



Stuttgarter Schriften zur
Unternehmenssoftware
Nummer 8

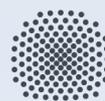
HERAUSFORDERUNGEN BEI DER PRODUKTENTWICKLUNG VON CYBER-PHYSISCHEN SYSTEMEN

Kleophas Model
Felix Schönhofen

Stuttgart, Mai 2022



Betriebswirtschaftliches Institut,
Abt. VIII: Wirtschaftsinformatik II



Universität Stuttgart

AUTOREN

Kleophas Model
Felix Schönhofen

TITEL

HERAUSFORDERUNGEN BEI DER PRODUKTENTWICKLUNG
VON CYBER-PHYSISCHEN SYSTEMEN

Stuttgarter Schriften zur Unternehmenssoftware
Nummer 8
Universität Stuttgart, Mai 2022

ISSN: 1865-388X

IMPRESSUM

Universität Stuttgart
Betriebswirtschaftliches Institut
Abt. VIII: Wirtschaftsinformatik II (Software-intensive Business)
Keplerstraße 17
70174 Stuttgart
Tel.: +49 (0) 711 685 82385
Web: <https://www.wius.bwi.uni-stuttgart.de>

GESTALTUNG

Kleophas Model & Felix Schönhofen

BILDNACHWEIS

everythingispossible – fotalia.com (Titelblatt)

COPYRIGHT

© 2022 Betriebswirtschaftliches Institut, Abteilung VIII: Wirtschaftsinformatik II

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
1. Einführung	1
1.1 Problemstellung & Motivation	1
1.2 Begrifflich-konzeptionelle Grundlagen	3
1.2.1 Cyber-physische Systeme	3
1.2.2 Produktentwicklung	6
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen	17
1.4 Forschungsmethodik & Aufbau der Arbeit	19
2. Vorgehensweise zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse	23
3. Herausforderungen bei der Produktentwicklung von cyber-physischen Systemen	31
3.1 Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse zur Erhebung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung einfacher Produkte	32
3.2 Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse zur Erhebung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung hybrider Produkte	36
3.3 Herausforderungen bei der Produktentwicklung von cyber-physischen Systemen	42
3.3.1 Multidisziplinarität	42
3.3.2 Orientierung am Kunden	46
3.3.3 Orientierung am Ökosystem	47
3.3.4 Einflussfaktor Mensch	49
3.3.5 Ungewissheit hinsichtlich des Systemverhaltens	50
3.3.6 Hohe Qualitätsanforderungen	52
3.3.7 Ökonomische Einflussfaktoren	55
3.3.8 Requirements Engineering	57
3.3.9 Flexibilität	59
3.3.10 Datenmanagement	60
3.3.11 Systemmodellierung	62
3.3.12 Umfang und Komplexität des Lösungsraums	63

3.3.13	Abstimmung mit dem Geschäftsmodell.....	64
3.3.14	Methodische und toolbasierte Unterstützung.....	65
4.	Schlussbetrachtung.....	67
4.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	67
4.2	Kritische Würdigung der Arbeit.....	69
4.3	Ausblick.....	71
Anhang	VII
Literaturverzeichnis	XVII
Erklärung	XXIX

Abkürzungsverzeichnis

CPS	cyber-physisches System
DSRM	Design Science Research Methodology
DVP	Digitalisiertes, vernetztes Produkt
ES	Eingebettetes System
FF	Forschungsfrage
HFF	Hauptforschungsfrage
IoT	Internet of Things
PSS	Produkt-Service-Systeme
SiB	Software-intensive Business
SPSS	Software-Produkt-Service-Systeme
WI	Wirtschaftsinformatik

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwiebschalenstruktur zur Abgrenzung eines ES von einem CPS.	4
Abbildung 2: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221-1 (2018). 10	
Abbildung 3: Forschungsdesign der Arbeit.....	22
Abbildung 4: Phasenmodell zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse	31
Abbildung 5: Verlauf der durchgeführten Literatursuche	38
Abbildung 6: Vorläufiges Affinitätsdiagramm zur Strukturierung der Herausforderungen nach Anwendung der KJ Methode	XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Taxonomie zur Charakterisierung von Literaturanalysen	25
Tabelle 2: Übersicht der Datenbanken, Suchkriterien und Anzahl der Suchtreffer ...	35
Tabelle 3: Übersicht der Datenbanken, Suchkriterien und Anzahl der Suchtreffer ...	37
Tabelle 4: Konzeptmatrix, die die Problemfelder den zugrundeliegenden Analysedomänen und Literaturquellen zuordnet	42
Tabelle 5: Finale Zuordnung der 91 identifizierten Herausforderungen zu den 14 Problemfeldern nach Durchführung der KJ Methode	XVI

1. Einführung

1.1 Problemstellung & Motivation

Ergebnisse einer aktuellen Studie des Bitkom e.V. vom April 2019 bringen einen zunehmenden, durch die Digitalisierung bedingten, Wettbewerbsdruck zum Ausdruck. Dieser Studie zu Folge sehen 60 Prozent der befragten Unternehmen eine Bedrohung des eigenen Geschäftsfeldes durch Unternehmen aus anderen Branchen, die durch die Digitalisierung und Neuausrichtung ihres Geschäftsfeldes zu direkten Wettbewerbern werden. Ein Großteil der befragten Unternehmen versucht darauf zu reagieren, indem das bestehende Produkt- und Dienstleistungsportfolio digitalisiert und den Marktbedürfnissen angepasst wird bzw. gänzlich neue Leistungen entwickelt werden. Dennoch schreiten nur wenige Unternehmen zu einer proaktiven Entwicklung digitaler Geschäftsmodelle und der Nutzung neuer Technologien, wie beispielsweise dem Internet of Things (IoT).¹ Das IoT beschreibt das Paradigma der Vernetzung vielzähliger Geräte und Dienste über das Internet.² So sollen im Jahr 2019 bereits 26 Milliarden Geräte vernetzt sein; bis 2025 werden 75 Milliarden Geräte im IoT prognostiziert.³ Die Vernetzung der Geräte und Dienste im IoT wird durch einen hohen Softwareanteil innerhalb dieser Produkte bewerkstelligt. Unternehmen stehen vor der Herausforderung ihre Geschäftsmodelle entsprechend einer Wertschöpfung durch software-intensive Produkte innerhalb von kooperativen Wertschöpfungsnetzwerken auszurichten, um dem hohen Wettbewerbsdruck gerecht werden zu können. Im Kontext dieser Problemstellung wurde im Rahmen eines Dagstuhl Seminars im Mai 2018 die Wissenschaftsdisziplin des *Software-intensive Business (SiB)* gegründet. Diese widmet sich einer softwarebasierten Wertschöpfung innerhalb eines Unternehmens und über Unternehmensgrenzen hinweg durch methodische Unterstützung, als Reaktion auf Veränderungen in der Umwelt.⁴ Dabei werden sechs Forschungsbereiche skizziert, die es in zukünftiger Forschungsarbeit zu adressieren gilt: 1) Definition und Verwendung von Kernkonzepten, 2) SiB Lebenszyklus, 3) Zukünftige Geschäftsmodelle, 4) Rolle neuer Technologien, 5) Voranbringen von Innovationen und 6) Voranbringen der Forschungsdisziplin.⁵

¹ Vgl. Bitkom (2019), URL siehe Literaturverzeichnis

² Vgl. Atzori u.a. (2010), S. 2787

³ Vgl. Statista (2019), URL siehe Literaturverzeichnis

⁴ Vgl. Werder u.a. (2018), S. 193-194

⁵ Vgl. Werder u.a. (2018), S. 195

Sogenannte *cyber-physische Systeme (CPS)* gelten als technologische Grundlage des IoT.⁶ Sie bilden den Verbund aus computergestützten Teilsystemen, die über Kommunikationsverbindungen mit Ihrer Umwelt und anderen Systemen in Verbindung stehen. Dies führt zu einer Konvergenz des virtuellen Raums und der physischen Realität.⁷ Mikusz (2014) konzeptualisiert CPS als dreidimensionale hybride Leistungsbündel bestehend aus tangiblen Komponenten, Softwarekomponenten und Dienstleistungskomponenten. Der Softwarekomponente ist dabei eine zunehmende Relevanz zu zuschreiben.⁸ Aus diesem Grund gelten CPS als Betrachtungsgegenstand des SiB und sollen in der folgenden Arbeit entsprechend behandelt werden.

Die Multidisziplinarität von CPS impliziert eine Konvergenz von bislang separat behandelten Disziplinen, die sich in ihren Eigenschaften deutlich unterscheiden. Die dadurch entstehende Komplexität stellt Unternehmen vor die Herausforderung die Produktentwicklung von CPS zu bewältigen.⁹ Anderl u.a. (2012) sowie Broy (2010) verdeutlichen die Notwendigkeit neuer Vorgehensweisen und Tools zur Beherrschung der Produktentwicklung von CPS.¹⁰ Dabei gilt es Vorgehensweisen und Tools zu erarbeiten, die die Produktentwicklung eines in sich kohärenten Gesamtsystems erlauben. Entsprechende Abhängigkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Disziplin müssen in Einklang gebracht werden.¹¹

Die problemzentrierte Erarbeitung methodischer Unterstützung für die Produktentwicklung von CPS bedarf einer Übersicht über vorliegende Herausforderungen. Diese sind bislang weder vollständig erhoben noch in dem Umfang kommunizierbar dargestellt als dass weitere Forschungsarbeiten darauf aufbauen können. In der vorliegenden Arbeit sollen die Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS identifiziert werden und in einer geeigneten Form für weitere Forschungsarbeit, v.a. im Kontext des SiB¹², zugänglich gemacht werden. Aus der Zielsetzung lässt sich folgende Hauptforschungsfrage (HFF) ableiten, die in den folgenden Kapiteln beantwortet wird:

HFF: Welche Herausforderungen entstehen bei der Produktentwicklung von CPS und wie können diese für weitere Forschungsarbeiten kommunizierbar gemacht werden?

⁶ Vgl. Geisberger u.a. (2012), S. 21-22

⁷ Vgl. Lee (2008), S. 1

⁸ Vgl. Mikusz (2014), S. 386 und Broy (2010), S. 20

⁹ Vgl. Lindström u.a. (2012), S. 286

¹⁰ Vgl. Anderl u.a. (2012), S. 11 und Broy (2010), S. 21 und S. 26

¹¹ Vgl. Mikusz (2014), S. 388-389

¹² Anmerkung: Dabei v.a. Forschungsbereich 1) *Definition und Verwendung von Kernkonzepten*

1.2 Begrifflich-konzeptionelle Grundlagen

1.2.1 Cyber-physische Systeme

Der Begriff CPS fand zum ersten Mal im Jahr 2006 von der *National Science Foundation* Verwendung.¹³ Um eine Definition und Abgrenzung des Begriffs vornehmen zu können, empfiehlt es sich die einzelnen Begriffsbestandteile zu betrachten.

Cyber kann i. w. S vom Begriff *Kybernetik* (englisch: *cybernetics*) abgeleitet werden.¹⁴ Kybernetik beschreibt nach Norbert Wiener (1948) in den Ingenieurwissenschaften die Untersuchung von Steuerung, Kontrolle und Kommunikation.¹⁵ I. e. S. ist *cyber* ein „Wortbildungselement mit der Bedeutung ‘die von Computern erzeugte virtuelle Scheinwelt betreffend‘“¹⁶.

Physisch hingegen ist etwas Natürliches, Greifbares, Beobachtbares, also von Menschen geschaffene und manipulierbare Gegenstände, aber auch Prozesse. In Abgrenzung zur Virtualität beschreibt die physische Komponente die Realität.¹⁷

Ein *System* beschreibt eine Menge von Elementen (oder Teilsystemen), die durch Beziehungen miteinander verknüpft sind. Durch Systemgrenzen ist ein System von seiner Umgebung abgegrenzt. Durch Ein- und Ausgangsgrößen stehen Systeme mit anderen Systemen außerhalb der Systemgrenze in Beziehung.¹⁸

Ein CPS ist folglich ein Verbund aus computergestützten Teilsystemen – bestehend aus Kommunikations- und Steuereinheiten – und physischen Teilsystemen, die durch Kommunikationsverbindungen sowohl miteinander als auch mit ihrer Umgebung in Verbindung stehen.

Lee (2008) fasst diese Erkenntnisse folgendermaßen zusammen und definiert ein CPS als

*„integration[.] of computation and physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical process, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa.“*¹⁹

Er bringt den Zusammenhang von CPS und eingebetteten Systemen (ES) zum Ausdruck. Die Zwiebschalenstruktur in Abbildung 1 veranschaulicht diesen.

¹³ Vgl. Jasperneite (2012), S. 26

¹⁴ Vgl. Lee & Seshia (2015), S. 5

¹⁵ Vgl. Wiener (1948), S. 14

¹⁶ Vgl. Duden (2019a), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁷ Vgl. Duden (2019b), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁸ Vgl. Ehrlenspiel und Meerkamm (2017), S. 28

¹⁹ Lee (2008), S. 1

Ein ES besteht aus elektronischer Hardware und Software. Letzte wird auf der Hardware ausgeführt. Es stellt daher ebenfalls einen Verbund aus computergestützten und physischen Teilsystemen dar. Jedoch ist ein ES – im Regelfall – als geschlossene Box zu betrachten, die ihre Rechenfähigkeiten der Umgebung nicht bereitstellt.²⁰ Somit ist es sich außerhalb der Systemgrenzen befindlichen Menschen und Systemen nicht möglich, das Systemverhalten zu beeinflussen. ES interagieren über Sensorik und Aktuatorik mit ihrer Umgebung. Dabei nehmen Sensoren Informationen aus der Systemumgebung auf. Diese Informationen werden im System entsprechend ihrer vordefinierten Verhaltenslogik verarbeitet und durch Aktuatoren Einfluss auf die physikalischen Vorgänge in der Umgebung genommen.²¹

Die Grundlage für CPS bilden ES. Durch ihre Vernetzung mittels digitaler Kommunikationstechnologien, sowohl lokal (innerhalb der Systemgrenzen) als auch global über das Internet und die Bereitstellung von Benutzerschnittstellen werden ihre Rechenfähigkeiten – über die Grenzen der geschlossenen Box hinweg – bereitgestellt.²² Es entstehen „unerwartet und ungeplant ganz neue und andersartige Möglichkeiten“²³ der ES als CPS. Dies erfordert eine Softwareintensivierung der ES. Zur Bereitstellung entsprechender Schnittstellen und Bewerkstellung der Rechenfähigkeit ist ein höherer Anteil an Software im Verhältnis zur Hardware erforderlich.²⁴

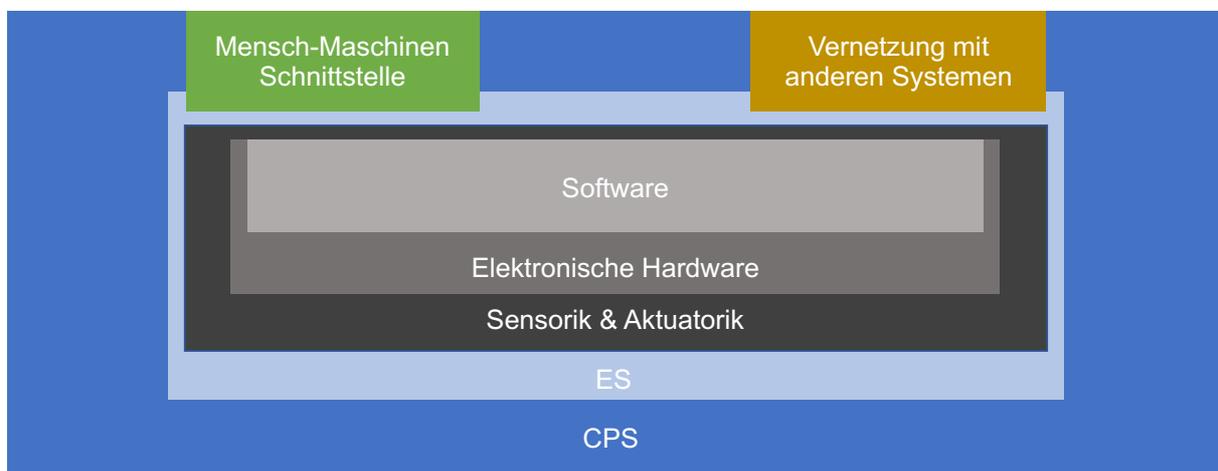


Abbildung 1: Zwiebelschalenstruktur zur Abgrenzung eines ES von einem CPS.²⁵

Die Definition eines CPS als, hinsichtlich der Interaktion mit anderen Systemen über Systemgrenzen hinweg, offenes System aus einem oder mehreren ES findet v.a. in

²⁰ Vgl. Lee (2008), S. 4

²¹ Vgl. Mikusz (2014), S. 386

²² Vgl. Broy (2010), S.21-24 und Lee (2008), S. 9

²³ Broy (2010), S. 18

²⁴ Vgl. Mikusz und Csiszar (2015), S. 3

²⁵ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Broy (2010), S. 24

den Ingenieurwissenschaften Verwendung. Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive empfiehlt sich eine differenzierte Betrachtungsweise. Durch die Integration physischer Komponenten mit computergestützten Komponenten und die Vernetzung mit in ihrer Umgebung vorkommenden Systemen ergibt sich die Möglichkeit neuartige Wertversprechen und entsprechende Geschäftsmodelle zu entwickeln.²⁶

Mikusz (2014) bezieht sich in der Definition der Kernstruktur eines CPS ebenfalls auf ein ES mit Komponenten zur Datenverarbeitung und -übertragung, Sensorik und Aktuatorik. Ebenfalls steht dieses ES mit seiner lokalen Umgebung in Beziehung und erlaubt über Mensch-Maschinen-Schnittstellen das Systemverhalten zu beeinflussen. Die Vernetzung über das Internet ermöglicht den Austausch mit anderen Systemen im IoT. Ein wichtiger, aus betriebswirtschaftlicher Perspektive entscheidender, Bestandteil ist die Kooperation mit Dienstleistungen, die sowohl auf lokaler Ebene als auch global über das *Internet of Services* in das CPS integriert werden können.²⁷ Die Integration von Dienstleistungen ermöglicht die Entwicklung von sogenannten *Produkt-Service-Systemen* (PSS). PSS sind hybride Leistungsbündel aus Sach- und Dienstleistungen, deren Ziel es ist, einen Kundennutzen zu schaffen und Wert zu generieren.²⁸ Dabei soll eine „Dematerialisierung“ [der Sachleistung] bzw. Erhöhung des Serviceanteils²⁹ erreicht werden.

In der Vergangenheit wurde die Software-Komponente in der Konzeptualisierung eines PSS als expliziter Bestandteil gänzlich ignoriert oder der Komponente Sach- bzw. Dienstleistung implizit zugeordnet. Software nimmt jedoch eine zentrale Integrationsfunktion von Sach- und Dienstleistungen bei PSS ein und sollte aufgrund ihrer wirtschaftlichen Eigenschaften, ihrem Differenzierungspotential und dem wachsenden Kostenanteil am Gesamtprodukt als eigenständige Komponente neben den Sach- und Dienstleistungen betrachtet werden. Ein CPS kann aus den genannten Gründen als Software-PSS (SPSS) konzeptualisiert werden, um die Bedeutung der Software-Komponente bei CPS, verstanden als hybride Leistungsbündel aus Software, tangiblen Produkten und Dienstleistungen, zu betonen.³⁰

Für das weitere Verständnis der Arbeit ist es notwendig den Produktbegriff hinsichtlich CPS zu definieren. Die Literatur betrachtet den Produktbegriff aus der technischen und

²⁶ Vgl. Geisberger u.a. (2012b), S. 179-186

²⁷ Vgl. Mikusz (2014), S. 386

²⁸ Vgl. Boehm und Thomas (2013), S. 252

²⁹ Wipfler u.a. (2014), S. 8

³⁰ Vgl. Mikusz (2014), S. 387

der marketingorientierten Perspektive. Die technische Perspektive versteht ein Produkt „als Bündel funktionaler Eigenschaften“³¹, die eine Betrachtung der Nutzenkomponente eines Produktes vernachlässigt. Die marketingorientierte Perspektive fokussiert die Nutzenbetrachtung, in dem sie ein Produkt „als nutzenstiftende Einheit“³² definiert. Kotler u.a. (2015) unterscheiden zwischen substanziellem, erweitertem und generischem Produktbegriff. Letzterer versteht ein Produkt als „alles, was einer Person angeboten werden kann, um ein Bedürfnis oder einen Wunsch zu befriedigen“³³ und integriert in diesem Verständnis technische und marketingorientierte Perspektive.

