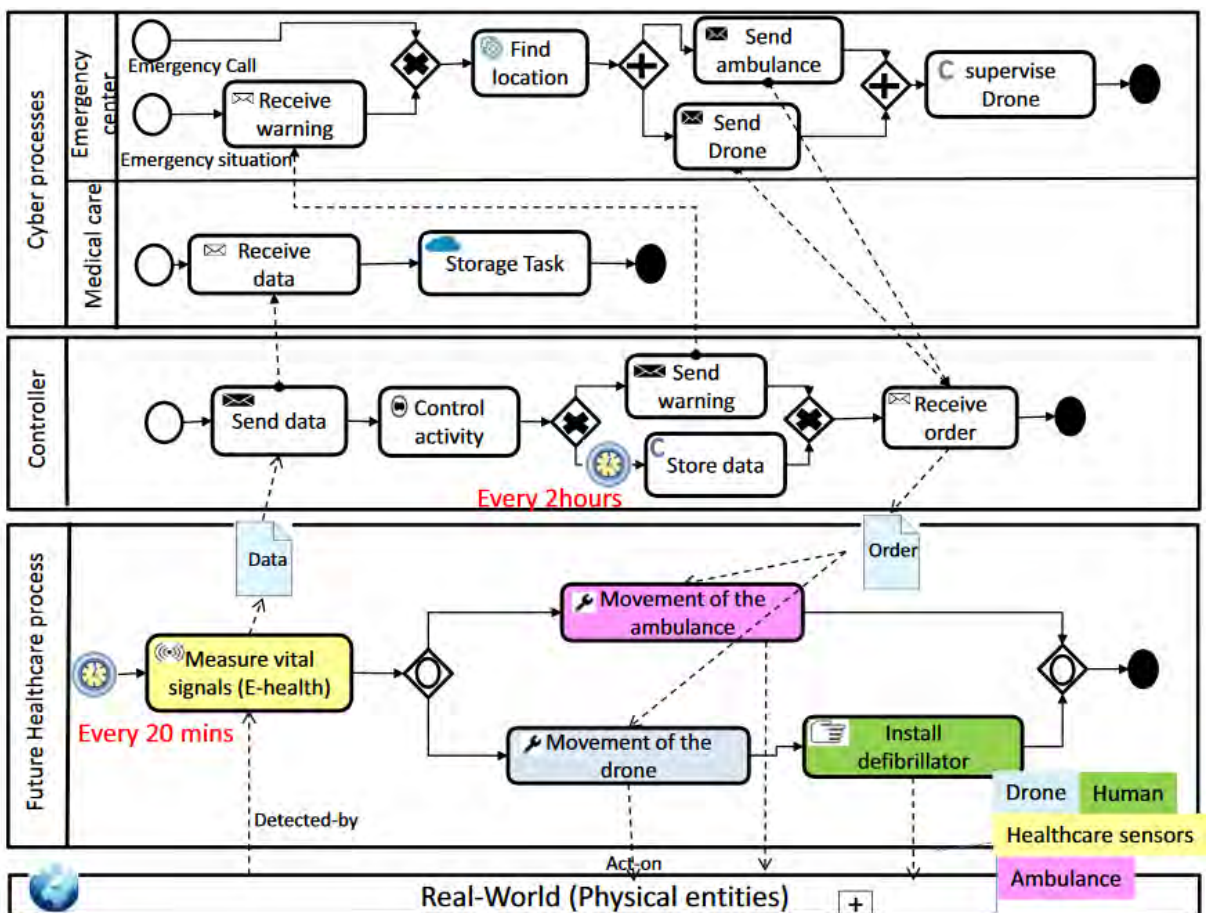


Abbildung A - 14: Erweiterte Elemente und Sicherheitsindikatoren [96]

Element	Type	Design	Security Indicator	Low	Medium	High
Security Task	Task					
Authentication	Boundary Event		Confidentiality			
Access Control	Boundary Event					
Authorization	Boundary Event		Integrity			
Harm Protection	Boundary Event					
Encrypted Message	Intermediate Event		Availability			
Non Repudiation	Intermediate Event					
Secure Communication	Intermediate Event					