Die durch die Vernetzung bedingte Konvergenz von tangiblen Produkten, Software und Dienstleistungen führt zur Entstehung sogenannter *digitalisierter, vernetzter Produkte (DVP)*. Im Folgenden werden CPS als solche verstanden. Dieses Verständnis setzt den Fokus auf CPS als eine nutzenstiftende und somit vermarktbar Einheit (marketingorientierter Produktbegriff) und löst sich von der Systemperspektive, die CPS als einzelne separate Teilsysteme, die miteinander interagieren (technischer Produktbegriff), betrachtet.³⁴

1.2.2 Produktentwicklung

Zur Ausschöpfung des betriebswirtschaftlichen Potenzials von CPS ist es notwendig, verfügbare Informationen und „erforderliche Ressourcen in einen zweckmäßigen Zusammenhang“³⁵ zu bringen. Dafür bedarf es einer „systematische[n] Anwendung und Auswertung von Forschungsergebnissen und technischer Erfahrung mit dem Ziel, zu grundlegend neuen gebrauchsfähigen, d.h. marktreifen, Produkten ... zu gelangen (Neuentwicklung) oder bestehende Lösungen zu verbessern (Weiterentwicklung)“³⁶. Dies wird auch als Produktentwicklung verstanden.

Die Produktentwicklung lässt sich als Phase in den technischen Produktlebenszyklus einordnen. Aufgrund ihrer frühen Lage im Produktlebenszyklus ist sie für die fortlaufende Produktentstehung, -nutzung und -verwertung von hoher Bedeutung.³⁷

Die Produktentwicklung ist der Produktplanung nachgelagert. Im Anschluss an die Produktentwicklung folgt die Realisierung/Produktion und Nutzung des Produkts, bevor dieses am Ende seines Lebenszyklus steht. Diese vereinfachte Einordnung

³¹ Meffert u.a. (2019), S. 395

³² Meffert u.a. (2019), S. 396

³³ Kotler u.a. (2015), S. 408

³⁴ Vgl. Mikusz (2018), S. 1 und Porter und Heppelmann (2014), S. 11-12

³⁵ VDI 2221-1, S. 7

³⁶ Backhaus und de Zoeten (1992), S. 2026-2027

³⁷ Vgl. VDI 2221 (1993), S. 8 und VDI 2221-1 (2018), S. 13

erweckt den Eindruck einer sequentiellen Abfolge. Häufig werden jedoch Phasen und deren zugeordneten Aktivitäten iterativ und/oder parallel durchlaufen.³⁸

Das allgemeine Modell der Produktentwicklung der VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1 (siehe Abbildung 2) eignet sich als Referenzmodell für die Produktentwicklung und kann „auf alle Arten technischer Produkte und Systeme sowie die entsprechenden interdisziplinären Entwicklungs- und Entstehungsprozesse angewendet werden.“³⁹ Dieses umfasst die folgenden neun Kernaktivitäten der Produktentwicklung, die zur Erarbeitung spezifischer Produktentwicklungsprozesse als Grundlage dienen:⁴⁰

- **Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe:** Das Ergebnis der Produktplanung stellt die Ausgangsbasis für die Produktentwicklung dar. Dies stellt „je nach Projektsituation [eine] mehr oder weniger detaillierte Beschreibung eines Entwicklungsauftrags“⁴¹ dar. Ein solcher Entwicklungsauftrag kann beispielsweise eine verhältnismäßig unausgereifte Unternehmensvision oder auch ein im Detail spezifizierter Kundenauftrag sein. Den Entwicklungsauftrag gilt es im Rahmen der Produktentwicklung zu präzisieren. Ziel ist Anforderungen an das Produkt zu erheben, abzustimmen und strukturiert festzuhalten, sodass Folgeaktivitäten darauf aufbauen können.
- **Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen:** Basierend auf den erhobenen und spezifizierten Anforderungen werden Funktionen und Funktionsstrukturen erarbeitet. Es gilt zu definieren, was das Produkt oder Produktbestandteile erfüllen soll(en), um die Anforderungen zu erfüllen. Während bei einfachen Produkten oftmals eine rein verbale Beschreibung durch Funktionslisten genügt, erfordern komplexe Produkte Funktionsmodelle, wie z.B. Funktionsdiagramme und Matrixstrukturen, die die Abhängigkeiten bestimmter Funktionen zum Ausdruck bringen. Ziel ist es eine funktionale Architektur des Produktes zu erstellen, die die Grundlage für die spätere logische und physische Architektur bilden soll.
- **Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen:** Zur Erfüllung der definierten, lösungsneutralen Funktionen ist es notwendig diese in lösungsspezifische Modelle zu überführen. Hierzu ist es notwendig *Effekte* auszuwählen. Zur

³⁸ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 13

³⁹ VDI 2221-1 (2018), S. 3

⁴⁰ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 16ff

⁴¹ VDI 2221-1 (2018), S. 17

Realisierung dieser Effekte werden entsprechende *Wirkprinzipien* abgeleitet. Die Verknüpfung dieser Wirkprinzipien zu einer *Wirkstruktur* beschreibt das Lösungsprinzip zur Erfüllung der gewünschten Funktion. Dabei können mehrere mögliche Lösungen zur Erfüllung einer bestimmten Funktion identifiziert werden, die die logische Architektur darstellen.

- **Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts:** Die im Rahmen der Suche nach Lösungsprinzipien entworfenen Lösungsalternativen gilt es mit Hilfe geeigneter Bewertungskriterien (z.B. Nutzen, Aufwand, Risiken) zu bewerten. Als bekannte Methoden zur Bewertung der Lösungsalternativen sind der paarweise Vergleich oder die Nutzwertanalyse zu nennen.
- **Gliedern in Module & Schnittstellendefinitionen:** Die ausgewählten Lösungskonzepte werden in Module gegliedert. Es gilt die funktionale und logische Architektur zu einer modularen Systemarchitektur weiterzuentwickeln. Sie gliedert die zu entwickelnde Lösung in Teilsysteme, Systemelemente und deren Schnittstellen. Die Gliederung kann disziplinspezifisch (z.B. Software, Mechanik, Elektronik) oder disziplinübergreifend (z.B. mechatronische Systeme) erfolgen. In der Regel erfordern komplexe Produkte eine Modularisierung vor der Umsetzung der Lösung, „um eine effiziente Aufteilung der Entwicklungsarbeit zu erleichtern und [...] Entwicklungsschwerpunkte besser erkennen [...] zu können.“⁴² Die Produktentwicklung verzweigt sich zu parallelen Entwicklungsbereichen in denen einzelne Module getrennt, aber trotzdem übergreifend koordiniert entwickelt werden.
- **Gestalten der Module:** Diese Aktivität „führt zu einem wichtigen Konkretisierungs- bzw. Realisierungssprung“⁴³ indem zuvor definierte Module weiter detailliert werden. Es gilt dabei die Ausarbeitung nur soweit zu führen, „dass ein Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums möglich wird.“⁴⁴ Die aus diesem Grund auch als *Vor- bzw. Grobgestalten* bezeichnete Aktivität erarbeitet Vorentwürfe für die Module, wie z.B. CAD-Modelle, maßstäbliche Zeichnungen oder Datenmodelle.

⁴² VDI 2221-1 (2018), S. 20

⁴³ VDI 2221-1 (2018), S. 20

⁴⁴ VDI 2221-1 (2018), S. 20

- **Integrieren des gesamten Produkts:** Die grob entworfenen Module werden weiter detailliert und ausgestaltet, sodass diese letztendlich zu einem Produkt verknüpft werden können. Das End- bzw. Feingestalten der Module führt zu einem integrierten „Gesamtentwurf, der alle wesentlichen gestalterischen Festlegungen zur Produktrealisierung enthält.“⁴⁵
- **Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben:** Ziel ist es Informationen zur Realisierung und zum Gebrauch des Produktes festzulegen. Folglich wird eine Produktdokumentation mit Angaben zur Herstellung, Nutzung und Zertifizierung, beispielsweise als Programmcode-Dokumentationen, als Montagevorschriften oder als Benutzerhandbücher, erstellt.
- **Absichern der Anforderungserfüllung:** Ein kontinuierlicher Abgleich von Zielen bzw. Produktanforderungen und dem Ergebnis dient der Absicherung, dass das zu entwickelnde Produkt mit den spezifizierten Anforderungen übereinstimmt (Verifikation) und den Einsatzzweck, d.h. den Bedarf der Stakeholder deckt und Nutzen stiftet, erfüllt (Validierung). Abhängig von Validierungszweck und Reifegrad des Produktes können Validierungsmodelle in physischer Form, z.B. als Produktprototyp, oder virtueller Form, beispielsweise als Simulationsmodelle, vorliegen.

Diese Kernaktivitäten des allgemeinen Produktentwicklungsmodells werden durch Begleitaktivitäten (auftragsbezogen) und Querschnittsaktivitäten (auftragsunabhängig bzw. -übergreifend) ergänzt. Dabei stehen diese in gegenseitiger Wechselwirkung. Diese sollen an dieser Stelle der Vollständigkeit halber lediglich kurz genannt und nicht im Detail erläutert werden. Unter die Begleitaktivitäten fallen die Aufgaben des Projekt-, Änderungs-, Konfigurations-, Qualitäts- und Kostenmanagements. Den Querschnittsaktivitäten sind die Aufgaben des Technologie-, Innovations-, Prozess-, Varianten- und Wissensmanagements zuzuschreiben.⁴⁶

⁴⁵ VDI 2221-1 (2018), S. 21

⁴⁶ Vgl. VDI 2221-1 (2018), S. 23ff

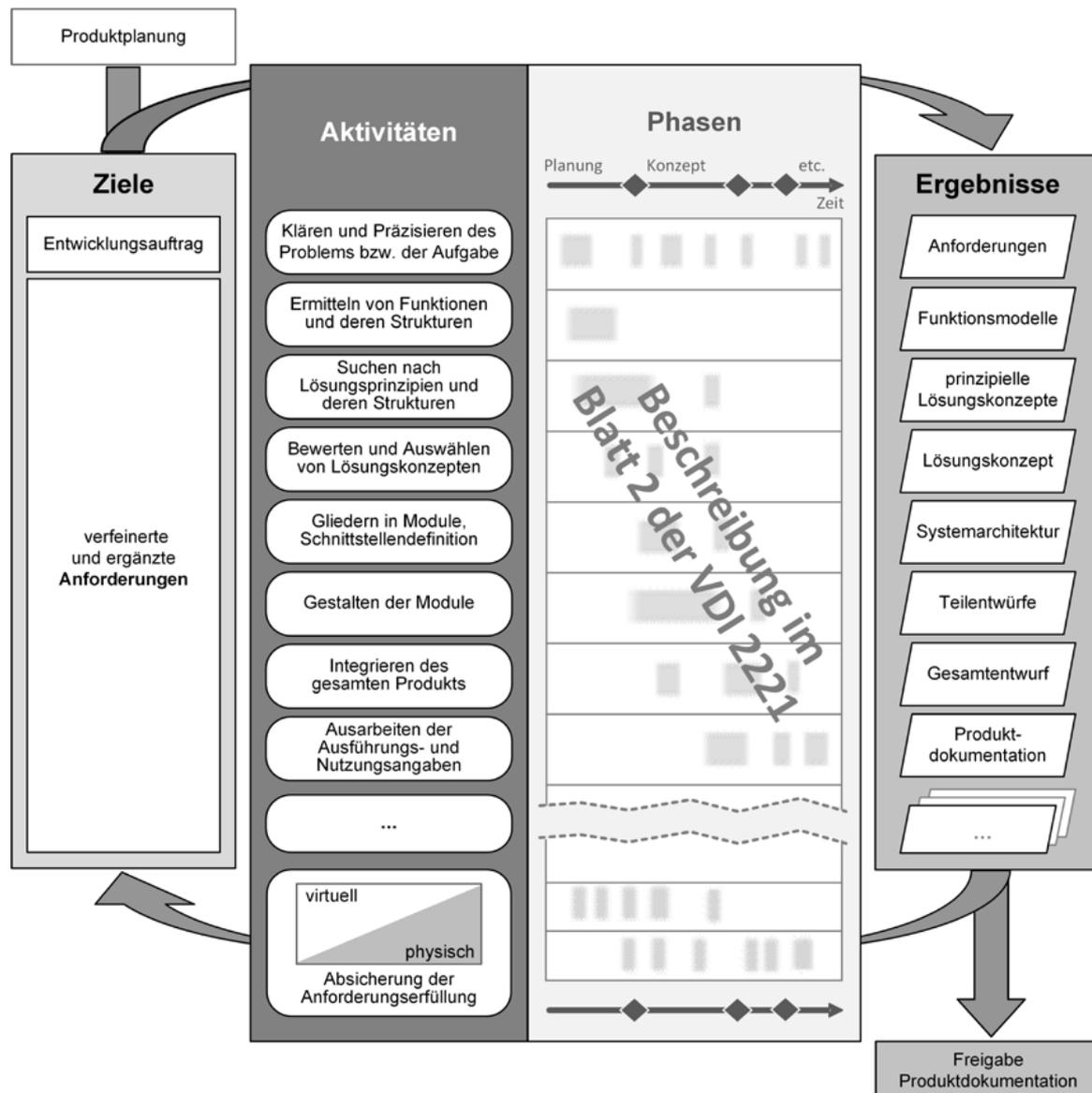


Abbildung 2: Allgemeines Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221-1 (2018)⁴⁷

Das allgemeine Modell der Produktentwicklung vernachlässigt die Betrachtung des Entwicklungskontexts, wie z.B. die Größe oder die Organisationsstruktur eines Unternehmens. Beziehungen von Ursache-Wirkung können aus diesem Grund anhand des allgemeinen Modells zur Produktentwicklung nicht eindeutig identifiziert werden.⁴⁸ So kann anhand des Modells beispielsweise keine Beurteilung stattfinden, wie einzelne Aktivitäten der Produktentwicklung in kleinen Softwareunternehmen im Vergleich zu großen Industrieunternehmen ausgestaltet werden sollen. Spezifische Produktentwicklungsprozesse basieren auf dem allgemeinen Modell der Produktentwicklung und berücksichtigen sowohl Kontextfaktoren als auch bestehendes Prozesswissen. Diese Spezifizierung ermöglicht die Einbettung und Anwendung des allgemeinen Modells in

⁴⁷ Quelle: VDI 2221-1 (2018), S. 16

⁴⁸ Vgl. Gericke u.a. (2013), S. 194

Organisationen. Dabei werden die Aktivitäten der Produktentwicklung entsprechend des Kontexts angepasst und/oder ergänzt. Darüber hinaus nehmen spezifische Produktentwicklungsprozesse eine Konkretisierung der Phasen, also die zeitliche Einordnung und Abhängigkeit der einzelnen Aktivitäten vor.⁴⁹ Folglich dient das allgemeine Modell der Produktentwicklung als Vorlage für spezifische unternehmensinterne Referenzprozesse (strategischer Betrachtungshorizont) oder projekt- bzw. auftragsbezogene Entwicklungsprozesse (operativer oder situativer Betrachtungshorizont).⁵⁰

Trotz der zuvor angeführten Kontextabhängigkeit innerhalb der Produktentwicklung, die sich auf spezifische Unternehmen bezieht, lassen sich innerhalb bestimmter Branchen unternehmensübergreifende Besonderheiten identifizieren. Diese branchenspezifische Besonderheiten kommen v.a. durch inhärente Produkteigenschaften zustande. Herzwurm (2000) erläutert Unterschiede in der Produktentstehung von tangiblen Produkten⁵¹ und Softwareprodukten und deren Auswirkungen für die Softwareentwicklung:⁵²

- Aufgrund der Verschleißfreiheit von Software und deren Produktionsfaktoren entfällt im Rahmen der Softwareentwicklung die Planung für den Ersatz von verschlissenen Produktionsfaktoren.
- Während in der Produktentwicklung von tangiblen Produkten den materiellen Produktionsfaktoren (Werkstoffe) eine hohe Bedeutung zugeschrieben wird, ist bei der Softwareentwicklung der Produktionsfaktor Mensch in den Vordergrund zu stellen, wobei dieser die variablen Entwicklungskosten nahezu allein deckt.
- Aufgrund der Immaterialität von Software kann diese weder ausschließlich den Sachgütern noch den Dienstleistungen zugeordnet werden. Vielmehr ist Software situativ entsprechend der Art der Vermarktung (Standardsoftware als Sachgut, Individualsoftware als Dienstleistung) einzuordnen. Dies hat Auswirkungen auf den Grad der Aufgabenunsicherheit und den Umfang spezifischer Kundenanforderungen im Rahmen der Produktentwicklung.

⁴⁹ Vgl. VDI 2221-2 (2018), S. 5ff

⁵⁰ Vgl. VDI 2221-2 (2018), S.8 - 9

⁵¹ Herzwurm (2000) unterscheidet in seiner Arbeit zwischen *Produkten der Softwareindustrie* und *Produkten der Fertigungsindustrie*. Letztere werden als *tangible Produkte* verstanden.

⁵² Vgl. Herzwurm (2000), S. 36 - 45

- Auch in der Form der Organisation unterscheidet sich die Produktentwicklung von tangiblen Produkten und Softwareprodukten. „Die Softwareentwicklung wird nahezu ausschließlich in Form von Projekten organisiert.“⁵³ Diese Tatsache hat zur Folge, dass nach Projektabschluss häufig der Kontext, beispielsweise durch Anpassung der Teamstruktur, grundlegend verändert wird. Die Produktentwicklung von tangiblen Produkten ist nur selten in Projekten organisiert und entsprechend hinsichtlich ihres Kontexts beständiger.
- Darüber hinaus stellen „viele Teilprozesse der Softwareentwicklung Problemlösungen dar[.], die nicht deterministisch sind.“⁵⁴ Dies bedeutet, dass eine Aussage bezüglich Ursache-Wirkung von Qualität und Varianz der Ergebnisse nicht möglich ist. Dies lässt sich mit der bereits adressierten „hohe[n] Personalintensität“⁵⁵ und der daraus resultierenden Subjektivität der Problemlösung bei der Entwicklung von Softwareprodukten erklären. Folglich bedarf die Softwareentwicklung eines kontinuierlichen Abgleichs der Ergebnisse mit der Spezifikation. Auch sind herkömmliche „ingenieurwissenschaftliche Instrumente [...] [zur Vorhersage der Qualität] in der Softwareentwicklung nicht ohne Weiteres anwendbar“⁵⁶.
- Die kreative Mentalität, die die Softwareentwicklung voraussetzt, schlägt sich oftmals in einer „Sonderstellung“⁵⁷ von Mitarbeitern nieder. Dies bedarf häufig einer geeigneten Kommunikation zwischen Mitarbeitern und Kunden, um potentielle Kommunikationsbarrieren zu umgehen.
- Tangible Produkte im Sinne von massenproduzierten Industriegütern unterliegen im Kontext der Serienfertigung Kopierisiken. Dies bedeutet, dass eine Vervielfältigung des Produkts mit einer nicht zu vernachlässigenden Wahrscheinlichkeit einhergeht, dass die Qualität der Vervielfältigung nicht der erwarteten entspricht. Die Vervielfältigung eines Softwareprodukts durch Datenträgerkopien oder die Bereitstellung im Internet birgt jedoch geringe Risiken, während die Qualität des Produktes konstant bleibt. Softwareprodukte sind im Normalfall Einzelfertigungen; die Vervielfältigung auf Speichermedien fällt nicht in den Aufgabenbereich der

⁵³ Herzwurm (2000), S. 38

⁵⁴ Herzwurm (2000), S. 39, nach: Mellis u.a. (1996), S. 28

⁵⁵ Herzwurm (2000), S. 38

⁵⁶ Herzwurm (2000), S. 40

⁵⁷ Herzwurm (2000), S. 39

Produktion, sondern der Vermarktung. Aus diesem Grund stehen bei der Softwareentwicklung Entwurfsrisiken im Vordergrund, während Kopierisiken zu vernachlässigen sind. Diese Tatsache wirkt sich v.a. auf die Aktivität *Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben*⁵⁸ des allgemeinen Modells zur Produktentwicklung aus, insofern, dass „kaum Aktivitäten zur Planung und Kontrolle von Vervielfältigungsprozessen“⁵⁹ bei der Softwareentwicklung getroffen werden müssen.