Abbildung A - 15: BPMN-Prozessmodell mit Sicherheitserweiterungen [96]

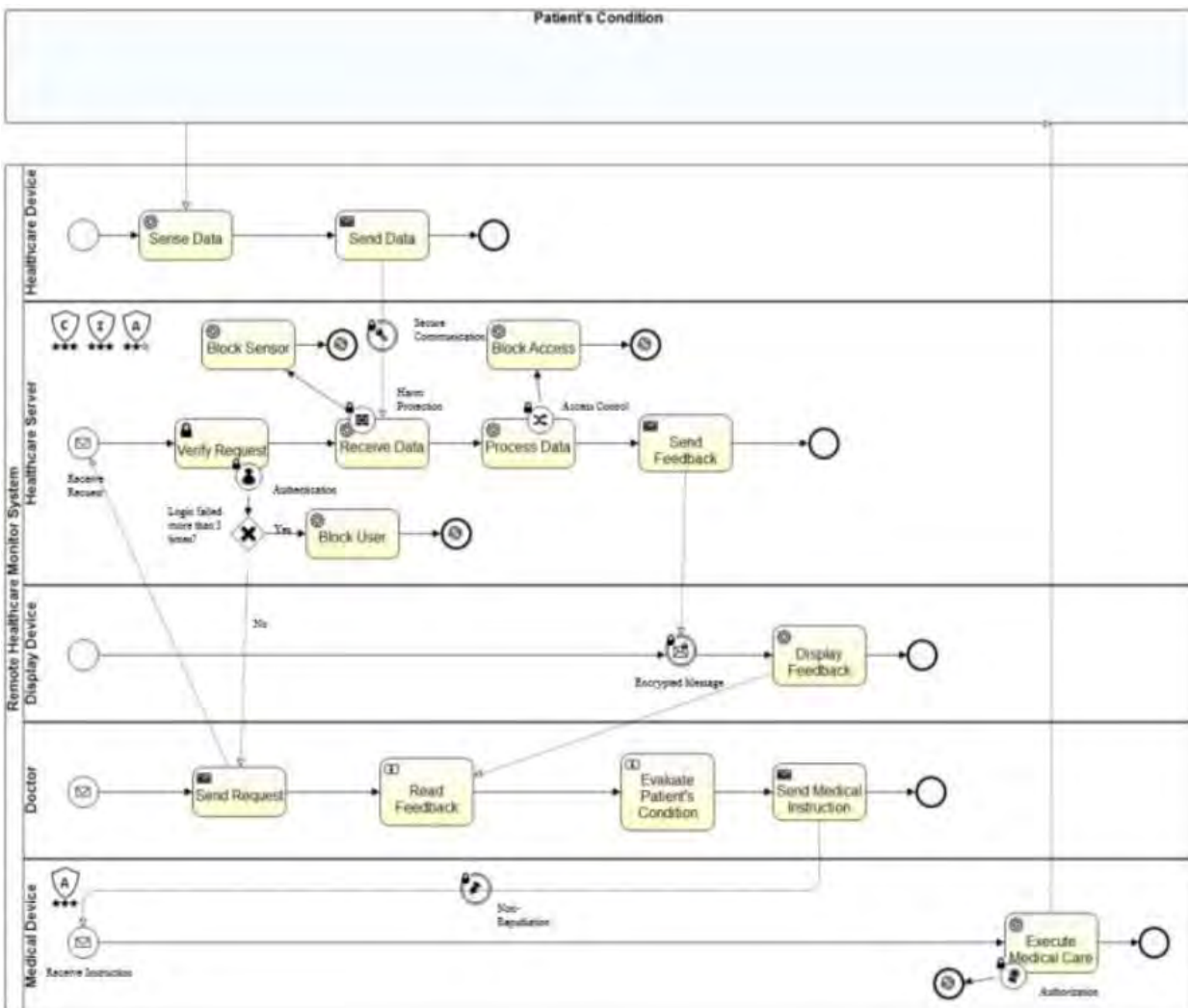


Abbildung A - 16: I4PML-spezifische Icons für BPMN [63]