- Auf der Tatsache beruhend, dass Softwareentwicklung der Einzelfertigung einzuordnen ist, wird evident, dass eine Konvergenz der Produktentwicklung und Fertigung stattfindet. Dies bedeutet, dass bereits in „der Produktentwicklung erstellte Prototypen oder sogar Teile früher entwickelter Produkte [...] ohne großen Aufwand in das für den Absatz bestimmte Produkt eingehen [können].“⁶⁰ Aus diesem Grund wird v.a. den frühen Phasen⁶¹ der Produktentwicklung in der Softwareentwicklung ein bedeutender Stellenwert zugesprochen.
- Ein weiterer grundlegender Unterschied zwischen der Produktentwicklung von tangiblen Produkten und Softwareprodukten ist die Dauer von der Formulierung der Anforderung bis zur Umsetzung dieser und die damit verbundene Häufigkeit von Produkthanpassungen. So besitzt die Softwareentwicklung im Vergleich zur Produktentwicklung von tangiblen Produkten eine relativ geringe Entwicklungsdauer und dementsprechend häufige Versions- und Releasewechsel.
- Die Eigenschaft, dass Softwareprodukte sowohl nach ihrer Produktion als auch nach ihrer Auslieferung anpassbar sind, führt häufig dazu, dass die eigentlichen Aktivitäten der Produktentwicklung in die nachgelagerten Phasen des technischen Produktlebenszyklus (v.a. die *Produktnutzung* und die damit verbundene Wartung des Produkts) verlagert werden.
- Wegen der Immaterialität des Softwareproduktes wird der Quantifizierung des Produktionsoutputs im Gegensatz zu tangiblen Produkten keine besondere

⁵⁸ Anmerkung: Herzwurm (2000) geht in seiner Arbeit auf die Phase der *Fertigungsüberleitung* ein. Diese ist der Aktivität *Ausarbeiten von Ausführungs- und Nutzungsangaben* des allgemeinen Produktentwicklungsmodells nach VDI 2221-1 (2018) einzuordnen.

⁵⁹ Herzwurm (2000), S. 40

⁶⁰ Herzwurm (2000), S. 40

⁶¹ Anmerkung: Herzwurm (2000) fokussiert dabei die Phase der *Produktplanung*. Diese umfasst die ersten vier Aktivitäten der VDI 2221-1 (2018), i.e. *Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe, Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen, Gliedern in Module & Schnittstellendefinitionen und Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts*.

Bedeutung zugeschrieben. Die Ausbringungsmenge besitzt daher als Maß zur Leistungsbeurteilung keine Aussagefähigkeit. Vielmehr ist es notwendig die Größe und Komplexität des Softwareprodukts zu beurteilen. Zudem erschwert die Immaterialität die Beurteilung der Qualität von Softwareprodukten.

Auch im Rahmen des Dienstleistungsmanagements existiert der Anspruch an eine systematische Entwicklung von Dienstleistungen, wie sie bei Sachgütern oder Softwareprodukten stattfindet.⁶² Schwarz (1997) zeigt die Übertragbarkeit des allgemeinen Modells zur Produktentwicklung auf die Entwicklung von Dienstleistungen auf.⁶³ Ein heutzutage häufig verwendeter Begriff ist das *Service Engineering*, den das DIN (1998) folgendermaßen definiert:

*„Service Engineering steht für die systematische Entwicklung und Gestaltung von Dienstleistungen unter Verwendung geeigneter Methoden und Vorgehensweisen.“*⁶⁴

Die Literatur interpretiert diese Definition unterschiedlich. So versteht man unter Service Engineering i.e.S. die Entwicklung neuer Dienstleistungen, ohne die Produktion einzubeziehen. Die weiter gefasste Interpretation schließt in die Betrachtung zusätzlich zur Dienstleistungsentwicklung die Dienstleistungsproduktion und die damit verbundene kontinuierliche Verbesserung und mögliche Ablösung ein.⁶⁵

Service Engineering i.e.S. kommt dem Verständnis des allgemeinen Modells der Produktentwicklung nahe, da auch dieses die Konzeption und Entwicklung, jedoch nicht die Produktion fokussiert. Betrachtet man jedoch die Charakteristika von Dienstleistungen so wird deutlich, dass eine Betrachtung i.w.S. sinnvoll ist:

- **Immaterialität:** Die zur Erbringung der Dienstleistung notwendigen Input- und entstehenden Outputfaktoren, können sowohl materiell als auch immateriell sein. Der ausschlaggebende, nutzenstiftende Faktor ist jedoch die immaterielle Leistungsfähigkeit des Dienstleisters. Dementsprechend kann eine Dienstleistung nicht vorproduziert (Nichtlagerfähigkeit) und in der Regel nur am Ort des Konsums erstellt werden (Nichttransportierfähigkeit). Produktion und Konsum erfolgen simultan. Während tangible Produkte in der Regel vor dem Kauf vom Kunden begutachtet werden können, sind Dienstleistungen weder vorführbar noch überprüfbar.⁶⁶

⁶² Vgl. Bullinger und Scheer (2006), S. 4 oder DIN (1998), S. 12

⁶³ Vgl. Schwarz (1997), S. 41ff

⁶⁴ DIN (1998), S. 31

⁶⁵ Vgl. Burr (2016), S. 21-22

⁶⁶ Vgl. Meffert u.a. (2019), S. 27-28 und Haller (2017), S. 11

- **Spezifische Leistungsfähigkeiten:** Die Ausschöpfung der Dienstleistungspotenziale und somit die Ergebnisqualität der Dienstleistung ist abhängig von individuellen Fähigkeiten des Dienstleistungserbringers.⁶⁷ Daraus ergibt sich eine potenzielle Variabilität der Dienstleistung, die im Rahmen der Dienstleistungsentwicklung adressiert werden muss. So gilt es während der Konzeptionsphase einer Dienstleistung standardisierte Routinen und Prozessbeschreibungen zu schaffen, nach denen sich Dienstleistungserbringer richten müssen sowie diese in den Ausführungsangaben festzuhalten.⁶⁸ Dem Faktor Mensch kommt im Rahmen der Dienstleistungsentwicklung eine bedeutende Rolle zu, weshalb die Mitarbeiterauswahl und -qualifikation einen entscheidenden Bestandteil darstellen.⁶⁹
- **Integration des externen Faktors:** Ein deutlicher Unterschied bei der Produktentwicklung von tangiblen Produkten gegenüber der Produktentwicklung von Softwareprodukten besteht in der unmittelbaren Integration des Kunden in den Leistungserstellungsprozess.⁷⁰ Dadurch unterscheidet sich die Dienstleistungsentwicklung darin, dass der Kunde (noch) während der Fertigung Einfluss auf das Ergebnis nehmen kann. Die damit verbundene „Varietät des externen Faktors [Kunde] erschwert [...] die Planung und Standardisierung“⁷¹ des Leistungserstellungsprozesses. Eine umso größere Bedeutung kommt der Erhebung und Analyse von Kundenanforderungen zu.⁷²

Trotz grundlegender Gemeinsamkeiten besitzen die Konzepte der Produktentwicklung von tangiblen Produkten, Softwareprodukten und Dienstleistungen dargelegte Unterschiede. Die Entwicklung von hybriden Produkten erfordert eine Integration dieser Konzepte und eine damit verbundene Bewältigung der Divergenz. Dieser Problemstellung gehen interdisziplinäre Produktentwicklungsmethoden nach.

Als Beispiel kann dann dieser Stelle die VDI-Richtlinie 2206 angeführt werden, die einen „Leitfaden für die systematische Entwicklung“⁷³ mechatronischer Systeme darstellt. Diese Systeme „erfordern ein interdisziplinäres Zusammenwirken von

⁶⁷ Vgl. Meffert u.a. (2019), S. 28

⁶⁸ Vgl. Meyer u.a. (2006), S. 417 und Haller (2017), S. 109

⁶⁹ Vgl. Haller (2017), S. 93, 109

⁷⁰ Vgl. Meffert u.a. (2019), S. 28 und Scheer u.a. (2006), S. 22

⁷¹ Bullinger und Schreiner (2006), S. 60

⁷² Vgl. Haller (2017), S. 12

⁷³ VDI 2206 (2004), S. 2

Maschinen, Elektrotechnik und Informationstechnik.⁷⁴ Die Richtlinie versucht dies zu befähigen, indem es domänenspezifische Methoden zu einer domänenübergreifenden Methode zusammenführt.⁷⁵

Die Produktentwicklung von PSS bedient sich ebenfalls interdisziplinärer Methoden. Spath und Demuß (2006) schlagen in ihrer Methode zur hybriden Produktentwicklung eine Integration des Service Engineerings und der Produktentwicklung von Sachleistungen vor. Dabei unterscheiden die Autoren die hybride Produktentwicklung von der integrierten Produktentwicklung. Die integrierte Produktentwicklung wird als „parallele Entwicklung von trennbaren Sachleistungen und produktbegleitenden Dienstleistungen“⁷⁶ verstanden, während die hybride Produktentwicklung eine nicht-trennbare Entwicklung der beiden Produktomänen vorsieht.⁷⁷

Die Methode der VDI-Richtlinie 2206 und die Methode der hybriden Produktentwicklung tragen die Gemeinsamkeit, dass die frühen Aktivitäten⁷⁸ der Produktentwicklung domänenübergreifend durchlaufen werden, während spezifische Systementwürfe innerhalb der jeweiligen Produktomäne stattfinden.⁷⁹ Das im Rahmen des acatech-Workshops entstandene Konzept zur multidisziplinären Produktentwicklung knüpft an diese Erkenntnis an, indem es ein Modell zur Integration verschiedener Produktomänen vorschlägt.⁸⁰ Dies sieht eine „[d]urchgängige modellbasierte Systemauslegung“⁸¹ und einen domänenunabhängigen „neutralen Entwurf“⁸² vor, wobei Konzepte des *Systems Engineerings* als integrative „Brücke zwischen den verschiedenen Ingenieurwelten“⁸³ dienen soll. Mit diesem Ansatz soll die Bewältigung der Komplexität innerhalb der interdisziplinären Produktentwicklung, beispielweise von CPS, bewerkstelligt werden.⁸⁴ Eine zielgerichtete Produktentwicklung bedarf jedoch konkretere Produktentwicklungsmethoden und folglich eine Ausarbeitung der vorgestellten Ansätze.⁸⁵

⁷⁴ VDI 2206 (2004), S. 2

⁷⁵ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 3

⁷⁶ Spath und Demuß (2006), S. 499

⁷⁷ Vgl. Spath und Demuß (2006), S. 499

⁷⁸ Anmerkung: Die Methode der VDI-Richtlinie 2206 bezeichnet diese Aktivitäten als *Anforderungen* und *Systementwurf*; die Methode der hybriden Produktentwicklung als *Aufgabenklärung* und *Produktkonzeption*.

⁷⁹ Vgl. VDI 2206 (2004), S. 29-31 und Spath und Demuß (2006), S. 494

⁸⁰ Vgl. Eigner u.a. (2012), S. 11

⁸¹ Eigner u.a. (2012), S. 11

⁸² Eigner u.a. (2012), S. 11

⁸³ Eigner u.a. (2012), S. 12

⁸⁴ Vgl. Eigner u.a. (2012), S. 10

⁸⁵ Vgl. Eigner u.a. (2012), S. 14

Wie zum Ausdruck gebracht wurde, sind die frühen Aktivitäten der Produktentwicklung für den späteren Produkterfolg von hoher Relevanz. Aus diesem Grund fokussiert die Arbeit im Folgenden die Aktivitäten *Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe, Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen, Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen* und *Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts*. Diese bilden das für die Arbeit notwendige Verständnis der Produktentwicklung i.e.S., wobei eine Berücksichtigung der späten Aktivitäten nicht gänzlich vernachlässigt werden darf.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Aus den zuvor erläuterten konzeptionellen Grundlagen lässt sich ein notwendiger Forschungsbedarf identifizieren. Es wird deutlich, dass bisherige Ansätze der Produktentwicklung für die Ausschöpfung des ökonomischen Potentials von CPS nicht ausreichend sind. Die Konvergenz der einzelnen Produktomänen impliziert die Notwendigkeit der Integration der Produktentwicklungskonzepte aus den einzelnen Domänen. Die Diskrepanz der Produktentwicklungskonzepte, die unterschiedlichen inhärenten Produkteigenschaften in den einzelnen Domänen und die Eigenschaften von CPS im Allgemeinen stellen die Erarbeitung einer entsprechenden Produktentwicklungsmethodik vor neue Herausforderungen. Zur zielgerichteten Entwicklung einer Methodik empfiehlt es sich, diese Herausforderungen zu berücksichtigen. Dies soll ein problemzentriertes Vorgehen im Rahmen einer Lösungsfindung gewährleisten.

In der Literatur sind die Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS bislang in einem für die Problemlösung notwendigen Umfang bzw. einer dafür notwendigen Form nicht vorliegend. Bezugnehmend auf die HFF ist es Ziel der Arbeit diese Herausforderungen in einem strukturierten Vorgehen in vorliegender Literatur zu identifizieren und für weitere Forschungsarbeiten, d.h. v.a. für die Erarbeitung einer CPS spezifischen Produktentwicklungsmethodik, zugänglich zu machen.

Zunächst soll zur Beantwortung der HFF ein Vorgehen erarbeitet werden, wie sich die Herausforderungen in Form einer strukturierten Literaturanalyse identifizieren lassen. Damit soll eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und Gewährleistung der wissenschaftlichen Relevanz der Arbeit sichergestellt werden. Es lässt sich folgende Forschungsfrage (FF) ableiten:

FF1: Wie lassen sich die Herausforderungen mittels einer strukturierten Literaturanalyse erheben?

Wie bereits aufgezeigt, gilt es im Rahmenden der Produktentwicklung in den einzelnen Domänen spezifischen Herausforderungen zu begegnen. Basierend auf der Annahme, dass diese Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS weiterhin existent sind, sollen diese anhand des zur Beantwortung von FF1 entwickelten Vorgehens identifiziert werden. Zudem sollen diese die Basis für die Übertragung auf die hybride Produktentwicklung von CPS darstellen. Dafür ist die Beantwortung folgender FF notwendig:

FF2: Welche spezifischen Herausforderungen entstehen jeweils bei der isolierten Produktentwicklung von Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen?

Basierend auf den identifizierten Herausforderungen soll eine Übertragung auf die integrierte Produktentwicklung von CPS als hybride Leistungsbündel aus Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen stattfinden. Ziel ist es, Herausforderungen zu erarbeiten, die bei der Produktentwicklung von CPS von Relevanz sind. Entsprechend lässt sich FF3 ableiten:

FF3: Inwieweit lassen sich die identifizierten Herausforderungen auf die Produktentwicklung von CPS als Leistungsbündel aus Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen übertragen?

Unter dem Anspruch, dass die erarbeiteten Herausforderungen weiter verwendet werden sollen, muss eine entsprechende Form der Ergebnispräsentation gefunden werden. Ziel ist es, die Herausforderungen für weitere Forschungsarbeit zugänglich zu machen, indem diese geeignet aufbereitet und kommuniziert werden. Dieses Ziel soll im Rahmen der Beantwortung von FF4 stattfinden:

FF4: Wie können die identifizierten Herausforderungen kommunizierbar und für weitere Forschungsarbeit zugänglich gemacht werden?

1.4 Forschungsmethodik & Aufbau der Arbeit

Die Arbeit lässt sich aufgrund ihrer Zielsetzung der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik (WI) zuordnen. Ziel ist es Erkenntnisse zu gewinnen, die einen Beitrag zur Erarbeitung von Vorgehensweisen im Rahmen der Produktentwicklung von CPS leisten. Die Arbeit trägt somit zur Entwicklung „normativ, praktisch verwendbare[r] Ziel-Mittel-Aussagen[.] zur Konstruktion“⁸⁶ von CPS bei. Die Design Science Research Methodology (DSRM) eignet sich als Forschungsmethodik innerhalb der gestaltungsorientierten WI und soll zur Erarbeitung des Artefakts⁸⁷, eine strukturierte Übersicht über die Herausforderungen, herangezogen werden.⁸⁸ Peffers u.a. (2007) schlagen dazu ein sechsphasiges Prozessmodell vor, an dessen Orientierung die Sicherstellung von Relevanz und Rigorosität, wie sie die gestaltungsorientierte WI fordert, stattfinden soll.⁸⁹ Das Forschungsdesign der Arbeit (siehe auch Abbildung 3) orientiert sich am DSRM. Zweck des Forschungsdesigns ist es, einen spezifizierten Plan darzustellen, wie die einzelnen Ziele und Forschungsfragen mit Verlauf der Arbeit erreicht werden sollen.⁹⁰ Es enthält dabei alle relevanten Informationen, die den Aufbau der Studie widerspiegeln und Außenstehenden einen Überblick über die gesamte Arbeit vermitteln.⁹¹ Entsprechend ist das Forschungsdesign dieser Arbeit an die sechs Phasen der DSRM angelehnt:⁹²

1) Problemidentifizierung & Motivation: Zunächst soll ein spezifisches Forschungsproblem in Wissenschaft und Praxis erarbeitet werden. Darauf aufbauend soll der Wert der Lösung dargelegt und somit die Relevanz der Arbeit, die zur Lösungsfindung beiträgt, aufgezeigt werden. Es empfiehlt sich, das zu behandelnde Problem möglichst atomar abzugrenzen, um die inhärente Komplexität im Kontext des Problemlösungsprozesses bewältigen zu können.

In der vorliegenden Arbeit stellt die Notwendigkeit einer systematischen Vorgehensweise zur Unterstützung der Produktentwicklung im SiB ein, in Wissenschaft und Praxis, relevantes Problem dar. Der Mangel eines strukturiert aufbereiteten Überblicks über vorliegende Herausforderungen, denen es in diesem Kontext zu begegnen gilt,

⁸⁶ Österle u.a. (2010), S. 666

⁸⁷ Anmerkung: Prinzipiell kann jedes entworfene Objekt, das einen Forschungsbeitrag leistet als Artefakt im Sinne der DSRM verstanden werden (vgl. Peffers u.a. (2007), S. 55)

⁸⁸ Vgl. Hevner (2007), S. 87-88 und Peffers u.a. (2007), S. 46 -48

⁸⁹ Vgl. Peffers u.a. (2007), S. 49, 54 und Österle u.a. (2010), S. 665

⁹⁰ Vgl. Recker (2013), S. 30

⁹¹ Vgl. Ragin (1994), S. 191

⁹² Vgl. Peffers u.a. (2007), S. 53-56

konkretisiert das Problem. Das Problem wird weiter eingegrenzt, indem CPS als Betrachtungsgegenstand des SiB definiert werden. In den Kapiteln 1.1 und 1.2 findet eine ausführliche Identifizierung des Problems sowie Darlegung der Relevanz der Arbeit, die zur Lösung des Problems beiträgt, statt. Sie bilden damit den Einstiegspunkt in den Prozess der DSRM und stellen die Basis für die darauffolgenden Phasen dar.

2) Definition der Zielsetzung: Von der erläuterten Problemstellung sollen die Ziele der Arbeit abgeleitet werden, die durch die Anwendung der DSRM erfüllt werden sollen. In Kapitel 1.3 findet eine entsprechende Zieldefinition mit Formulierung der Forschungsfragen der Arbeit statt. Ziel ist es, ein Artefakt zu entwickeln, das eine strukturierte Übersicht über die Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS gibt. Dabei soll eine qualitative Erhebung sowie Beschreibung der Herausforderungen basierend auf einer strukturierten Literaturanalyse sowie anschließenden argumentativ-deduktiven Analyse stattfinden.

3) Entwurf & Entwicklung der Lösung: Innerhalb dieser Phase findet die Erstellung des Artefakts entsprechend der zuvor definierten Zielsetzung statt. In Kapitel 2 sowie Kapitel 3 erfolgt die Erstellung des Artefakts. Dabei wird zunächst eine Vorgehensweise zur Identifizierung der Herausforderung mittels einer strukturierten Literaturanalyse erarbeitet. Mit der Durchführung dieser findet die Erhebung der Herausforderungen bei der Produktentwicklung in den einzelnen einfachen Produktdomänen, sowie bei der Produktentwicklung von hybriden Produktdomänen statt. Basierend auf den Ergebnissen der strukturierten Literaturanalyse findet eine Übertragung der Herausforderungen auf die Produktentwicklung von CPS mittels einer argumentativ-deduktiven Analyse unter Berücksichtigung der begrifflich-konzeptionellen Grundlagen in Kapitel 1.2 statt. Zur Gewährleistung der Kommunizierbarkeit sollen diese geeignet strukturiert werden. Zum diesem Zeitpunkt kann jedoch keine fundierte Aussage hinsichtlich einer geeigneten Methodik zur Strukturierung der Ergebnisse getroffen werden, da diese von Art und Inhalt der Ergebnisse der Literaturanalyse abhängig ist. Entsprechend soll eine Wahl der Methodik zu einem späteren Zeitpunkt, nach Durchführung der Literaturanalyse, stattfinden.