Icon	Description	Used for
	Mobility Aspect	Partition, Pool, Lane
	Actuation Task	Task
	Sensing Task	Task
	IoT Device	Partition
	Human Computer Interface	Partition, Task
	Real/device data object	Data Object
	Real world/device data store	Central Buffer
	Cloud App, also as public, private or hybrid Cloud	Partition, Pool

Abbildung A - 17: Anforderungs- und Anwendungsfalldiagramme in SysML [63]

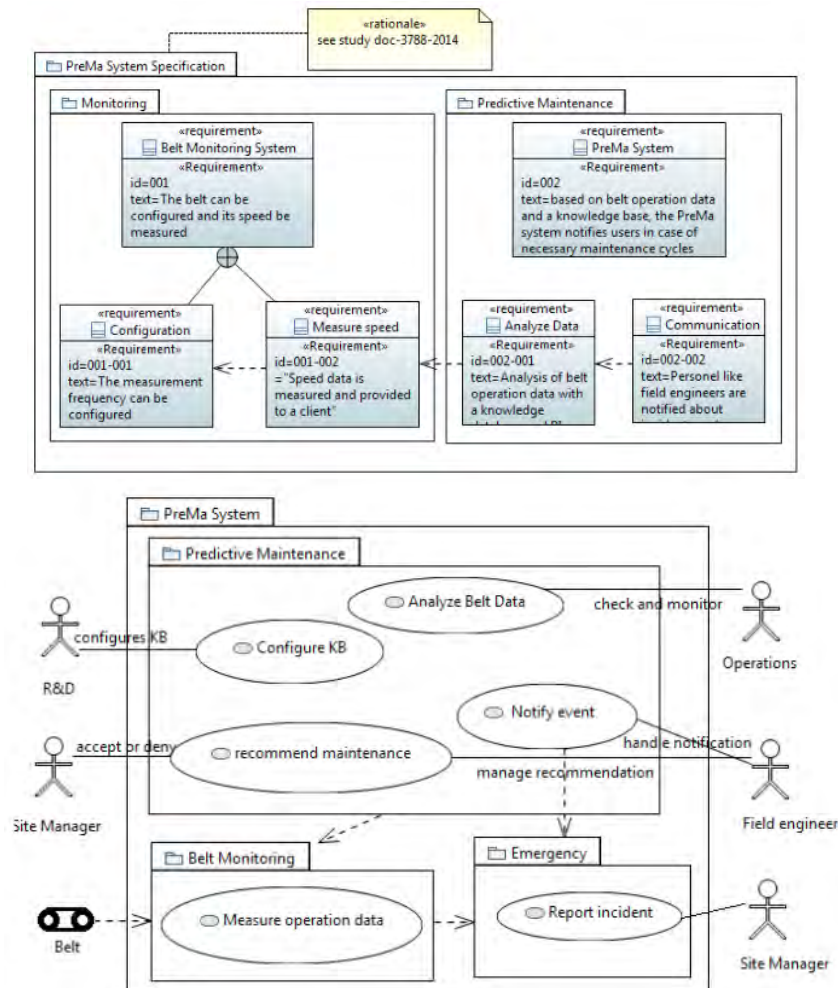


Abbildung A - 18: Prozesse im Fertigungsablauf mit OMEGA [102]