4) Demonstration: In dieser Phase findet die Präsentation erster Versionen des Artefakts bzw. dessen finaler Version gegenüber Experten des Fachbereichs statt. Ziel ist es eine Überprüfung der Ergebnisse auf ihre Eignung hinsichtlich der

Problemlösung vorzunehmen. Zudem ermöglicht eine Demonstration des Artefakts das Einholen von Feedback, welches in die Erstellung des Artefakts einfließen kann. Eine Demonstration der Ergebnisse dieser Arbeit soll durch kontinuierlichen Austausch, sowie kritische Diskussion mit dem Betreuer der Arbeit stattfinden. Zudem sollen Ergebnisse der Arbeit im Kontext von Forschungsbesprechungen der betreuenden Abteilung diskutiert werden.

5) Evaluation: Im Rahmen dieser Phase soll eine Beurteilung stattfinden, wie effektiv das entwickelte Artefakte zur Lösung des Problems beiträgt. Dabei gilt es den definierten Zielen die tatsächlich beobachtbaren Ergebnisse durch die Verwendung des Artefakts gegenüberzustellen. Im Gegensatz zur Demonstration setzt die Evaluation eine formale und rigorosere Analyse des Artefakts voraus. Basierend auf den Erkenntnissen der Evaluation soll die Entscheidung getroffen werden, ob das Artefakt überarbeitet werden muss oder mit der Kommunikation der Ergebnisse fortgesetzt wird. Die vorliegende Arbeit verzichtet auf eine Durchführung der Evaluation, ohne die Relevanz dieser Phase abzuwerten. Vielmehr soll die Arbeit aufgrund von Zeitrestriktionen eine Grundlage für darauf aufbauende fundierte Evaluationen bilden. Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass die Erkenntnisse in der für die Literaturanalyse herangezogenen Literatur Gültigkeit besitzen. Deren Existenzberechtigung soll in zukünftigen Arbeiten evaluiert werden.

6) Kommunikation: Die Weiterverwendung der Ergebnisse soll durch geeignete Kommunikation der Arbeit gewährleistet werden. Dies bedarf eine für die Zielgruppe angebrachte Aufbereitung der Arbeit, v.a. von deren Ergebnisse. Zudem ist es notwendig diese der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Durch eine geeignete Strukturierung der Ergebnisse dieser Arbeit soll eine Kommunizierbarkeit dieser gewährleistet werden. Zudem sollen im Anschluss an die vorliegende Arbeit Fokussierungen und Veröffentlichungen ausgewählter Aspekte erfolgen. Ein Ausblick hinsichtlich der Möglichkeiten einer Fokussierung, sowie eine kritische Würdigung und Zusammenfassung der Arbeit die ebenfalls der Kommunizierbarkeit beitragen sollen, finden in Kapitel 4 statt.

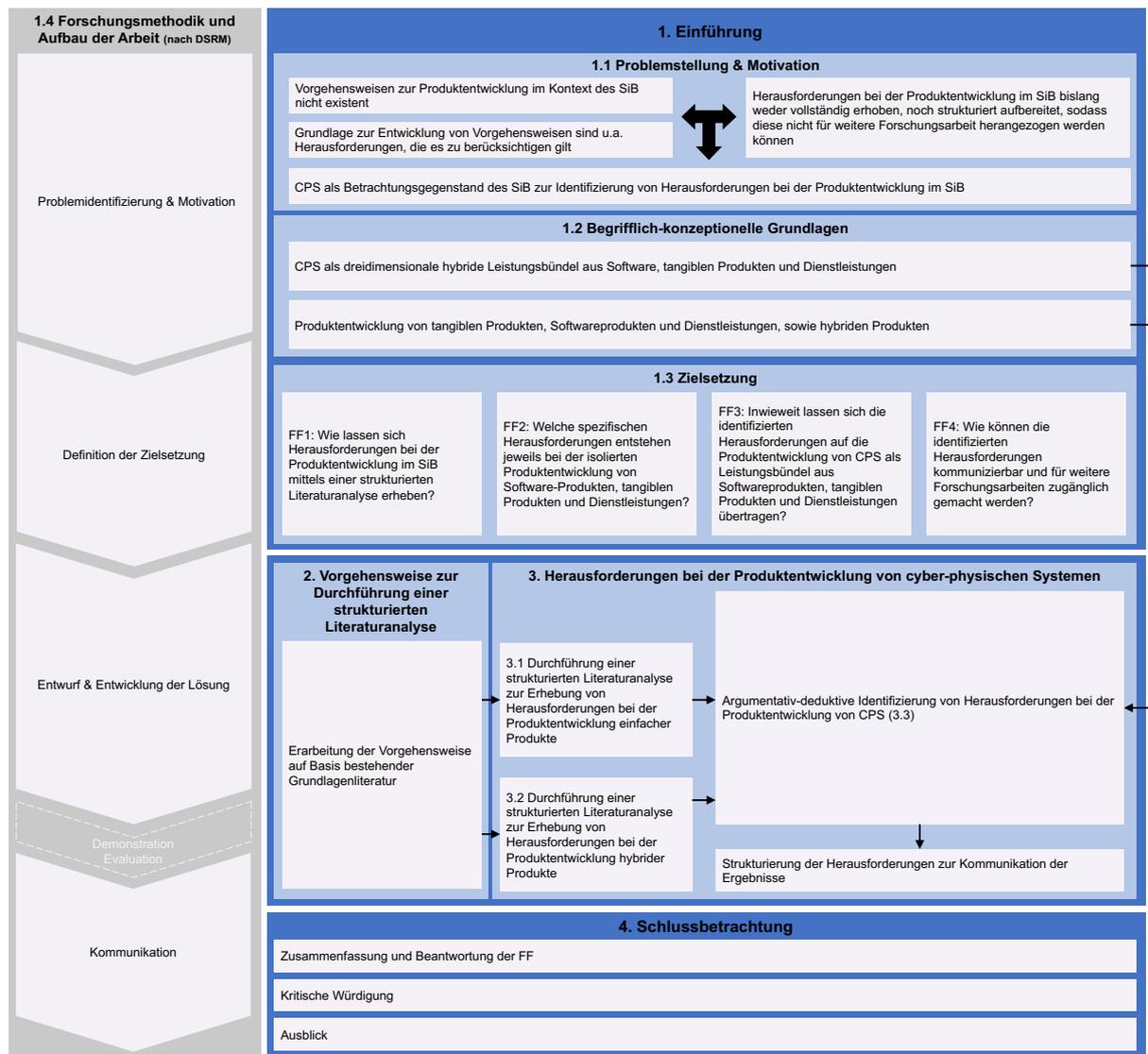


Abbildung 3: Forschungsdesign der Arbeit⁹³

⁹³ Quelle: Eigene Darstellung

2. Vorgehensweise zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse

Zur Erhebung der Herausforderungen, die bei der Produktentwicklung von einfachen und hybriden Produkten entstehen können, empfiehlt sich die Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse. Ziel einer Literaturanalyse im Allgemeinen ist es, existierendes Wissen in der Literatur zu akkumulieren und Gemeinsamkeiten bzw. Widersprüche zu identifizieren. Darauf aufbauend zeichnet eine Literaturanalyse die Weiterentwicklung des Wissens und das Aufzeigen von Forschungslücken und entsprechendem Forschungsbedarf aus.⁹⁴ In anderen Worten stellt eine Literaturanalyse nicht nur eine Übersicht bestehender Literatur dar, sondern konsolidiert diese hinsichtlich eines bestimmten Themas, ausgerichtet auf die Forschungsziele der Studie, kritisch.⁹⁵ Dadurch befähigt sie den Forscher, bestehendes Wissen zu verstehen und stellt somit eine theoretische Grundlage für die vorgesehene Forschungsarbeit dar. Dabei legitimieren die Ergebnisse einer Literaturanalyse die Existenz des Forschungsproblems und rechtfertigen die Forschungsarbeit hinsichtlich ihrer Neuartigkeit gegenüber bestehenden Arbeiten.⁹⁶

Die zunehmende Anzahl der Veröffentlichungen, eine steigende Anzahl an Beiträgen pro Veröffentlichung und zunehmend längere Beiträge können als Gründe für die steigende Unübersichtlichkeit des Literaturangebots angeführt werden. Forscher, insbesondere auch innerhalb der Wissenschaftsdisziplin der WI, stehen vor dem Problem den Überblick über relevante Literatur zu verlieren.⁹⁷ Ein unstrukturiertes Vorgehen im Rahmen einer Literaturanalyse birgt ein relativ hohes Risiko, „wertvolle Ressourcen aufgrund von Doppelarbeiten oder der Vernachlässigung relevanter Erkenntnisse zu vergeuden.“⁹⁸ Traditionelle Literaturanalysen, in denen eine verhältnismäßig unstrukturierte Erhebung und Analyse relevanter Literatur stattfindet, sind folglich wenig geeignet, um eine zielführende, d.h. möglichst vollständige und gleichzeitig effiziente Untersuchungen des Themengebiets durchzuführen.⁹⁹

Zudem genügen unstrukturierte Literaturanalysen in den seltensten Fällen dem Anspruch an methodische Rigorosität der wissenschaftlichen Arbeit. vom Brocke u.a. (2009) fassen unter eine methodische Rigorosität die Kriterien der Nachvollziehbarkeit

⁹⁴ Vgl. Paré u.a. (2015), S. 183 und Rowe (2014), S. 242-243

⁹⁵ Vgl. Rowe (2014), S. 242

⁹⁶ Vgl. Paré u.a. (2015), S. 183

⁹⁷ Vgl. Fettke (2006), S. 257

⁹⁸ Fettke (2006), S. 257

⁹⁹ Vgl. Fettke (2006), S. 257 und Rowe (2014), S. 246

und der Validität. Durch die Validität wird der Grad, wie genau die Suche die relevanten Quellen offenlegt, dargestellt. In anderen Worten spiegelt die Validität einer Literaturanalyse wider, ob der Forscher, bezogen auf die Suchergebnisse, richtig sucht. Das Analysedesign, das sich v.a. aus der Wahl von spezifischen Literaturdatenbanken, Veröffentlichungen oder Suchbegriffen festlegt, wirkt sich entsprechend auf die Validität der Literaturanalyse aus. Die Nachvollziehbarkeit beschreibt, inwieweit neutrale Personen, d.h. v.a. die Leser der Studie, den Suchprozess nachvollziehen und überprüfen können. Dies bedarf einer geeigneten, für den Leser dokumentierten, Repräsentation der Literaturanalyse.¹⁰⁰

Im Gegensatz zu traditionellen Literaturanalysen orientieren sich strukturierte Literaturanalysen an einem klaren Vorgehen und expliziten Methoden zur Identifizierung und Evaluierung von Veröffentlichungen.¹⁰¹ Zur Bewältigung der Unübersichtlichkeit in gegenwärtigen Literaturbeständen, v.a. unter Einbezug verschiedener Disziplinen, sind strukturierte Literaturanalysen von entsprechender Relevanz. Auch tragen diese zur Erfüllung methodischer Rigorosität bei, indem sie sowohl dem Forscher als auch dem Leser ein systematisches Prozedere zur Suche und Analyse der Literatur, sowie Evaluation der Literaturanalyse, darlegen.¹⁰²

In der Literatur lassen sich verschiedene Empfehlungen zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse im Kontext der WI finden. vom Brocke u.a. (2009) konsolidieren diese in ihrer Arbeit und beschreiben ein Rahmenwerk, bestehend aus fünf Phasen:¹⁰³

1) Abgrenzung des Analysekontexts: Hinsichtlich der Validität der Literaturanalyse ist es notwendig, den Analysekontext abzugrenzen. Dazu empfehlen vom Brocke u.a. (2009) eine Orientierung an der Taxonomie von Cooper (1988). Diese beinhaltet sechs Dimensionen *Fokus*, *Ziele (Inhalt)*, *Perspektive*, *Abdeckung*, *Struktur* und *Zielgruppe* zur Charakterisierung einer Literaturanalyse.¹⁰⁴ Fettke (2006) ergänzt diese um die Dimensionen *Typ*, *Ziele (Formulierung)*, *Literatur* und *Zukünftige Forschung*. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Charakteristika von Literaturanalysen und die entsprechend kategorisierten Ausprägungen dieser Charakteristika.¹⁰⁵

¹⁰⁰ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 3

¹⁰¹ Vgl. Velamuri u.a. (2011), S. 6

¹⁰² Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 2

¹⁰³ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 6-9

¹⁰⁴ Vgl. Cooper (1988), S. 106-112

¹⁰⁵ Vgl. Fettke (2006), S. 259-260

Charakteristik	Kategorie			
Typ	natürlichsprachlich		mathematisch-statistisch	
Fokus	Forschungsergebnis	Forschungsmethode	Theorie	Erfahrung
Ziel (Formulierung)	nicht-expliziert		expliziert	
Ziel (Inhalt)	Integration	Kritik		zentrale Themen
Perspektive	neutral		Position	
Literatur (Auswahl)	nicht-expliziert		expliziert	
Literatur (Umfang)	Schlüsselarbeiten	repräsentativ	selektiv	vollständig
Struktur	historisch	thematisch		methodisch
Zielgruppe	Allgemeine Öffentlichkeit	Praktiker	Forscher im Allgemeinen	Spezialisierte Forscher
Zukünftige Forschung	nicht-expliziert		expliziert	

Tabelle 1: Taxonomie zur Charakterisierung von Literaturanalysen¹⁰⁶

Literaturanalysen können sowohl natürlichsprachlich (qualitativ) als auch mathematisch-statistisch (quantitativ) durchgeführt werden. Qualitative Analysen stellen den Forschungsstand durch verbale Argumentation dar, während quantitative Analysen mathematisch-statistische Methoden zur Erhebung und Präsentation der Ergebnisse nutzen.¹⁰⁷ Dabei ist anzumerken, dass sich diese beiden Ausprägungen der Dimension *Typ* einander nicht ausschließen. Häufig sind Studien zu finden, die sowohl eine quantitative als auch eine qualitative Analyse der Literatur vornehmen. So untersuchen beispielsweise Boehm und Thomas (2013) die Verbreitung des Begriffs der PSS in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen mittels quantitativer Methoden, um darauf aufbauend qualitativ das Begriffsverständnis zu erarbeiten.¹⁰⁸

Abhängig von ihrem Analysegegenstand nehmen Literaturanalysen einen unterschiedlichen *Fokus* ein. Eine Fokussierung empirischer Erkenntnisse ermöglicht die Untersuchung aktueller Forschungsergebnisse in relevanter Literatur. Häufig werden ausgewählte Forschungsmethoden auf die Eignung hinsichtlich ihrer Anwendung in bestimmten Disziplinen untersucht. Der Fokus auf Theorie schreibt Literaturanalysen die Gegenüberstellung von etablierten Konzepten und Bezugsrahmen zu, während der

¹⁰⁶ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Fettke (2006), S. 259, Anmerkung: Dunkelblau hervorgehoben sind die Ausprägungen der in Kapitel 3 durchgeführten Literaturanalyse.

¹⁰⁷ Vgl. Fettke (2006), S. 258-259

¹⁰⁸ Vgl. Boehm und Thomas (2013), S. 248ff

Fokus auf Erfahrung das Ziel der Untersuchung von Anwendungen bestimmter Theorien verfolgt.¹⁰⁹

Für die effektive Durchführung einer Literaturanalyse ist die *Zieldefinition* zu Beginn der Durchführung von hoher Relevanz. Dabei kann zwischen einer explizierten und einer nicht-explizierten Formulierung des Ziels in der Studie unterschieden werden. In Hinblick auf den Anspruch der Nachvollziehbarkeit einer Literaturanalyse ist es wichtig, das Ziel möglichst explizit darzulegen. Eine Literaturanalyse kann anhand verschiedener *Zielinhalte* differenziert werden. So kann das Ziel ein Zusammenführen von Erkenntnissen aus der Literatur in einen Bezugsrahmen (Integrieren) darstellen. Dabei gilt es eine Generalisierung, eine Konfliktauflösung verschiedener Ansichten und/oder ein gemeinsames Verständnis des Themas zu erarbeiten. Verfolgt der Autor eine kritische Auseinandersetzung und Diskussion verschiedener Inhalte, lässt sich die Zielsetzung der Kategorie Kritik zuordnen. Im Gegensatz zur Integration, vergleicht eine Kritik in der Regel die verschiedene Ansätze nicht. Vielmehr findet eine separate Bewertung der Ansätze anhand geeigneter Kriterien statt. Sollen lediglich wesentliche Kernaussagen der Literatur erarbeitet und neutral dargestellt werden, handelt es sich um die Kategorie zentrale Themen. Im Gegensatz zu integrativen Literaturanalysen ist das Ziel an dieser Stelle nicht, eine Generalisierung bzw. Konfliktauflösung stattfinden zu lassen, sondern geeignete Fragestellungen aufgrund verschiedener Ansichten zu erarbeiten. Es wird deutlich, dass auch die Kategorien der Zielinhalte nicht trennscharf sind, sondern miteinander einhergehen.¹¹⁰

Die Charakteristik *Perspektive* beschreibt den Grad der Neutralität des Forschers. So kann eine Literaturanalyse eine neutrale, d.h. objektive Identifizierung und Diskussion der Literatur verfolgen. Dabei soll sichergestellt werden, alle Ansichten zu repräsentieren. Hingegen kann der Forscher aber auch bewusst eine subjektive Position zur Untersuchung der Literatur einnehmen.¹¹¹

Die *Auswahl der Literatur* kann ebenso, wie bei der Zielformulierung, expliziert oder nicht-expliziert geschehen. Dies beschreibt, inwieweit der Forscher die Auswahl erläutert und begründet. Eine zentrale Charakteristik stellt der *Umfang der Literatur* dar. Werden alle identifizierten Quellen in der Analyse berücksichtigt und in der Arbeit dargestellt, wird von einer vollständigen Literaturanalyse gesprochen. Eine selektive (vollständige) Analyse analysiert die gesamte, identifizierte Literatur und berücksichtigt

¹⁰⁹ Vgl. Fettke (2006), S. 259

¹¹⁰ Vgl. Fettke (2006), S. 259 und Cooper (1988), S. 108-110

¹¹¹ Vgl. Fettke (2006), S. 259 und Cooper (1988), S. 110

deren Inhalte. Es werden jedoch lediglich ausgewählte Quellen in die Arbeit einbezogen. Gegenüber einer vollständigen Analyse geht die selektive Analyse mit Nachteilen hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit einher. Den Adressaten der Analyse wird eine Beurteilung der Vollständigkeit der dargelegten Inhalte erschwert. Zudem können sie, wenn überhaupt, nur schwer beurteilen, ob die ausgewählten Quellen, die Inhalte der (gesamten) Analyse rechtfertigen. Insbesondere vor dem Hintergrund einer auf die Integration der Inhalte ausgerichteten Analyse und einem großen Umfang identifizierter Quellen bietet sich jedoch im Sinne der Durchführbarkeit eine selektive Analyse häufig an. Zur Bewältigung der Literaturfülle wird oftmals lediglich eine (nicht vollständige) Teilmenge der identifizierten Literatur analysiert. Eine repräsentative Auswahl der Literatur wird entsprechend dargelegt. Zudem ist es möglich lediglich vereinzelte, ausgewählte Schlüsselarbeiten, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, in der Analyse zu behandeln.¹¹²

Hinsichtlich der Präsentation der Analyseergebnisse kann zwischen einer historischen, thematischen und methodischen *Struktur* unterschieden werden. So können die Arbeiten des betrachteten Themengebiets entsprechend des Datums der Veröffentlichung chronologisch geordnet dargestellt werden. Häufig werden die Arbeiten gemeinsam dargestellt, die ähnliche Themen oder Konzepte thematisieren. Auch kann eine Strukturierung nach der Art der in den analysierten Arbeiten verwendeten Methodik vorgenommen werden.¹¹³

Je nach *Zielgruppe* der Studie bedarf es einem spezifischen Schreibstil und einer verschieden ausgeprägten Abstraktion des Wissens. Dabei kann zwischen der Allgemeinen Öffentlichkeit, Praktikern, Forschern im Allgemeinen und Spezialisierten Forschern unterschieden werden.¹¹⁴

Wie eingangs erläutert ist es Ziel einer Literaturanalyse, weitere Forschungslücken bzw. -richtungen auf Basis bestehender Literatur zu identifizieren. Der Grad der Explikation des Forschungsbedarfs wird durch die achte Dimension *Zukünftige Forschung* beschrieben.¹¹⁵

2) Konzeptualisierung des Themas & Problemformulierung: Zum Verständnis des Analysethemas bedarf es dessen Konzeptualisierung. Dazu ist es notwendig,

¹¹² Vgl. Fettke (2006), S. 259-260 und Cooper (1988), S. 110-111

¹¹³ Vgl. Fettke (2006), S. 260 und Cooper (1988), S. 111-112

¹¹⁴ Vgl. Fettke (2006), S. 260 und Cooper (1988), S. 112

¹¹⁵ Vgl. Fettke (2006), S. 260

relevante Grundlagen des zu untersuchenden Themas darzulegen, um ein Verständnis des Themas in der späteren Analyse zu gewährleisten.¹¹⁶ Es empfiehlt sich an dieser Stelle themenrelevante Grundbegriffe und Fachsprache zu erläutern, sowie Grundannahmen zu treffen.¹¹⁷