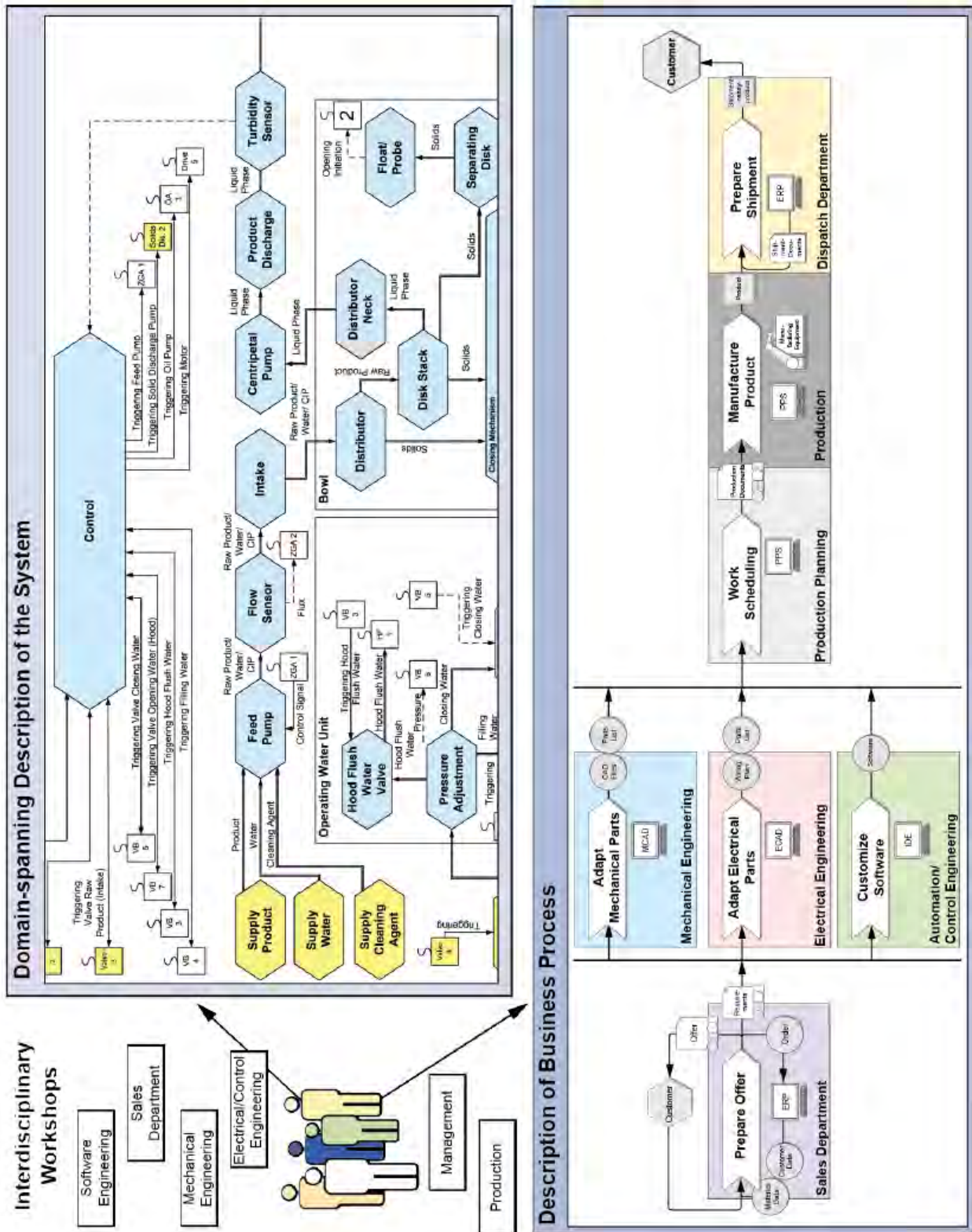


Abbildung A - 19: Erweiterungselemente der EPK mit SPUs

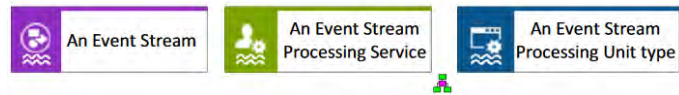


Abbildung A - 20: Zuteilungsdiagramm zur Beschreibung einer SPU- Aufgabe [105]