Im Rahmen der Einführung in das Thema empfiehlt es sich auf Grundlagenliteratur zurückzugreifen. Dabei entsteht die Möglichkeit für die spätere Literatursuche notwendige Suchbegriffe, d.h. verwandte Konzepte, Synonyme und Homonyme, zu identifizieren.¹¹⁸ Darüber hinaus ist es notwendig, die zu behandelnde Problemstellung zu definieren und zu motivieren. Fragestellungen, die im Rahmen der Literaturanalyse zu beantworten sind, gilt es zu spezifizieren und in das Thema einzuordnen.¹¹⁹

3) Literatursuche: Zur Erhebung der Literatur ist es notwendig, einen möglichst systematischen Suchprozess zu verfolgen. vom Brocke u.a. (2009) empfehlen diesen in vier Subphasen zu untergliedern.¹²⁰

Zu Beginn einer Literatursuche sollten führende Fachzeitschriften und Konferenzbände ausgewählt werden, die den zu analysierenden Themenbereich behandeln. Dabei ist es wichtig, entsprechende Qualitätskriterien, wie z.B. Einflussfaktoren, Ranglisten oder die Rigorosität der Reviewprozesse, zu berücksichtigen und lediglich Sammelwerke mit einer hohen Qualitätsgüte auszuwählen.¹²¹ Zudem raten Levy und Ellis (2006) Fachzeitschriften gegenüber Konferenzbänden zu bevorzugen.¹²² Dem ist im Kontext neuartiger, schnelllebiger Themenbereiche, wie beispielweise technologischen Innovationen, zu widersprechen. Oftmals lassen sich relevante Ergebnisse in hochrangigen Fachzeitschriften aufgrund ihrer lang andauernden Reviewprozesse zum Zeitpunkt der Literatursuche (noch) nicht identifizieren.¹²³ Rowe (2014) empfiehlt, die Anzahl der in der Analyse zu berücksichtigenden Fachzeitschriften von den darin enthaltenen relevanten Beiträgen abhängig zu machen. Sind viele Beiträge zu erwarten genügt es Fachzeitschriften der höchsten Kategorie zu wählen.¹²⁴ An dieser Stelle wird deutlich, dass die Literatursuche einen iterativen, explorativen Prozess darstellt,

¹¹⁶ Vgl. Torracco (2005), S. 359

¹¹⁷ Vgl. Zorn und Campbell (2006), S. 175

¹¹⁸ Vgl. Rowley und Slack (2004), S. 36

¹¹⁹ Vgl. Fettke (2006), S. 260 und Webster und Watson (2002), S. xv

¹²⁰ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8-9

¹²¹ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8 und Webster und Watson (2002), S. xvi

¹²² Vgl. Levy und Ellis (2006), S. 185

¹²³ Vgl. Rowe (2014), S. 247 und Yang und Tate (2012), S. 40

¹²⁴ Vgl. Rowe (2014), S. 247

in dem entsprechende Suchkriterien, wie in diesem Fall die Auswahl der Fachzeitschriften, mit dem Verlauf der Zeit angepasst werden müssen.¹²⁵

Literaturanalysen zu interdisziplinären Themen stehen zudem vor der Herausforderung, die, in Bezug auf die Thematik, richtigen Fachzeitschriften auszuwählen. Im Kontext der WI ist es häufig notwendig auch außerhalb der Wissenschaftsdisziplin vorkommende Fachzeitschriften zu berücksichtigen. Eine umso höhere Bedeutung kommt der Abgrenzung des Analysekontext und der Konzeptualisierung des Themas zu, um relevante Themenbereiche identifizieren und passende Fachzeitschriften einbeziehen zu können.¹²⁶

Die zweite Subphase der Literatursuche beschreibt die Suche und Auswahl entsprechender Literaturdatenbanken. Es gilt Datenbanken zu finden, die die Suche über alle zuvor ausgewählten Fachzeitschriften ermöglichen.¹²⁷

Diese Datenbanken werden anhand eines geeigneten Suchterms durchsucht. Die Erstellung eines solchen Suchterms gestaltet sich herausfordernd und ist häufig mit hohem Aufwand verbunden. Es ist eine Balance zwischen ungewollter Exklusion relevanter und Inklusion irrelevanter Literatur zu finden. Daher gilt es einen, in Hinblick auf die zu erwartenden Suchtreffer, präzisen Suchterm zu entwerfen.¹²⁸

Ergänzend zur Literatursuche in Datenbanken hat sich die Vorwärts- und Rückwärtsuche (entspricht der dritten Subphase) etabliert. Auf Basis der Ergebnisse im Rahmen der zuvor durchgeführten Datenbanksuche werden die in der relevanten Literatur referenzierten Literaturquellen auf Relevanz geprüft und bestenfalls in die Menge relevanter Literatur integriert (Rückwärtssuche). Ebenso wird mittels geeigneter Tools¹²⁹ überprüft welche Literatur die identifizierte Literatur referenziert und gegebenenfalls ebenfalls einbezogen (Vorwärtssuche).¹³⁰ Die Entscheidung zur Durchführung einer Vorwärts- oder Rückwärtssuche ist ebenso von der Anzahl an relevanten Suchergebnissen, die sich im Rahmen der Datenbanksuche ergeben hat, abhängig. Häufig wird deshalb auch auf ergänzende, weitreichende Suchen, verzichtet.¹³¹

Sowohl die Datenbanksuche als auch die Vorwärts- und Rückwärtssuche werden von der kontinuierlichen Literaturevaluation begleitet. Dabei werden die Inhalte der

¹²⁵ Vgl. Xiao und Watson (2019), S. 101

¹²⁶ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xvi

¹²⁷ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

¹²⁸ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

¹²⁹ Anmerkung: Als Beispiel kann an dieser Stelle die *Zitiert von* Funktion der wissenschaftlichen Suchmaschine *Google Scholar* (siehe <https://scholar.google.com>) angeführt werden.

¹³⁰ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xvi

¹³¹ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

gefundenen Literatur auf Relevanz für das Analysethema geprüft. Es empfiehlt sich dabei die Evaluation durch Analyse des Titels, Abstracts und bei Bedarf des Volltexts vorzunehmen.¹³²

4) Analyse und Synthese der Literatur: Die identifizierte, für das Thema relevante Literatur gilt es anschließend zu analysieren und zu synthetisieren. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Inhalte für den Leser strukturiert zusammengefasst wiedergegeben werden müssen. Webster und Watson (2002) unterscheiden dabei zwischen einem autorenzentrierten und einem konzeptzentrierten Ansatz. Der autorenzentrierte Ansatz nimmt eine Zusammenfassung der Literatur nach Autoren vor. Der konzeptzentrierte Ansatz akkumuliert Literatur entsprechend verschiedener Konzepte. Es empfiehlt sich den konzeptzentrierten Ansatz zu verfolgen, da der autorenzentrierte Ansatz das Risiko birgt, Konzepte zu vermischen und die Darstellung ihrer Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zu vernachlässigen.¹³³

Die Erstellung einer Konzeptmatrix bietet die Möglichkeit der Strukturierung einer Literaturanalyse gemäß des konzeptzentrierten Ansatzes. Die erste Dimension der Matrix bilden die verschiedenen Konzepte, die in der Analyse behandelt werden. Die zweite Dimension ordnet den Konzepten entsprechende Literaturquellen zu, die die Konzepte thematisieren. Oftmals bietet es sich an, in einer dritten Dimension die Konzepte in Analyseeinheiten weiter zu untergliedern. Eine Konzeptmatrix dient lediglich dazu, einen Überblick über die verschiedenen Konzepte, analysierte Literatur und deren Relation zu vermitteln. Folglich ist es notwendig, eine zusätzliche textuelle Erläuterung vorzunehmen.¹³⁴

5) Forschungsagenda: Eine Literaturanalyse zielt darauf ab, basierend auf konsolidierter Literatur, einen Forschungsausblick zu geben. Eine Forschungsagenda soll die Grundlage für die Erweiterung der Ergebnisse aus der Literaturanalyse bilden. Diese zeigt Forschungslücken oder gar konkretisierte Forschungsfragen für zukünftige Forschung auf.¹³⁵ Ziel ist es die Diskrepanz zwischen dem was in der Forschung bereits bekannt ist und dem was bekannt sein sollte aufzuzeigen. Darauf basierend soll bestehendes Wissen erweitert oder neue Theorie entwickelt werden.¹³⁶

¹³² Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

¹³³ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xvi-xvii

¹³⁴ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xvii

¹³⁵ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

¹³⁶ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xix

vom Brocke u.a. (2006) bilden diese zuvor erläuterten Aktivitäten in Anlehnung an Baker (2000) in einem zyklischen Phasenmodell ab. Dabei soll der Zyklus die Tatsache verdeutlichen, dass die Ergebnisse altern und deshalb kontinuierliche Erweiterungen und Aktualisierungen stattfinden müssen.¹³⁷

Die Vereinfachung in Form eines Phasenmodells vernachlässigt jedoch die Tatsache, dass Literaturanalysen häufig einen explorativen, aber dennoch strukturierten, Charakter besitzen. Dies wird beispielsweise dadurch deutlich, betrachtet man Aktivitäten im Rahmen der Wahl von Fachzeitschriften oder der Festlegung der Suchterme. Es ist daher notwendig das Vorgehensmodell als iteratives Phasenmodell zu betrachten und entsprechende Rückkopplungen zu vorherigen Phasen zuzulassen.¹³⁸

Darüber hinaus kommt Fettke (2006) zu der Erkenntnis, dass die Struktur und der Aufbau einer Literatanalyse je nach Zielsetzung variieren kann. Folglich ist es möglich, einzelne Phasen gemäß des Studiendesigns anders als beschrieben anzuordnen.¹³⁹

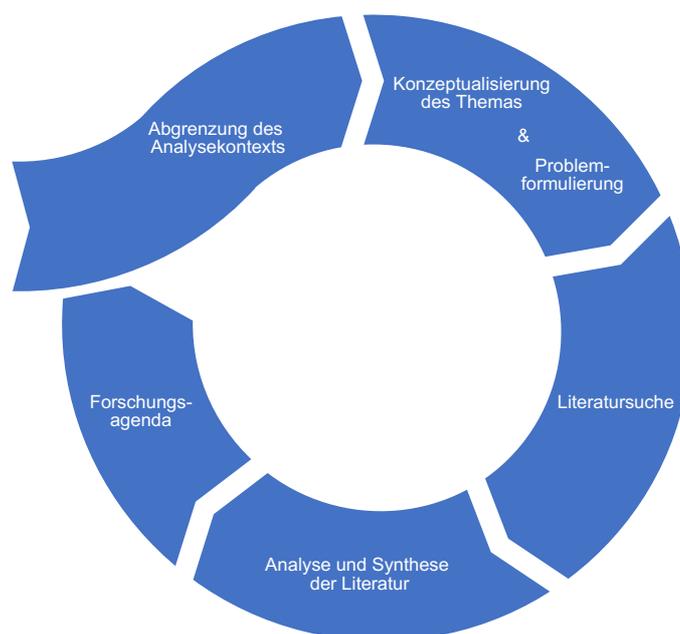


Abbildung 4: Phasenmodell zur Durchführung einer strukturierten Literatanalyse¹⁴⁰

3. Herausforderungen bei der Produktentwicklung von cyber-physischen Systemen

¹³⁷ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 6-7, Baker (2000), S. 221 und Pervan (1998), S. 158

¹³⁸ Vgl. Xiao und Watson (2019), S. 109

¹³⁹ Vgl. Fettke (2006), S. 264

¹⁴⁰ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an vom Brocke u.a. (2009), S. 7

3.1 Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse zur Erhebung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung einfacher Produkte

An der zuvor dargelegten Vorgehensweise zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse soll sich im Folgenden orientiert werden. Zunächst soll dabei der Analysekontext, wie er zur Verdeutlichung in Tabelle 1 unterstützend hervorgehoben ist, definiert werden.

Ziel der strukturierten Literaturanalyse ist es, die Herausforderungen, die bei der Produktentwicklung einfacher Produkte, d.h. tangible Produkte, Softwareprodukte oder Dienstleistungen, entstehen können, zu identifizieren. Genauer gilt es, die Herausforderungen mit dem Anspruch auf Vollständigkeit aufzulisten und in geeigneter Form zu kategorisieren. Es ist notwendig, die zentralen Themen, d.h. im vorliegenden Fall die Herausforderungen, zu extrahieren. Es wird angenommen, dass die einzelnen Herausforderungen in Abhängigkeitsbeziehungen stehen, welche innerhalb einer Integration aufgezeigt werden sollen. Darüber hinaus bedarf es einer Integration der Herausforderungen, um eine Übertragung dieser auf die Produktentwicklung von CPS zu gewährleisten. Auf eine Kritik der Arbeiten und dementsprechend einer Beurteilung und Diskussion der Herausforderungen hinsichtlich ihrer Relevanz soll verzichtet werden. Zudem soll die Analyse aus einer neutralen Perspektive stattfinden.

Die Herausforderungen sollen qualitativ erarbeitet und präsentiert werden. Um ein möglichst breites Spektrum der Herausforderungen abdecken zu können und dem Anspruch auf Vollständigkeit gerecht zu werden, soll der Fokus der Analyse sowohl auf Forschungsergebnissen als auch auf Theorien und Erfahrungen gelegt werden. Der Fokus auf Forschungsmethoden ist im vorliegenden Fall nicht von Bedeutung. Die gewählte Fokussierung findet unter der Annahme statt, dass ein Großteil der Herausforderungen im Kontext von Fallstudien oder der Entwicklung von Vorgehensweisen bzw. Bezugsrahmen in der Literatur dokumentiert sind.

Die Auswahl der Literatur wird im Anschluss an die Abgrenzung des Analysekontext expliziert. Der Anspruch der Arbeit ist es, eine möglichst vollständige Übersicht der Herausforderungen zu leisten. Dies bedarf einer vollständigen Untersuchung der identifizierten Literatur. Unter der Annahme, dass viele Arbeiten kongruente Inhalte hinsichtlich der Herausforderungen besitzen, soll von einer vollständigen Erläuterung der Inhalte aller Arbeiten abgesehen werden. Aus diesem Grund soll eine selektive Analyse durchgeführt werden.

Die Präsentation der Ergebnisse soll in einer thematischen Struktur, entsprechend der Herausforderungen, stattfinden. Dabei sollen diese auf die Zielgruppen der Forscher im Allgemeinen, sowie der Praktiker ausgerichtet werden. Davon ausgehend, dass eine Vielzahl verschiedener Herausforderungen identifiziert wird, ist es notwendig diese zu kategorisieren, sodass eine Weiterverwendung der Ergebnisse vereinfacht wird. Eine Forschungsagenda, die dafür Ansätze liefern soll, soll in Kapitel 4 aufgezeigt werden.

Eine ausführliche Konzeptualisierung des Themas, sowie die Problemformulierung wurde in Kapitel 1 vorgenommen. Es wird deshalb mit dem Schritt der Literatursuche fortgesetzt.

Führt man sich das Ziel der Literaturanalyse vor Augen, wird deutlich, dass es sich um einen multidisziplinären Themenbereich handelt, den es zu untersuchen gilt. Alle drei Analysedomänen (*tangibles Produkt*, *Softwareprodukt* und *Dienstleistung*) sind v.a. aufgrund ihrer Produkteigenschaften den Wirtschaftswissenschaften zuzuordnen. Die Analysedomäne *tangibles Produkt* lässt sich zudem den Ingenieurwissenschaften (z.B. Maschinenbau oder Elektrotechnik) zuordnen. Die Analysedomäne *Softwareprodukt* ist zusätzlich der Wissenschaftsdisziplin Informatik einzuordnen. Vor dem Hintergrund der Konzeptualisierung eines CPS als dreidimensionales hybrides Leistungsbündel, bestehend aus den drei Analysedomänen, nimmt ebenso die WI als interdisziplinäre Wissenschaftsdisziplin einen hohen Stellenwert ein. Folglich ist es zielführend, eine Literaturanalyse innerhalb der genannten Wissenschaftsdisziplinen (Wirtschaftswissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Informatik und WI) durchzuführen. Aufgrund der Multidisziplinarität des Themenbereichs gestaltet es sich schwierig, wie von vom Brocke u.a. (2009) vorgeschlagen, spezifische Fachzeitschriften auszumachen.¹⁴¹ Aus diesem Grund werden direkt Datenbanken identifiziert, die die relevanten Wissenschaftsdisziplinen abdecken. Obwohl dies den Analyseaufwand deutlich steigert, empfiehlt sich die direkte Suche in Datenbanken auch, um den Abdeckungsgrad zu steigern und damit dem Anspruch auf Vollständigkeit der Herausforderungen gerecht zu werden. Somit wurden für die Wissenschaftsdisziplin WI die *AIS Electronic Library (AISEL)* gewählt, die unter anderem die acht Fachzeitschriften des *Senior Scholars' Basket of Journals* und zahlreiche hoch anerkannte internationale WI

¹⁴¹ Vgl. vom Brocke u.a. (2009), S. 8

Konferenzen abdeckt.¹⁴² Die Literatur zu den Themenbereichen der Wirtschaftswissenschaften soll durch die Datenbanken *EBSCO Host (Academic Search Premier¹⁴³, Business Source Premier¹⁴⁴ und EconLit¹⁴⁵)* und *Web of Science¹⁴⁶* erhoben werden. Die Themenbereiche der Ingenieurwissenschaften und Informatik werden durch die *ACM Digital Library (ACM DL)¹⁴⁷* und die *IEEE Xplore Digital Library¹⁴⁸* abgedeckt. Diese fünf Datenbanken gilt es mittels eines geeigneten Suchterms zu durchsuchen. Zur Identifizierung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung in den einzelnen Domänen soll folgender Suchterm verwendet werden:

"challenges" AND ("development" OR "design" OR "engineering" OR "modelling" OR "conceptualization") AND ("product?" OR "hardware" OR "software" OR "service?")

Wie zu erkennen ist, setzt sich dieser Suchterm aus drei Teilen zusammen, die durch logische Und-Operatoren verknüpft sind. Es wird angenommen, dass Herausforderung in der Literatur explizit benannt werden, weshalb relevante Literatur das Schlagwort *challenges* enthalten muss. Darüber hinaus müssen die Herausforderungen in den Kontext der (frühen) Produktentwicklung eingeordnet werden, weshalb zusätzlich das Schlagwort *development* oder eines der Synonyme *design*, *engineering*, *modelling* oder *conceptualization* vorkommen muss. Letztlich bedarf es einer Beschränkung der Suchtreffer auf die drei Analysedomänen *hardware*, *software* und *service*. Häufig wird *product* als Synonym für herkömmliche tangible Produkte verwendet, weshalb dies als alternatives Schlagwort einbezogen wird. Die Wildcard ? dient zudem der Berücksichtigung der Plurale.

Der Suchbereich, in dem nach den definierten Schlagworten gesucht werden soll, soll auf Titel und Abstract¹⁴⁹ der Arbeiten beschränkt werden. Eine zusätzliche Suche im Volltext würde in zu vielen irrelevanten Suchtreffern münden, da die Schlagworte in anderem Kontext (z.B. *research challenges*) sehr häufig vorkommen. Der Zeitraum, in dem nach Literatur gesucht wird, beschränkt sich auf die vergangenen zehn Jahre (01.01.2009-11.05.2019). Es sollen alle Veröffentlichungsarten, also v.a. Beiträge aus

¹⁴² Vgl. AIS (2019), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴³ Vgl. EBSCO (2019a), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁴ Vgl. EBSCO (2019b), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁵ Vgl. EBSCO (2019c), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁶ Vgl. Clarivate (2019), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁷ Vgl. ACM (2019), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁸ Vgl. IEEE (2019a), URL siehe Literaturverzeichnis

¹⁴⁹ Anmerkung: Bei der Datenbank *Web of Science* ist eine Suche lediglich in Titel und Abstract nicht möglich. Es wird in diesem Fall im *Topic* (Titel, Abstract und Keywords) gesucht.

Fachzeitschriften und Konferenzbänden, aber auch graue Literatur, berücksichtigt werden.