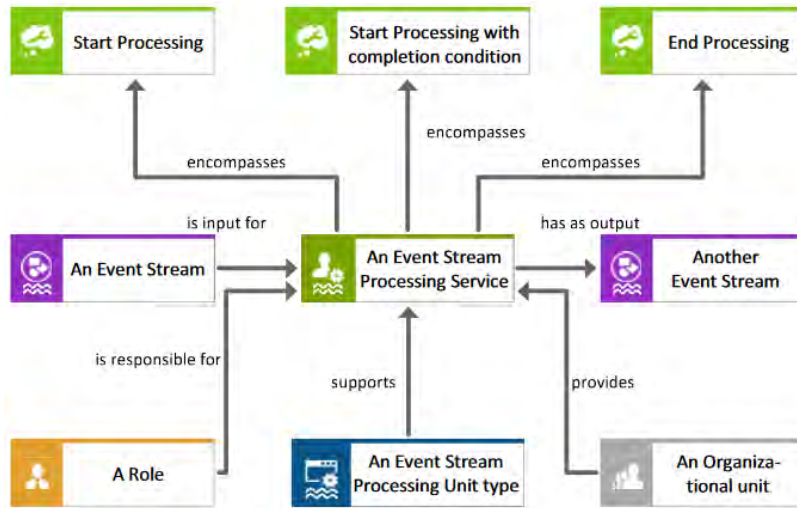


Abbildung A - 21: Überwachung eines Versandprozesses als EPK mit SPUs [105]