Die Datenbanksuche ergibt die in Tabelle 2 aufgeführte Anzahl der Suchtreffer. V.a. bei den Datenbanken *EBSCO Host*, *Web of Science* und *IEEE Xplore* fällt die Anzahl signifikant hoch aus, weshalb bei diesen drei Datenbanken die Suche auf Fachzeitschriften eingeschränkt wird. Zudem wird der Zeitraum bei allen fünf Datenbanken auf die vergangenen fünf Jahre (01.01.2014 – 11.05.2019) eingeschränkt. Zwar sinkt die Anzahl durch die Einschränkung der Suchkriterien um ein Vielfaches, dennoch ist diese zu hoch, um im vorgegebenen Rahmen eine rigorose Analyse der Literatur vornehmen zu können. Eine stichprobenartige Analyse von jeweils 50 Suchtreffern der fünf Datenbanken ergibt zudem, dass die Herausforderungen auf verhältnismäßig spezifische Themen der Produktentwicklung Bezug nehmen. Ziel ist es allerdings, Herausforderungen zu identifizieren, die sich auf allgemeine Themen der Produktentwicklung in den einzelnen Domänen beziehen.

Datenbank	AISel	ACM DL	EBSCO Host (Academic Search Premier, Business Source Premier, EconLit)	Web of Science	IEEE Xplore
Schwerpunkt	Wirtschaftsinformatik	Informatik, Elektro-, Mess- und Regelungstechnik	Wirtschaftswissenschaften	Kunst-, Natur-, Sozia- und Geisteswissenschaften	Elektrotechnik und Informatik
Link	https://aisel.aisnet.org	https://dl.acm.org	http://web.a.ebscohost.com	https://apps.webofknowledge.com	https://ieeexplore.ieee.org
Sammlung	<i>All Repositories</i>	<i>ACM Full-Text Collection</i>	n.V.	<i>Web of Science Core Collection</i>	<i>All Publisher</i>
Zeitraum	1. Januar 2009 – 11. Mai 2019				
Art der Veröffentlichung	Alle	Alle	Alle	Alle	Alle
Vorkommen der Schlagwörter	Titel oder Abstract	Titel oder Abstract	Titel oder Abstract	Topic (Titel, Abstract, Schlagwörter)	Titel oder Abstract
Suchterm	"challenges" AND ("development" OR "design" OR "engineering" OR "modelling" OR "conceptualization") AND ("product?" OR "hardware" OR "software" OR "service?")				
Suchtreffer	756	167	11639	31107	20971
Suchtreffer nach Einschränkung	414	105	6353	12151	2790

Tabelle 2: Übersicht der Datenbanken, Suchkriterien und Anzahl der Suchtreffer

Es ist zu folgern, dass eine auf Fachzeitschriften und Konferenzbeiträgen basierende Literaturanalyse, in einem relativ aktuellen Zeitraum für diesen Zweck nicht geeignet ist. Eine Literaturanalyse basierend auf Fachbüchern mit einem höheren Vergangenheitsbezug wird an dieser Stelle für sinnvoller erachtet. Im Rahmen der Arbeit soll jedoch eine Literaturanalyse auf Basis aktueller, wissenschaftlicher Literatur stattfinden, um dem akademischen Anspruch der Arbeit gerecht zu werden. Darüber hinaus sprechen Zeitrestriktionen und ein eingeschränkter Zugang zu den relevanten Fachbüchern gegen eine Weiterverfolgung der Strategie, um dem Interesse der Erfüllung des

Gesamtziels der Arbeit gerecht zu werden. Deshalb findet eine Neuausrichtung des Ziels der Literaturanalyse statt, die im Folgenden durchgeführt werden soll.

3.2 Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse zur Erhebung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung hybrider Produkte

Ziel der Arbeit ist es, Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS zu erarbeiten. Dabei kann eine Herleitung der Herausforderungen über die Produktentwicklung innerhalb der einzelnen Produktdomänen, aus denen sich ein CPS zusammensetzt stattfinden. Die Identifizierung dieser Herausforderungen gestaltet sich allerdings im Rahmen einer strukturierten Literaturanalyse, wie in Kapitel 3.1 erläutert, schwierig. Eine alternative Herangehensweise stellt die Herleitung der Herausforderungen über weniger granulare Analysedomänen dar. Dies bedeutet, dass anstelle der Produktentwicklung einfacher Produkte, die Produktentwicklung hybrider Produkte analysiert werden soll. Die Konzeptualisierung eines CPS als PSS, ES bzw. DVP legt die Analyse der Produktentwicklung innerhalb dieser hybrider Leistungsbündel nahe. Folglich sollen im Rahmen einer strukturierten Literaturanalyse die Herausforderungen bei der Produktentwicklung dieser hybriden Leistungsbündel erhoben werden, sodass eine Übertragung dieser auf die Produktentwicklung von CPS stattfinden kann. Zudem bietet es sich an, die Literatur einer direkten Untersuchung nach Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS zu unterziehen. Darüber hinaus sollen Herausforderungen bei der Produktentwicklung von hybriden Leistungsbündeln im Allgemeinen erhoben werden.

Am restlichen Analysekontext, wie er in Kapitel 3.1 abgegrenzt wird, sind keine Anpassungen vorzunehmen, sodass dieser für die durchzuführende Literaturanalyse auf Basis hybrider Produkte weiterhin Gültigkeit besitzt.

Die fünf zuvor ausgemachten Datenbanken sind auch für diese Literaturanalyse geeignet. Der zu verwendende Suchterm besitzt ebenfalls eine Dreiteilung. Dabei unterscheidet sich lediglich der Teil, der die Analysedomänen definiert, vom Suchterm, der in Kapitel 3.1 verwendet wurde. Dieser orientiert sich an den zuvor ausgemachten Analysedomänen und deren Synonyme inklusive der Plurale, welche wiederum durch logische Oder-Operatoren verknüpft werden.

Datenbank	AISel	ACM DL	EBSCO Host (Academic Search Premier, Business Source Premier, EconLit)	Web of Science	IEEE Xplore
Schwerpunkt	Wirtschaftsinformatik	Informatik, Elektro-, Mess- und Regelungstechnik	Wirtschaftswissenschaften	Kunst-, Natur-, Sozia- und Geisteswissenschaften	Elektrotechnik und Informatik
Link	https://aisel.aisnet.org	https://dl.acm.org	http://web.a.ebscohost.com	https://apps.webofknowledge.com	https://ieeexplore.ieee.org
Sammlung	<i>All Repositories</i>	<i>ACM Full-Text Collection</i>	n.V.	<i>Web of Science Core Collection</i>	<i>All Publisher</i>
Zeitraum	1. Januar 2014 – 11. Mai 2019				
Art der Veröffentlichung	Alle	Alle	Alle	Alle	<i>Journals & Magazines</i>
Vorkommen der Schlagwörter	Titel oder Abstract	Titel oder Abstract	Titel oder Abstract	<i>Topic</i> (Titel, Abstract, Schlagwörter)	Titel oder Abstract
Suchterm	"challenges" AND ("development" OR "design" OR "engineering" OR "modelling" OR "conceptualization") AND ("product-service system?" OR "embedded system?" OR "embedded product?" OR "mechatronic system?" OR "mechatronic product?" OR "cyber-physical system?" OR "digit" product?" OR "connected product?" OR "digit* connected product?" OR "connected digit* product?" OR "product bundle?" OR "multidiscipli* product?" OR "interdiscipli* product?" OR "software-intensive product?" OR "smart product?" OR "intelligent product?")				("challenges" AND ("development" OR "design" OR "engineering" OR "modelling" OR "conceptualization") AND ("product-service systems" OR "embedded systems" OR "embedded products" OR "mechatronic systems" OR "mechatronic products" OR "cyber-physical systems" OR "digitized products" OR "connected products" OR "digitized connected products" OR "connected digitized products" OR "product bundles" OR "multidisciplinary products" OR "interdisciplinary products" OR "software-intensive products" OR "smart products" OR "intelligent products"))
Suchtreffer	119	399	129	995	282

Tabelle 3: Übersicht der Datenbanken, Suchkriterien und Anzahl der Suchtreffer

Der gesamte Suchterm, wie auch die restlichen Suchkriterien und die jeweiligen Suchtreffer sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Es ist anzumerken, dass für die Datenbank *IEEE Xplore* ein angepasster Suchterm verwendet werden muss, da diese maximal fünf Wildcards pro Suche zulässt.¹⁵⁰ Aus diesem Grund wird bei der Suche in *IEEE Xplore* auf Wildcards verzichtet und dafür jeweils der Singular und Plural ausformuliert. Basierend auf den Erkenntnissen der Datenbanksuche in Kapitel 3.1 beläuft sich der Zeitraum auf die vergangenen fünf Jahre (01.01.2014 – 11.05.2019). Hinsichtlich der Art der Veröffentlichung sollen keine Einschränkungen vorgenommen werden. Lediglich bei der Datenbank *IEEE Xplore* findet eine Beschränkung der Veröffentlichungsart auf Fachzeitschriften (*Journals & Magazines*) statt, da ansonsten die Anzahl der Suchtreffer (1288 Treffer) zu hoch wäre und sich die Analyse zu aufwändig gestalten

¹⁵⁰ Vgl. IEEE (2019b), URL siehe Literaturverzeichnis, S. 1

würde. Die Suche über die fünf Datenbanken ergibt eine Gesamtzahl von 1924 Suchtreffern. Die entsprechenden Arbeiten gilt es einer Literaturevaluation zu unterziehen, die in Abbildung 5 veranschaulicht wird.

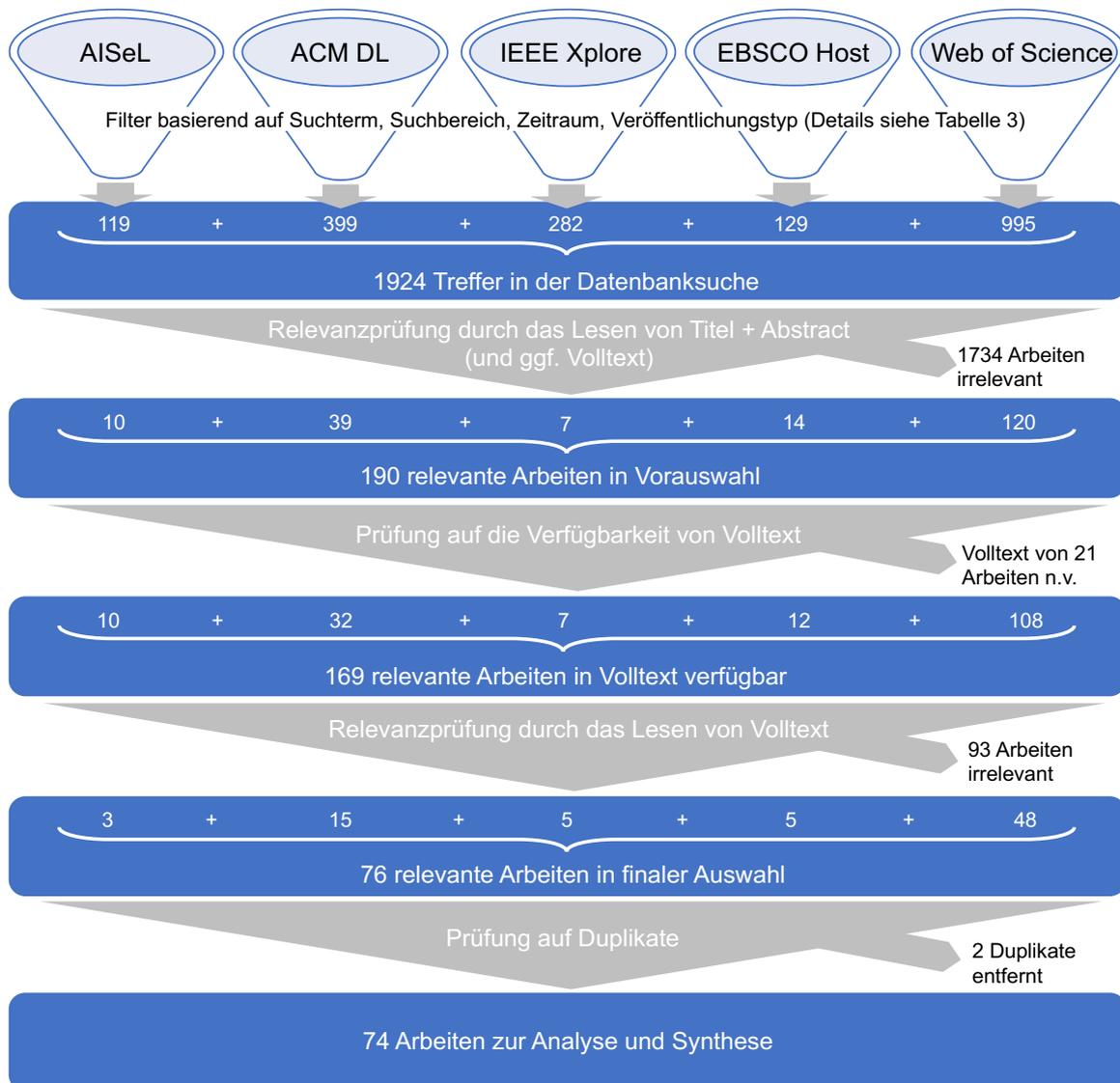


Abbildung 5: Verlauf der durchgeführten Literatursuche¹⁵¹

In einer ersten Relevanzprüfung wird durch das Lesen von Titel und Abstract, sowie bei Bedarf Teile des Volltexts (v.a. Einführung- und Schlusskapitel), anhand folgender Einschluss- bzw. Ausschlusskriterien beurteilt, ob die Arbeiten für die weitere Analyse einbezogen werden:

- Das Schlagwort *challenges* bezieht sich auf die Produktentwicklung oder verwandte Themenbereiche (nicht: z.B. Herausforderungen der Forschung).
- In der Arbeit werden Aktivitäten der frühen Produktentwicklung behandelt (nicht: z.B. Aktivitäten der Implementierung).

¹⁵¹ Quelle: Eigene Darstellung

Treffen diese beiden Kriterien zu, werden die Arbeiten in die Vorauswahl einbezogen. Andernfalls werden die Arbeiten als irrelevant betrachtet und nicht weiter berücksichtigt. Es werden 190 Arbeiten in die Vorauswahl aufgenommen, entsprechend 1734 Arbeiten als irrelevant identifiziert.

Aus der Vorauswahl müssen weitere 21 Arbeiten ausgeschlossen werden, da diese nicht in den elektronischen Ressourcen der Universität Stuttgart oder der Universität Hohenheim enthalten sind und deshalb kein Zugang zu deren Volltext besteht.

Die verbleibenden 169 Arbeiten werden einer zweiten Relevanzprüfung, durch das Lesen ihres Volltexts, unterzogen. Dabei gelten die in der ersten Relevanzprüfung berücksichtigten Einschluss- bzw. Ausschlusskriterien weiterhin, sind jedoch zu unpräzise. Im Volltext müssen spezifische Herausforderungen, die sich auf die frühen Aktivitäten der Produktentwicklung beziehen vorhanden sein. So ist es nicht ausreichend, dass im Volltext die Aussage stattfindet, dass Herausforderungen bei der Produktentwicklung vorliegen, ohne dass diese explizit genannt bzw. erläutert werden. Es werden 93 weitere Arbeiten als irrelevant identifiziert, weil sie größtenteils Herausforderungen nennen, die sich auf fortgeschrittene Aktivitäten der Produktentwicklung beziehen. Zudem ergibt eine Duplikatsprüfung innerhalb der finalen Auswahl den Ausschluss zweier weiterer Arbeiten, sodass 74 Arbeiten zur Analyse und Synthese der Herausforderungen herangezogen werden.¹⁵² Aufgrund der hohen Anzahl relevanter Arbeiten, wird auf eine ergänzende Vorwärts- und Rückwärtssuche verzichtet. Zudem lässt sich aus der zweiten Relevanzprüfung eine hohe Informationsfülle ableiten, sodass die Betrachtung weiterer Literatur im ersten Schritt nicht notwendig ist.

Basierend auf den 74 identifizierten Arbeiten findet eine Analyse und Synthese der Literatur statt, wobei der Fokus auf den thematisierten Herausforderungen liegt. Dabei soll der konzeptzentrierte Ansatz nach Webster und Watson (2002) verfolgt werden.¹⁵³ Die einzelnen Konzepte, d.h. die Herausforderungen, sind vorab nicht bekannt, sondern werden mit Verlauf der Analyse explorativ erarbeitet. Folglich wird mit zunehmender Anzahl analysierter Arbeiten die Liste mit identifizierten Herausforderungen größer. Schlussendlich wird eine Liste mit 91 Herausforderungen identifiziert, die aus verschiedenen Analysedomänen stammen.

¹⁵² Anmerkung: Anhang 1 bietet eine Übersicht über die identifizierte Literatur, die im Rahmen der Analyse und Synthese verwendet wird.

¹⁵³ Vgl. Webster und Watson (2002), S. xvi-xvii

Während der Analyse wird deutlich, dass einige Herausforderungen Ähnlichkeiten aufweisen bzw. sich demselben Problemfeld zuordnen lassen können. Zudem geht mit der Größe der Liste der Verlust einer Übersichtlichkeit einher. Um dem Anspruch der Kommunizierbarkeit der Ergebnisse gerecht zu werden, soll deshalb die Liste geeignet strukturiert werden. Anhand der *KJ Methode* sollen die Herausforderungen in ein Affinitätsdiagramm eingeordnet werden. Affinitätsdiagramme eignen sich, um eine Vielzahl von Informationen zu strukturieren und Gemeinsamkeiten, Unterschiede, sowie Abhängigkeiten zu identifizieren. Die Methode sieht vor, jede Information, d.h. im vorliegenden Fall Herausforderungen, auf ein separates Kärtchen zu schreiben. Im Anschluss werden die Kärtchen in Gruppen einsortiert, wobei Kärtchen die thematische Gemeinsamkeiten aufweisen derselben Gruppe zugeordnet werden. Schließlich werden die Gruppen mit geeigneten Beschriftungen versehen, sodass deren Inhalte bestmöglich zusammengefasst werden.¹⁵⁴

Die Erstellung des Affinitätsdiagramms führt zu 14 Problemfeldern.¹⁵⁵ Diese Problemfelder lassen sich innerhalb einer Konzeptmatrix den zugrundeliegenden Literaturquellen zuordnen. Im Folgenden (Kapitel 3.3) werden die einzelnen Problemfelder ausgeführt, wobei eine Übertragung der Herausforderungen bei der Produktentwicklung in den einzelnen Analysedomänen auf die Produktentwicklung von CPS anhand selektiv ausgewählter Literaturquellen erfolgt.

¹⁵⁴ Vgl. ISO 16355-1 (2015), S. 59 – 60

¹⁵⁵ Anmerkung: Anhang 2 dokumentiert die Durchführung der KJ Methode und die vorläufige Strukturierung der Herausforderungen. Eine Übersicht der finalen Zuordnung der 91 Herausforderungen zu den 14 Problemfeldern ist Anhang 3 zu entnehmen.