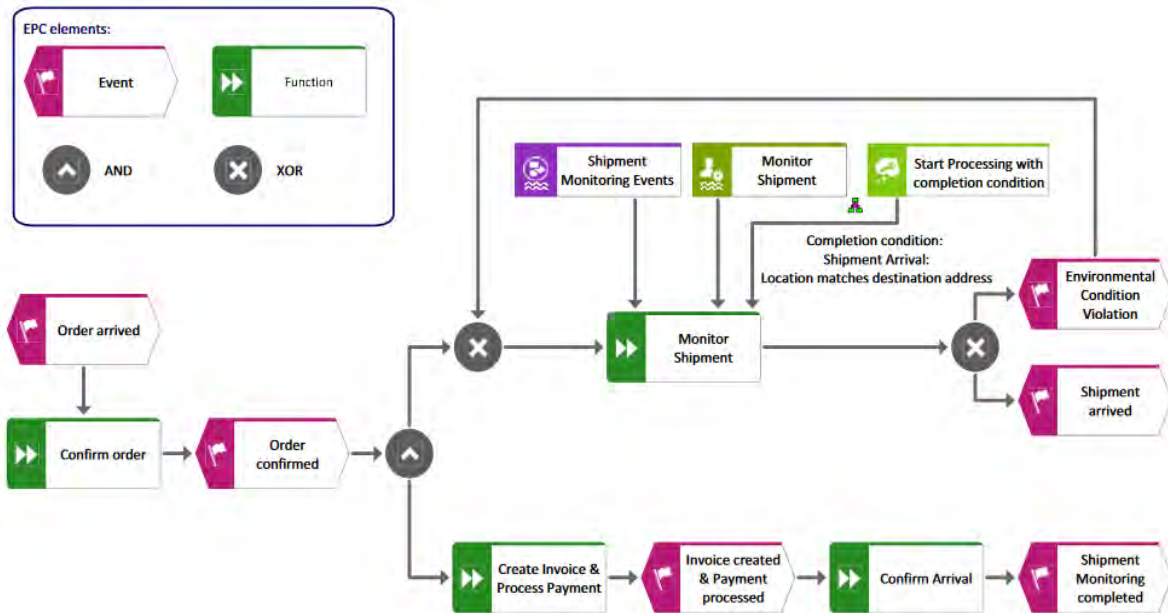
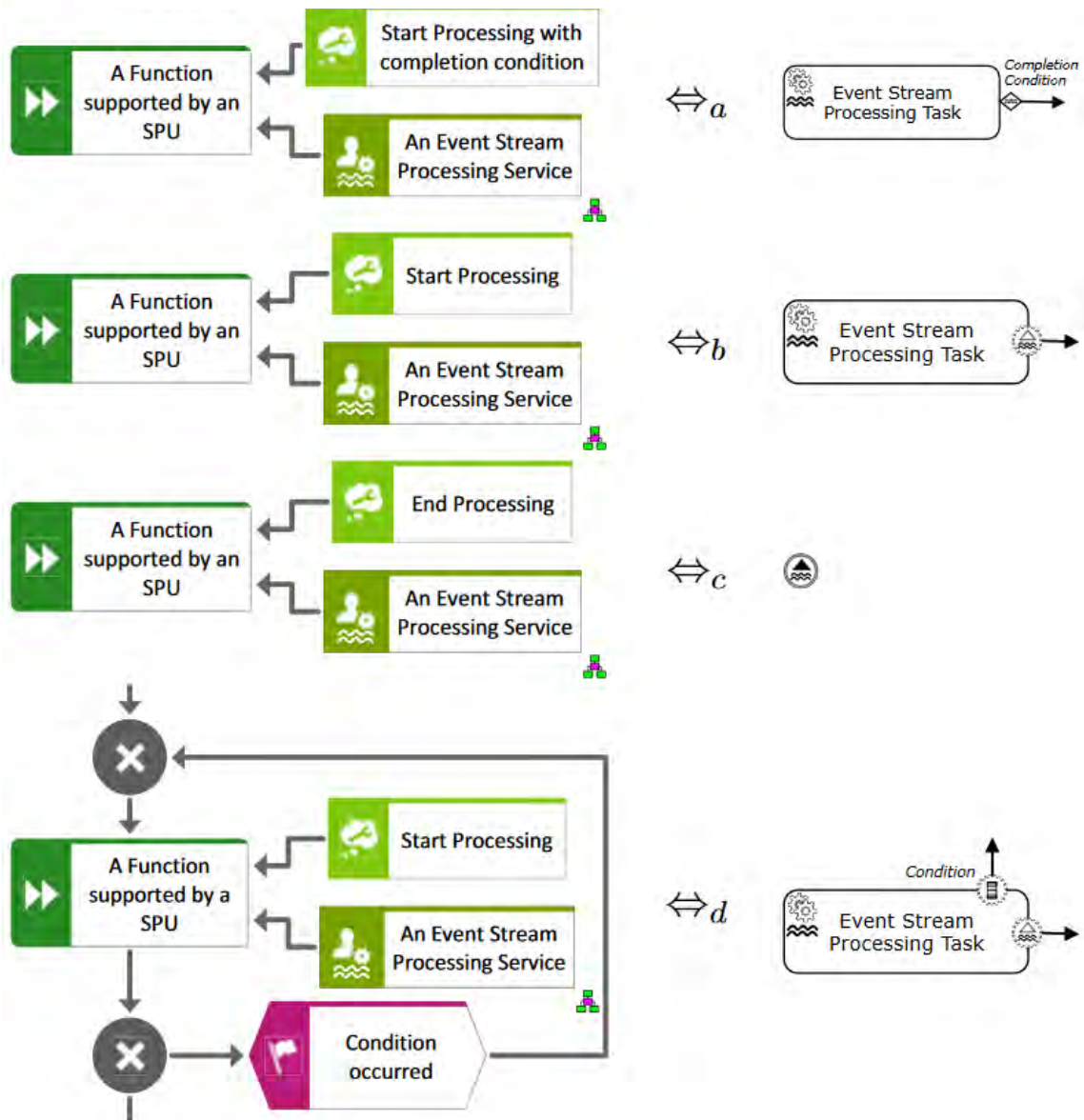


Abbildung A - 22: Transformationen der SPUs zwischen EPK und BPMN [105]



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BPM-Lebenszyklus, in Anlehnung an [13]	8
Abbildung 2: Sichten und Schichten des ARIS-Haus, in Anlehnung an [11]	9
Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des industriellen Fortschritts, in Anlehnung an [27]	14
Abbildung 4: Cyber-physische Systeme als Teil des IoT und IoS, in Anlehnung an [2]	17
Abbildung 5: Prozentuale Verteilung der BITKOM-Studie auf die Marktsegmente [41].....	20
Abbildung 6: Unternehmensbereiche mit Planung bzw. Einsatz von I4.0-Konzepten [42]	21
Abbildung 7: Motive der Unternehmen für Digitalisierungsmaßnahmen [42]	22
Abbildung 8: Jährliche Anzahl an Veröffentlichungen von 2014 bis Juni 2018	34
Abbildung 9: Übersicht der beteiligten Forschungsnationen.....	35
Abbildung 10: Übersicht der Forschungsgebiete.....	36
Abbildung 11:Formale Einteilung der Publikationen hinsichtlich ihres Forschungsbeitrages	38
Abbildung 12: Übersicht der Basiselemente der I4.0.....	40
Abbildung 13: Anzahl der Dokumente mit Bezug zu BPMN oder UML	45
Abbildung 14: Prozesslogik in BPMN4CPS [69].....	48
Abbildung 15: Vorbeugende Instandhaltung eines Förderbandes in I4PML [63]	50
Abbildung 16: Überblick über die Elemente der Methode OMEGA [104].....	52
Abbildung 17: SPU-erweiterte Elemente zur Versandüberwachung in BPMN [105].....	53
Abbildung A - 1: Beispielhafte UML Diagrammübersicht [106]	66
Abbildung A - 2: Elemente der Business Process Model and Notation 2.0 [107].....	67
Abbildung A - 3: Verhalten bei Auftreten einer Abweichung im CPPS [71]	68
Abbildung A - 4: Metamodell eines cyber-physischen Fertigungsprozesses [71].....	68
Abbildung A - 5: Anwendungsfalldiagramm am Beispiel „Grenzschutz“ [85]	69
Abbildung A - 6: Sequenzflussdiagramm am Beispiel „Grenzschutz“ [85]	69
Abbildung A - 7: Rollen und Anwendungsfalldiagramm in IoTsec [86].....	70
Abbildung A - 8: Kommunikationsdiagramm in IoTsec [86]	70

Abbildung A - 9: Verwendete Abkürzungen [86].....	70
Abbildung A - 10: Aktivitätsdiagramm in IoTsec [86]	70
Abbildung A - 11: Cyber-Aktivitäten [69].....	71
Abbildung A - 12: Physische Aktivitäten [69]	71
Abbildung A - 13: BPMN4CPS-Modell eines Rettungsdrohneinsatzes [69]	71
Abbildung A - 14: Erweiterte Elemente und Sicherheitsindikatoren [96]	72
Abbildung A - 15: BPMN-Prozessmodell mit Sicherheitserweiterungen [96].....	72
Abbildung A - 16: I4PML-spezifische Icons für BPMN [63]	73
Abbildung A - 17: Anforderungs- und Anwendungsfalldiagramme in SysML [63]	73
Abbildung A - 18: Prozesse im Fertigungsablauf mit OMEGA [102]	74
Abbildung A - 19: Erweiterungselemente der EPK mit SPUs [105].....	75
Abbildung A - 20: Zuteilungsdiagramm zur Beschreibung einer SPU- Aufgabe [105].....	75
Abbildung A - 21: Überwachung eines Versandprozesses als EPK mit SPUs [105]	75
Abbildung A - 22: Transformationen der SPUs zwischen EPK und BPMN [105]	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anwendungsbeispiele von CPS in verschiedenen Bereichen	18
Tabelle 2: Begriffe der Prozessmodellierung.....	28
Tabelle 3: Begriffe der Industrie 4.0	28
Tabelle 4: Wünschenswerte Eigenschaften von Prozessmodellen im Kontext der I4.0	44

Name: Erik Waschkus

Matrikelnummer: 757644

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Erik Waschkus

Ulm, den.....