Zur Umsetzung einer integrierten, domänenübergreifenden und multidisziplinären Produktentwicklung ist es notwendig eine Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Projektmitarbeitern zu schaffen. Dabei gilt es eine crossfunktionale Kollaboration und Koordination zwischen verschiedenen Geschäftseinheiten bzw. Unternehmen zu schaffen. Dies bedarf eine gemeinsame, für alle Beteiligten verständliche Sprache (Pragmatik), sowie geeignete Kommunikationsschnittstellen.¹⁵⁸

Zahlreiche Arbeiten führen die Notwendigkeit methodischer Unterstützung (siehe 3.3.14) an, durch die ein interdisziplinäres Vorgehen gewährleistet bzw. effizienter gestaltet werden soll. Dabei werden v.a. Methoden zur integrierten Modellierung des Gesamtsystems und integrierte Vorgehensmodelle gefordert. Wolfenstetter u.a. (2015) führen eine Anpassung der Organisationsstruktur an, um eine koordinierte und kollaborative Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen sowohl innerhalb des eigenen Unternehmens als auch über Unternehmensgrenzen hinweg zu erreichen.¹⁵⁹

Zur Entwicklung eines hybriden Leistungsbündels bedarf es eine für alle Domänen verständliche, gemeinsame Produktvision und somit ein gemeinsames Systemverständnis auf einer geeigneten Abstraktionsebene.¹⁶⁰ Auf diese Art und Weise soll eine verteilte Entwicklung abhängiger Produktkomponenten stattfinden, wobei vermieden werden soll, dass eine Entwicklung basierend auf nicht abgestimmten Annahmen erfolgt.¹⁶¹ Beispielsweise werden entsprechende Ziele, Priorisierungen von Produktfunktionen, Systemparameter oder Schnittstellendefinitionen für alle an der Entwicklung beteiligten Einheiten zugänglich gemacht.¹⁶² Ding u.a. (2015) verdeutlichen, dass eine für die interdisziplinäre Produktentwicklung geeignete Abstraktion des Systems sowohl qualitativ als auch quantitativ angemessen sein muss. Auf der einen Seite gilt es das System so zu abstrahieren, dass die Gesamtheit aller Komponenten bzw. Teilsysteme für alle Beteiligten verständlich dargestellt wird (qualitative Abstraktion). Auf der anderen Seite ist es notwendig, dass domänenspezifische interne Probleme auf Basis einer ausreichend quantitativen Abstraktion im Detail diskutiert werden können. Es wird deutlich, dass die Ziele der qualitativen und quantitativen Abstraktion konkurrieren und eine geeignete Balance gefunden werden muss.¹⁶³

¹⁵⁸ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 30 und Törngren u.a. (2014), S. 748

¹⁵⁹ Vgl. Wolfenstetter u.a. (2015), S. 1224-1225

¹⁶⁰ Vgl. Penas u.a. (2017), S. 53

¹⁶¹ Vgl. Törngren u.a. (2014), S. 746

¹⁶² Vgl. Penas u.a. (2017), S. 53

¹⁶³ Vgl. Ding u.a. (2015), S. 354

Die Arbeit von Chabot u.a. (2016) schildert die Tatsache, dass bestimmte Systemkomponenten domänenspezifische Standards erfüllen müssen und Zertifizierungen unterzogen werden. Es ist notwendig, diese Standards nicht nur auf Komponentenebene, sondern auf Gesamtsystemebene zu erfüllen. Systemanforderungen bestimmter Komponenten, aus verschiedenen Domänen sind häufig voneinander abhängig. Dies kann dazu führen, dass sich die Umsetzung der Systemanforderung einer Komponente negativ auf die Umsetzung der Systemanforderung einer anderen Komponente auswirkt und somit die Erfüllung des Standards gefährdet. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass entsprechende Standards auf Systemebene des Gesamtprodukts definiert werden. Darüber hinaus ist es notwendig die Domänenexperten auf die integrierte Erfüllung dieser domänenübergreifenden Standards auszurichten.¹⁶⁴

Eine weitere Tatsache, die im Kontext multidisziplinärer Produktentwicklung existent ist, ist die Unterschiedlichkeit der Produktlebenszyklen in den einzelnen Produktdomänen. So weisen Software-Produkte in der Regel deutlich kürzere Entwicklungs- und Releasezyklen auf als tangible Produkte. Dabei orientiert sich die Softwareproduktentwicklung zunehmend an agilen Vorgehensmodellen (z.B. Scrum), um auf dynamische Marktveränderungen und schnell ändernde Anforderungen der Stakeholder, wie z.B. Kunden oder Komplementäre im Ökosystem, reagieren zu können.¹⁶⁵ Die Produktentwicklung von tangiblen Produkten orientiert sich vorwiegend an traditionellen Vorgehensmodellen, wie beispielsweise dem V-Modell, die im Vergleich zu agilen Vorgehensmodellen hinsichtlich der Reaktion auf Veränderungen im Markt weniger Flexibilität bieten und deshalb längere Entwicklungs- und Releasezyklen zur Folge haben.¹⁶⁶ V.a. im Kontext der Produktentwicklung von ES wird die Herausforderung der Synchronisation der Produktlebenszyklen von tangibler Komponente und Softwarekomponente geäußert. Dabei gilt es beide Zyklen so aufeinander abzustimmen, dass ein Release des Gesamtprodukts zur selben Zeit erfolgen kann. Es ist also notwendig, die Produktentwicklung tangibler Komponenten dynamischer zu gestalten, um die Vorteile der agilen Produktentwicklung nicht einzuschränken.¹⁶⁷

Wie in Kapitel 1.2.2 dargestellt, kommt der Integration des externen Faktors, dem Kunden, bei der Produktentwicklung von Dienstleistungen eine bedeutende Rolle zu. Dies

¹⁶⁴ Vgl. Chabot u.a. (2016), S. 396 und Nguyen-Duc u.a. (2019), S. 13-14

¹⁶⁵ Vgl. Wagner (2014), S. 51

¹⁶⁶ Vgl. Eklund und Bereger (2017), S. 173

¹⁶⁷ Vgl. Lima u.a. (2015), S. 784 und Katumba und Knauss (2014), S. 33f

hat zur Folge, dass bei der Produktentwicklung von Dienstleistungen – im Gegensatz zu Softwareprodukten und tangiblen Produkten – in der Regel eine simultane Leistungserstellung und -erbringung erfolgt. Folglich findet die finale Festlegung der Dienstleistungslösung unmittelbar vor bzw. gar während ihrer Erbringung statt.¹⁶⁸ Es lässt sich schließen, dass sich die Integration der Lebenszyklen von Softwareprodukten bzw. tangiblen Produkten, sowie Dienstleistungen bei der Produktentwicklung von PSS herausfordernd gestaltet. Die Dienstleistungskomponente ermöglicht dem Kunden seine Anforderungen an das Gesamtprodukt während der Nutzungsphase zu äußern. Um dem Anspruch an kundenindividuelle Lösungen (siehe 3.3.2) gerecht zu werden, bedarf es einer flexiblen Befriedigung dieser Anforderungen (siehe 3.3.9). Anbieter des Gesamtprodukts stehen vor der Herausforderung eine entsprechende Umsetzung der Lösung während der Nutzungsphase zu erarbeiten. Dies kann neben der Umsetzung der Dienstleistungskomponente auch Anpassungen an der Software-Komponente oder tangiblen Komponenten erfordern.¹⁶⁹

Zur zielgerichteten Produktentwicklung eines hybriden Leistungsbündels führen einige Arbeiten das Vorhandensein von interdisziplinären Fähigkeiten in den beteiligten Unternehmen bzw. Unternehmenseinheiten an. Zur Erarbeitung eines integrierten Gesamtprodukts ist es notwendig, dass beteiligte Mitarbeiter ein Verständnis über alle involvierten Produktomänen und zugehörigen Disziplinen besitzen. Dabei ist es von Nöten vorherrschende Denkweisen und Kulturen in der Organisation dahingehend zu verändern. Ein Arbeiten und Denken in Silos ist nicht zielführend. Vielmehr bedarf es einer sogenannten Kultur des *information sharings*, wobei die gemeinsame Zielerreichung angestrebt werden soll.¹⁷⁰

Darüber hinaus stehen produktzentrierte Unternehmen, die bislang eine sogenannte *goods-dominant logic* verfolgt haben, vor dem Problem, sich entsprechend einer *service-dominant logic* zu serviceorientierten Unternehmen zu entwickeln, um eine integrierte Entwicklung von PSS zu gewährleisten.¹⁷¹

De Roeck u.a. (2014) diskutieren Herausforderungen im Kontext des Prototypings vernetzter Produkte. Sie führen an, dass Designer, v.a. hinsichtlich der Entwicklung

¹⁶⁸ Vgl. Kapitel 1.2.2

¹⁶⁹ Vgl. Maleki u.a. (2017), S. 207

¹⁷⁰ Vgl. Katumba und Knauss (2014), S. 42-43

¹⁷¹ Vgl. Bertoni u.a. (2016), S. 42 und Zhang und Banerji (2017), S. 218

tangibler Produktkomponenten, mit dem notwendigen technischen Know-How ausgestattet sein müssen, um sinnvolle Prototypen zu entwerfen.¹⁷²

3.3.2 Orientierung am Kunden

Ein Großteil der analysierten Literatur behandelt die Kundenorientierung als relevantes Problemfeld, in dem einige Herausforderungen auszumachen sind. Bezugnehmend auf die Dienstleistungskomponente von CPS hat eine Integration des Kunden per Definition zu Erfolgen. Steigende Kundenerwartungen, zunehmender Innovations- und Wettbewerbsdruck zwingen Unternehmen die gesamte Produktentwicklung entsprechend der Wünsche und Anforderungen der Kunden auszurichten.¹⁷³ Dabei gilt es den Kunden kontinuierlich in alle Aktivitäten der Produktentwicklung mit einzubeziehen.¹⁷⁴ Die Vernetzung von CPS, ihre Vielfalt an Interaktionsschnittstellen und eine daraus resultierende hohe Skalierbarkeit führt zu einer Masse heterogener Kundenanforderungen. Eine Berücksichtigung aller Kundenanforderungen gestaltet sich aufgrund der Komplexität des Lösungsraums entsprechend herausfordernd.¹⁷⁵

Roecker u.a. (2018) identifizieren ein zu geringes technisches Know-How und eine geringe Zahlungsbereitschaft verbunden mit hohen Erwartungen der Kunden als Herausforderung. Kunden stellen Anforderungen an Produkte, ohne zu wissen, mit welchem Aufwand diese Anforderungen zu lösen sind. Oftmals münden hohe Kundenerwartungen, verbunden mit geringem technischem Know-How bzw. einer geringen Zahlungsbereitschaft der Kunden in einer Unzufriedenheit hinsichtlich des Produktergebnisses.¹⁷⁶

Song und Sakao (2017) behandeln in ihrer Arbeit die Herausforderung des Customizations von Kundenlösungen. Unter anderem mit der Bereitstellung von PSS versuchen Unternehmen den Erwartungen der Kunden hinsichtlich individueller Produkte gerecht zu werden.¹⁷⁷ Dies bedarf eine Variabilität der Produktkomponenten, um flexibel auf individuelle Kundenwünsche reagieren zu können. Ansätze der Produktlinienentwicklung versuchen v.a. in der Produktentwicklung von Software oder tangiblen Produkten diese Variabilität zu gewährleisten.¹⁷⁸ Becker und Zhang (2018) betonen die

¹⁷² Vgl. De Roeck u.a. (2014), S. 522

¹⁷³ Vgl. Kuhlenkötter u.a. (2017), S. 341

¹⁷⁴ Vgl. Wallin u.a. (2015), S. 772-777

¹⁷⁵ Vgl. Osswald u.a. (2014), S. 5 und Wolfenstetter u.a. (2015), S. 1224

¹⁷⁶ Vgl. Roecker u.a. (2017), S. 3511

¹⁷⁷ Vgl. Song und Sakao (2017), S. 1672

¹⁷⁸ Vgl. Krüger u.a. (2017), S. 237

Notwendigkeit einer Integration der Ansätze der Produktlinienentwicklung von Software und tangiblen Produkten, um die Variabilität von CPS aufrecht zu erhalten.¹⁷⁹ Dabei sehen sie eine Herausforderung im metaphorisch dargestellten *Varianten-Urwald*, in dem sich Unternehmen aufgrund der Komplexität und Variantenvielfalt von CPS verlieren können (siehe 3.3.12). Es gilt die Variantenvielfalt zu minimieren, wobei das Risiko besteht die Individualität der Kundenlösung einzuschränken und damit Marktanteile zu verlieren.¹⁸⁰

3.3.3 Orientierung am Ökosystem

Eine wichtige Eigenschaft von CPS ist deren Integration in das IoT. Dies ermöglicht die Kooperation mit anderen CPS oder Dienstleistungen über Kommunikationsschnittstellen des Internets.¹⁸¹ Dabei bilden die beteiligten Unternehmen ein plattformbasiertes Ökosystem, das nach Gawer (2014) neben dem Plattformbetreiber, komplementäre Drittanbieter umfasst. Teilnehmer in plattformbasierten Ökosystemen versprechen sich eine Innovation ihrer Produkte innerhalb kooperativer Wertschöpfungsnetzwerke.¹⁸² Im Rahmen der Produktentwicklung ist eine Orientierung am Ökosystem notwendig, um die Vorteile kooperativer Wertschöpfungsnetzwerke ausschöpfen zu können.¹⁸³

Die Integration eines Systems in das Ökosystem bedeutet die Berücksichtigung aller am Ökosystem beteiligten Systeme. Diese „verteilten und dezentralisierten“¹⁸⁴ Systeme gilt es hinsichtlich gemeinsam zu erfüllenden Funktionen zu integrieren.¹⁸⁵ Einige Arbeiten zeigen die Herausforderung der Kollaboration und Koordination aller am Ökosystem beteiligten Systeme und deren Stakeholder auf. Systeme, die im Ökosystem miteinander in Verbindung stehen und durch emergentes Verhalten gemeinsame Funktionen erfüllen, werden häufig separat, ohne Berücksichtigung der Interoperabilität über Systemgrenzen hinweg, entwickelt. Um dennoch die Erfüllung aller Funktionen gewährleisten zu können, bedarf es einer zentralen Planung des System of Systems.¹⁸⁶ Dabei gilt es v.a. verschiedene Produktlebenszyklen der vielzähligen am System of Systems beteiligten Systeme zu berücksichtigen und zu synchronisieren.¹⁸⁷

¹⁷⁹ Vgl. Becker und Zhang (2018), S. 190

¹⁸⁰ Vgl. Becker und Zhang (2018), S. 192

¹⁸¹ Vgl. Mikusz (2014), S. 386

¹⁸² Vgl. Gawer (2014), S. 1244-1246

¹⁸³ Vgl. Geisberger u.a. (2012b), S. 185

¹⁸⁴ Bures u.a. (2015), S. 28

¹⁸⁵ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 28 und Rüchardt und Bräuchle (2016), S. 30

¹⁸⁶ Vgl. Bures (2014), S. 189 und Wiesner u.a. (2015), S. 54

¹⁸⁷ Vgl. Bartelt u.a. (2015), S. 24, Rüchardt und Bräuchle (2016), S. 30 und Seshia u.a. (2017), S. 1426

Geeignete Koordinations- und Kollaborationsmechanismen zwischen den an der Entwicklung beteiligten Stakeholdern bzw. Systemen sollen eine entsprechende zentralisierte Produktentwicklung des Ökosystems bewerkstelligen.¹⁸⁸

Es ist notwendig alle Stakeholder frühestmöglich und kontinuierlich in die Produktentwicklung einzubeziehen, um entsprechende Abhängigkeiten identifizieren und in Systemspezifikationen berücksichtigen zu können. Darüber hinaus bedarf es einer kontinuierlichen Abstimmung während der Betriebsphase. Auf diese Art und Weise soll gewährleistet werden, dass etwaige Änderungen bestimmter Systeme, beispielsweise durch Systemupdates, keinen negativen Einfluss auf die Erfüllung der Funktionalität des Gesamtsystems nehmen.¹⁸⁹

Eine Einbeziehung aller Stakeholder gestaltet sich darüber hinaus herausfordernd, da diese verschiedenartige, oftmals sich widersprechende Interessen und Erwartungen an die Kooperation innerhalb des Ökosystems besitzen. Es fehlen entsprechende Mechanismen, um diese Interessen bzw. Erwartungen zu identifizieren und diesen gerecht zu werden.¹⁹⁰

Die Eigenschaft der Selbst-Anpassungsfähigkeit von CPS kann zu einer unvorhergesehenen Systemkonfiguration bzw. zu einem nicht geplanten Systemverhalten während des Betriebs führen. Eine unvorhergesehene Systemkonfiguration ist aus naheliegenden Gründen anderen kollaborierenden Systemen im Ökosystem zur Laufzeit nicht bekannt. Das korrekte Verhalten des Gesamtsystems kann gefährdet werden, wenn das Verhalten eines kollaborierenden Systems durch das unvorhergesehene Verhalten eines anderen Systems negativ beeinflusst wird. Die Modellierung kollaborativer Systemverbände unter Berücksichtigung der Unvorhersehbarkeit, beispielsweise unter der *open-world assumption*, ist folglich die zentrale Herausforderung, um entsprechender Problematik entgegenzuwirken und Kollaborationen zwischen unabhängig entwickelten Systemen zu gewährleisten.¹⁹¹

Die Produktentwicklung im Kontext plattformbasierter Ökosysteme geht mit der Notwendigkeit einher, Entscheidungen hinsichtlich des Ökosystems im Allgemeinen zu treffen. Eine Ausrichtung des zu entwickelnden Systems am Ökosystem bedarf ein

¹⁸⁸ Vgl. Bartelt u.a. (2015), S. 22 und Saidi u.a. (2018), S. 1

¹⁸⁹ Vgl. Song und Sakao (2017), S. 1673

¹⁹⁰ Vgl. Udoh und Kotonya (2018), S. 68

¹⁹¹ Vgl. Bartelt u.a. (2015), S. 23-24, Bures u.a. (2015), S. 28 und Mostermann und Zander (2016), S. 8-11

entsprechendes Verständnis über das gesamte Ökosystem. Auf Basis dessen können Entscheidungen hinsichtlich der Integration getroffen werden.¹⁹²

Zum einen bedarf es einer Definition der Rolle innerhalb des Ökosystems. Es ist zu klären, ob das zu entwickelnde System als Plattform oder als komplementäres System im Ökosystem fungieren soll. Diese Entscheidung ist einerseits an den technologischen Möglichkeiten des Systems, andererseits an der Strategie, respektive dem Geschäftsmodell, des Systembetreibers festzumachen.¹⁹³

Zum anderen gilt es die Offenheit des Systems und somit des gesamten Ökosystems festzulegen. Dabei wird die Entscheidung getroffen, in welchem Grad es komplementären Drittanbietern möglich ist, dem Ökosystem beizutreten. Im Rahmen des Systementwurfs kann diese Entscheidung beispielweise durch die Bereitstellung entsprechender Programmierschnittstellen getroffen werden.¹⁹⁴

Novales u.a. (2016) führen darüber hinaus als Herausforderung die Definition einer Ökosystem Governance an.¹⁹⁵ Baars und Jansen (2012) verstehen darunter Verfahren und Prozesse, mit denen ein Unternehmen seine aktuelle und zukünftige Positionen im Ökosystem kontrolliert, ändert und aufrechterhält. Eine Ausrichtung des Systems am Ökosystem ist folglich nicht nur einmalig zu Beginn der Produktentwicklung erforderlich, sondern bedarf einer Kontinuität über den Produktlebenszyklus hinweg.¹⁹⁶

3.3.4 Einflussfaktor Mensch

Der Faktor Mensch gewinnt im Kontext von CPS eine zunehmende Bedeutung. Neben der in Kapitel 3.3.2 thematisierten Rolle als Kunde nimmt der Mensch als Systemkomponente Einfluss auf die Produktentwicklung von CPS. Penas u.a. (2017) unterscheiden dabei zwischen den Perspektiven *human-in-the-loop* und *human-out-of-the-loop*.¹⁹⁷ Letztere bedarf für die Erfüllung einer bestimmten Funktion keine Interaktion mit dem Menschen. Eine Berücksichtigung des Menschen als aktive Systemkomponente ist folglich vernachlässigbar. Die Perspektive *human-in-the-loop* hingegen betrachtet den Menschen als aktive Systemkomponente. Eine zunehmend synergetische Interaktion zwischen System und Mensch impliziert Abhängigkeiten in deren Verhalten. Es gilt das Verhalten von CPS dem Verhalten des Menschen anzupassen, um

¹⁹² Vgl. Nylander u.a. (2017), S. 4

¹⁹³ Vgl. Novales u.a. (2016), S. 1603

¹⁹⁴ Vgl. Novales u.a. (2016), S. 1603 und Gawer (2014), S. 1244-1245

¹⁹⁵ Vgl. Novales u.a. (2016), S. 1603

¹⁹⁶ Vgl. Baars und Jansen (2012), S. 170

¹⁹⁷ Vgl. Penas u.a. (2017), S. 54

eine problemlose Interaktion zu gewährleisten. D.h., es ist notwendig verhaltensbezogene, psychologische und physiologische Aspekte des Menschen in CPS abzubilden.¹⁹⁸ Dabei besitzen Menschen individuelle, teilweise unvorhersehbare Anforderungen, Ziele und Verhaltensweisen, die es während des Entwurfs und der Modellierung des Systems zu berücksichtigen gilt.¹⁹⁹

Bures u.a. (2015) unterscheiden zwischen Menschen, die aufgrund ihrer bewussten Interaktion mit dem System entsprechend beeinflusst werden (z.B. der Nutzer eines autonomen Fahrzeug) und Menschen, die ohne bewusste Aktion vom System beeinflusst werden (z.B. Passanten im Fall des autonomen Fahrzeugs). Beide Gruppen gilt es während der Anforderungserhebung und des Systementwurfs zu berücksichtigen und entsprechend abzubilden.²⁰⁰

3.3.5 Ungewissheit hinsichtlich des Systemverhaltens

Die Produktentwicklung von CPS ist mit einer verhältnismäßig hohen Ungewissheit verbunden. Zum einen führen eine kontinuierliche Veränderung der Umgebung des Systems und ein damit verbundener gering vorhersehbarer Systemkontext zu einer Ungewissheit hinsichtlich der Einsatzumgebung von CPS.²⁰¹ Durch die, bereits in Kapitel 3.3.3 thematisierte Eigenschaft der Selbstanpassungsfähigkeit und Rekonfiguration zur Laufzeit, beispielweise durch eine spontane Kollaboration mit anderen Systemen, ist das Systemverhalten von CPS, schwer vorherzusehen und dementsprechend nur geringfügig planbar.²⁰² Ein unvorhersehbares Systemverhalten vor dem Hintergrund eines schwer planbaren Systemkontext führt zu einer Ungewissheit im Systementwurf, die es innerhalb der Produktentwicklung zu bewältigen gilt, um ein korrektes und zuverlässiges Systemverhalten zu gewährleisten. Pagliari u.a. (2017) identifizieren zwei Herausforderungen, die dabei entstehen; einerseits die Bewerkstelligung der Ungewissheit auf Anforderungsebene andererseits die Modellierung des Systems und der damit verbundenen Ungewissheit.²⁰³

Die Berücksichtigung einer unvorhersehbaren Systemkonfiguration und -umgebung auf Anforderungsebene verdeutlichen Wiesner u.a. (2015). Sie betonen die Notwendigkeit, im Kontext des Requirements Engineerings (siehe 3.3.8) im Konflikt stehende,

¹⁹⁸ Vgl. Udoh und Kotonya (2018), S. 67

¹⁹⁹ Vgl. Bartelt u.a. (2015), S. 23, Bures (2015), S. 31 und Rondini u.a (2017), S. 6933

²⁰⁰ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 30

²⁰¹ Vgl. Seshia u.a. (2017), S. 1422 und Bandyszak u.a. (2018), S. 1087

²⁰² Vgl. Heiss u.a. (2015), S. 6 und Kuhlenkötter u.a. (2017), S. 341

²⁰³ Vgl. Pagliari u.a. (2017), S. 221

unstabile, nicht bekannte oder nicht vollständig definierbare Anforderungen, die durch dynamischen Systemverhalten hervortreten können, zu berücksichtigen. Zhang und Banerji (2018) heben hervor, dass ein möglichst frühes Auseinandersetzen mit der Ungewissheit des zu entwickelnden Systems bereits auf Anforderungsebene erfolgreich ist.²⁰⁴

Eine Modellierung von Systemen (siehe 3.3.11) mit unvorhersehbarem Verhalten bzw. einem dynamischen Systemkontext stellt eine weitere Herausforderung bei der Produktentwicklung von CPS dar. Koutsoumpas (2015) bringt zum Ausdruck, dass ein Mangel an bewährten Methoden (siehe 3.3.14) zur formalen Modellierung von Systemen innerhalb eines offenen Kontext besteht. Als Beispiel werden UML oder SysML angeführt, die zur Modellierung von Systemen innerhalb eines geschlossenen Kontexts geeignet sind, nicht aber innerhalb eines offenen Kontexts.²⁰⁵ Osswald u.a. (2015) führen an, dass die Komplexität von CPS eine Modellierung aller möglichen Systemzustände aufgrund der Vielzahl nicht zulässt. Entsprechend müssen Vereinfachungen, im Sinne eines Modells, getroffen werden, die die Ungewissheit bestmöglich abbilden, ohne die Erfüllung von Korrektheit und Zuverlässigkeit (siehe 3.3.6) des Systems zu gefährden.²⁰⁶

Während eine Leistungsentwicklung zum Zeitpunkt der Leistungserbringung bei der Produktentwicklung von Dienstleistungen dem Normalfall entspricht, ist dies bei der Produktentwicklung von Softwareprodukten bzw. tangiblen Produkten nicht der Fall. Die Selbstanpassungsfähigkeit von CPS, z.B. durch die implementierte Machine Learning Algorithmen, lässt eine Trennung der Phasen Leistungsentwicklung und Leistungserfüllung nicht mehr zu. Es ist notwendig, eine Automatisierung des Entwurfs zur Laufzeit vorzunehmen, um eine entsprechende Flexibilität (siehe 3.3.9) im Systemverhalten zu wahren.²⁰⁷

²⁰⁴ Vgl. Zhang und Banerji (2017), S. 218

²⁰⁵ Vgl. Koutsoumpas (2015), S. 26

²⁰⁶ Vgl. Osswald u.a. (2014), S. 5

²⁰⁷ Vgl. Seshia u.a. (2014), S. 1422

3.3.6 Hohe Qualitätsanforderungen

Aufgrund der direkten Einflussnahme von CPS auf ihre physische Umgebung unterliegen diesen hohe Qualitätsanforderungen.²⁰⁸ Durch die Erfüllung dieser Qualitätsanforderungen soll zum einen verhindert werden, dass Schäden am Produkt selbst, sowie an dessen Umgebung entstehen. Vor dem Hintergrund einer hohen Interaktion mit dem Menschen (siehe 3.3.4) und eine Omnipräsenz in deren Alltag sind fatale Auswirkungen durch Fehlverhalten des Systems zu vermeiden.²⁰⁹

Zum anderen stellen Kunden und Partner im Ökosystem hohe Qualitätsanforderungen an das Produkt. Im Sinne einer kundenorientierten Produktentwicklung (siehe 3.3.2) gilt es folglich diese Anforderungen bestmöglich zu erfüllen.²¹⁰ Die Multidisziplinarität (siehe 3.3.1) von CPS, deren Existenz im IoT (siehe 3.3.3), die Integration des Menschen als aktive Systemkomponente (siehe 3.3.4) und die Ungewissheit des Systemverhaltens (siehe 3.3.5) gestalten eine Erfüllung der Qualitätsanforderungen herausfordernd.²¹¹

Eine Vielzahl der Arbeiten betont die Wichtigkeit der Erfüllung von Funktionalität, dabei insbesondere die Korrektheit, sowie die Zuverlässigkeit. Die Komplexität von CPS stellt die Produktentwicklung vor die Herausforderung, diesen Anforderungen gerecht zu werden. Das Zusammenspiel vieler verschiedener, heterogener, verteilter und in sich komplexer Komponenten und Systeme birgt das Risiko die Anforderungen des Gesamtsystems nicht zu erfüllen.²¹²

Chabot u.a. (2016) führen das Problem an, dass Experten einer bestimmten Disziplin häufig auf die Erfüllung domänenspezifischer Qualitätsanforderungen ausgerichtet sind, nicht aber auf die Erfüllung von domänenübergreifenden Qualitätsanforderungen. Es ist notwendig, Qualitätsanforderungen auf der Ebene des Gesamtsystems zu definieren, sodass entsprechende Experten ein gemeinsames, domänenübergreifendes, Qualitätsverständnis besitzen. Damit soll gewährleistet werden, dass ein

²⁰⁸ Vgl. ISO/IEC 25010 (2011), S. 3-4. Anmerkung: Die Norm nimmt innerhalb des Qualitätsmodells eine Definition der Qualitätsanforderungen für System- und Softwarequalität vor. Dies sind im Einzelnen *Funktionalität, Effizienz, Kompatibilität, Benutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Wartbarkeit* und *Portabilität*. Auf eine nähere Erläuterung soll an dieser Stelle verzichtet werden.

²⁰⁹ Vgl. Bartelt (2015), S. 23 und Udoh und Kotonya (2018), S. 68

²¹⁰ Vgl. Chabot u.a (2016), S. 396 und Penas u.a. (2017), S. 52

²¹¹ Vgl. Saidi u.a. (2018), S. 1 und Lazarova-Molna u.a. (2017), S. 1

²¹² Vgl. Penas u.a. (2017), S. 54

gemeinsames Ziel hinsichtlich der Erfüllung der Qualitätsanforderungen des CPS verfolgt wird.²¹³

Das emergente Verhalten von verschiedenen, sich im Ökosystem (siehe 3.3.3) befindlichen, Systemen strebt die gemeinsame Erfüllung einer Funktion an. Frömel (2016) schildert das Problem der Abhängigkeit von Systemen im System of Systems. Die Erfüllung der Qualitätsanforderungen eines Systems ist von anderen beteiligten Systemen abhängig. Fällt beispielsweise ein an der Erfüllung der Funktion beteiligtes System aus, so hat dies Auswirkungen auf andere beteiligte Systeme und folglich auf die Erfüllung der Funktion im Gesamten. Es ist notwendig die Qualitätsanforderungen aller beteiligten Systeme zu erfüllen, am beispielhaften Fall die Verfügbarkeit zu gewährleisten. Oftmals ist allerdings eine Einflussnahme auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen anderer Systeme gar nicht oder nur beschränkt möglich.²¹⁴

Heiss u.a. (2015) knüpfen an das Problem der Ungewissheit hinsichtlich des Systemverhaltens (siehe 3.3.5) an. Am Beispiel der Skalierung des Systems, d.h. der Umfang der Kollaboration mit Systemen im Ökosystem, thematisieren die Autoren diese Problemstellung. Es gilt eine Antwort auf die Frage zu finden, inwieweit die Qualitätsanforderungen erfüllt werden können, ohne die spätere Systemkonfiguration zu kennen. So ist zum Zeitpunkt des Systementwurfs nicht ersichtlich in welchem Umfang das zu entwickelnde System skalieren wird und welchen Einfluss eine entsprechende Skalierung auf die Erfüllung der Qualitätsanforderungen haben wird.²¹⁵

Vor dem Hintergrund eines hohen Verteiltheitsgrades von CPS kommt der Anforderung von Kompatibilität eine bedeutende Rolle zu. Die Gewährleistung von Interoperabilität stellt eine notwendige Bedingung für den Aufbau kollaborativer Netzwerke im Ökosystem dar. Hofer (2018) nennt die Existenz heterogener Systeme und Legacy-Systeme als Einschränkung der Interoperabilität im Kontext von CPS.²¹⁶ Novales u.a. (2016) und Udoh und Kotonya (2018) führen die Notwendigkeit der Bereitstellung von unternehmensübergreifenden Standards und Protokollen zur Sicherstellung der systemübergreifenden Kommunikation an.²¹⁷

Die Koexistenz einer Vielzahl von Anwendungen im Ökosystem und deren Verwendung einer gemeinsamen Plattform kann zu einer Konkurrenz um gemeinsam

²¹³ Vgl. Chabot u.a. (2016), S. 396

²¹⁴ Vgl. Frömel (2016), S. 1

²¹⁵ Vgl. Heiss u.a. (2015), S. 4

²¹⁶ Vgl. Hofer (2018), S. 7

²¹⁷ Vgl. Novales (2016), S. 1603 und Udoh und Kotonya (2018), S. 67

verfügbare Ressourcen führen. Saidi u.a. (2018) führen dieses Problem anhand von ES im Automobil aus. Dabei greifen heterogene Applikationen aus verschiedenen Anwendungsbereichen, mit verschiedenen Qualitätsanforderungen und verschiedenen Berechnungsmodellen auf eine gemeinsame, hinsichtlich ihrer Kapazität beschränkte, Hardwareplattform zurück. Um eine mögliche gegenseitige Beeinflussung einzelner Applikationen zu vermeiden, gilt es mögliche Abhängigkeiten während des Systementwurfs zu identifizieren, sowie eine integrierte Priorisierung der Systemanwendung hinsichtlich ihrer Wichtigkeit vorzunehmen.²¹⁸

Song und Sakao (2017) stellen das Problem der Ressourcenkonkurrenz innerhalb der PSS Domäne dar. Der Anspruch kundenindividuelle Dienstleistungen anzubieten, kann dazu führen, dass Konflikte innerhalb der Entwurfsattribute, beispielsweise notwendiges Dienstleistungspersonal, auftreten. Es mangelt an Rahmenwerken, die die Entwicklung individualisierter PSS unterstützen und entsprechende Ansätze zur Behebung dieser Konflikte bieten.²¹⁹

Die Erfüllung der Anforderung von Effizienz gestaltet sich bei der Entwicklung von CPS ebenso herausfordernd. Dabei lassen sich die Herausforderungen v.a. aus der Entwicklung von ES ableiten.²²⁰ Einerseits erfordern die Systeme eine hohe Rechenkapazität, beispielsweise zur Verarbeitung hoher Datenmengen der Sensoren in Echtzeit. Andererseits besitzen die Systeme, aufgrund der platz- und ressourcensparenden Bauweise, eine geringe Rechenleistung.²²¹

Im Kontext tragbarer Geräte führen Saleem u.a. (2017) das Problem der Entwicklung energieeffizienter Systeme an. Viele Systeme erfordern zur Erfüllung ihrer Funktion eine dauerhafte Aktivität. Damit geht ein relativ hoher Energiekonsum einher. Gleichzeitig gilt es, aufgrund von Platz- und Ressourcenbeschränkungen, Batterien mit einer möglichst geringen Größe und entsprechend geringer Energiekapazität zu verbauen. Die Ausstattung der Systeme mit zu kleinen Batterien gefährdet die Einhaltung einer dauerhaften Systemaktivität, die Ausstattung der Systeme mit zu großen Batterien die Verletzung der Platz- und Ressourcenbeschränkungen.²²² Folglich gilt es hinsichtlich der Erfüllung der Anforderung von Effizienz im Rahmen der Produktentwicklung einen

²¹⁸ Vgl. Saidi u.a. (2018), S. 3

²¹⁹ Vgl. Song und Sakao (2017), S. 1673

²²⁰ Vgl. Ly u.a. (2016), S. 500

²²¹ Vgl. Ly u.a. (2016), S. 500

²²² Vgl. Saleem u.a. (2017), S. 687

Trade-Off zwischen Platz- und Ressourceneinsparung und Rechen- sowie Energiekapazität zu treffen.

Die zahlreichen Kommunikationsschnittstellen, die für eine domänen-, sowie systemübergreifende Vernetzung notwendig sind, bieten für potentielle Cyberangriffe eine relativ große Angriffsfläche. Häufig werden im Kontext von CPS sensible, sowohl personen- als auch unternehmensbezogene, Kundendaten verarbeitet. Diese gilt es vor nicht autorisiertem Zugriff zu schützen. Ebenso gilt es CPS vor dem Hintergrund eines verhältnismäßig hohen Schadenpotentials vor Cyberangriffen zu schützen. Eine entsprechend hohe Bedeutung kommt der Erfüllung der Anforderung von Sicherheit zu.²²³ Derzeit besteht jedoch ein Mangel an geeigneten Methoden des Sicherheitsengineerings, um die Anforderungen im Kontext von CPS zu erfüllen.²²⁴

Saidi u.a. (2018) schreiben der Erfüllung der Anforderung von Portierbarkeit eine hohe Relevanz zu. Zur erfolgreichen Umsetzung neuartiger Geschäftsmodelle im Automobilbereich identifizieren sie die Notwendigkeit, die Software-Komponente von CPS möglichst portierbar zu gestalten. Damit soll gewährleistet werden, dass diese sogenannte *nomadische Software* auf verschiedenen Hardwareumgebungen, im Fall des Automobilbereichs beispielweise auf verschiedenen Fahrzeugmodelle mit verschiedenen Telematik-Einheiten, ausgeführt werden kann.²²⁵

Betrachtet man die verschiedene Qualitätsanforderung gesamtheitlich, so wird die Bedeutung des Qualitätsmanagements im Kontext der Produktentwicklung von CPS deutlich. In der Literatur wird die Notwendigkeit einer frühen Qualitätssicherung aufgezeigt, die unter anderem durch geeignete Simulationsverfahren erfolgen kann. Diese Verfahren erfordern v.a. Modelle, die eine integrierte Simulation aller beteiligten Komponenten und Systeme zulassen.²²⁶

3.3.7 Ökonomische Einflussfaktoren

Den zuvor aufgezeigten Qualitätsanforderungen stehen ökonomische Einflussfaktoren gegenüber. Konkret konnten die drei Faktoren Kostendruck, Zeitdruck und Innovationsdruck identifiziert werden. Um sich vom Wettbewerb abzugrenzen, müssen die

²²³ Vgl. Hofer u.a. (2018), S. 7, Ly u.a. (2016), S. 498- 499 und Novales u.a. (2016), S. 1602-1603

²²⁴ Vgl. Saidi u.a. (2018), S. 6 und Saleem u.a. (2017), S. 693

²²⁵ Vgl. Saidi u.a. (2018), S. 3

²²⁶ Vgl. Törngren u.a. (2014), S. 746 und Al Faruque u.a. (2015), S. 31

CPS produzierenden Unternehmen einer geringen *Time-to-Market* gerecht werden, Produktionskosten gering halten und innovative Produkte, d.h. einen hohen Leistungsumfang mit Begeisterungsmerkmalen entwickeln.²²⁷ Gleichzeitig gilt es dabei die in Kapitel 3.3.6 dargelegten Qualitätsanforderungen zu erfüllen. In Anlehnung an das *Teufelsquadrat* nach Sneed (1987) bestehen Konflikte in der Erreichung des Optimums jeder der vier Dimensionen. Die Herausforderung besteht folglich darin, einen ausgewogenen Kompromiss zwischen den vier Dimensionen zu finden.²²⁸

Die Multidisziplinarität von CPS und deren Integration in Ökosysteme erfordern eine verhältnismäßig hohe Kollaboration und Abstimmung zwischen verschiedenen Produktdomänen und Unternehmen. Fitzgerald u.a. (2015) führen einerseits an, dass eine isolierte Behandlung der einzelnen Domänen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses die Innovationsgeschwindigkeit und Produktqualität verringert. Andererseits verdeutlichen sie, dass eine kollaborative und multidisziplinäre Produktentwicklung zeit- und kostenintensiv ist. Sie identifizieren den Bedarf geeigneter Methoden, zur kosteneffektiven, kollaborativen Produktentwicklung multidisziplinärer Systeme.²²⁹

Heiss u.a. (2015) verdeutlichen das Dilemma zwischen der Erreichung von kostengünstigen und gleichzeitig qualitativ hochwertigen Produkten vor dem die Produktentwicklung steht. Beide Ausprägungen sind für den Kunden von hohem Interesse. Die Komplexität von CPS gestaltet eine kostengünstige Produktentwicklung, ohne die Erfüllung der Qualitätsanforderungen zu vernachlässigen, herausfordernd.²³⁰

Törngren u.a. (2014) zeigen die Notwendigkeit eines integrierten Managements aller Stakeholder und deren Interessenspunkte auf, um die Systeme im gewünschten Zeitraum, zu den gewünschten Kosten und zu den gewünschten Qualitätsanforderungen entwickeln zu können.²³¹ Eine notwendige Standardisierung, beispielweise von Kommunikationsprotokollen, im Ökosystem wird von Rüchardt und Bräuchle (2016) als Hindernis hinsichtlich der Erfüllung des Innovationsdrucks angeführt. Standards gehen mit einer Reduzierung auf den kleinsten gemeinsamen Nenner der Funktionalitäten verschiedener Systeme einher. Unternehmen müssen sich den Standards anpassen, um am Ökosystem teilnehmen zu können. Das Innovationspotential des Produkts wird entsprechend eingedämmt.²³²

²²⁷ Vgl. Penas u.a. (2017), S. 52

²²⁸ Vgl. Sneed (1987), S. 42, 171

²²⁹ Vgl. Fitzgerald u.a. (2015), S. 40

²³⁰ Vgl. Heiss u.a. (2015), S. 4

²³¹ Vgl. Törngren u.a. (2014), S. 746

²³² Vgl. Rüchardt und Bräuchle (2016), S. 30

Neben den Einflussfaktoren Kostendruck, Zeitdruck und Innovationsdruck lässt sich in der Literatur, primär im Kontext von PSS, der zunehmende Anspruch an Nachhaltigkeit als ökonomischer Einflussfaktor identifizieren. Folglich gilt es in die Produktentwicklung ökologische und sozioethische Aspekte einfließen zu lassen. Sousa-Zomer und Miguel (2017) sprechen, im Sinne der Nachhaltigkeit, korrekt entwickelten PSS die Fähigkeit zu, die Ressourceneffizienz zu erhöhen. Dies kann einerseits dadurch erreicht werden, dass die tangible Komponente von PSS von verschiedenen Kunden wiederverwendet werden kann. Andererseits ermöglichen PSS die Verlängerung der Lebenszeit der tangible Komponente durch Wartungs- und Obsoleszenzpläne.²³³

Herausforderungen vor dem Hintergrund einer Produktentwicklung von nachhaltigen Systemen lassen sich einerseits auf methodischer Ebene (siehe 3.3.14) ausmachen. Sousa-Zomer und Miguel (2017) zeigen den Bedarf einer Methodik auf, die die Nachhaltigkeitsperspektive in die Anforderungserhebung mit einbezieht. Sie schlagen dazu ein QFD-basiertes Vorgehen vor.²³⁴ Rondini u.a. (2017) identifizieren die Notwendigkeit der Modellierung (siehe 3.3.11) der Nachhaltigkeitsperspektive. Im Kontext von PSS ist es notwendig, diese in die Simulationen des späteren Geschäftsprozess abzubilden.²³⁵

Andererseits bestehen Herausforderungen hinsichtlich der Produktentwicklung von nachhaltigen Systemen in der Denkweise der Unternehmen. Es gilt ein Bewusstsein von Nachhaltigkeit im Unternehmen zu schaffen, wobei die Vorteile und Möglichkeiten dieser aufgezeigt werden sollen.²³⁶ Darauf aufbauend ist notwendig, diese Denkweise auf kooperierende Unternehmen und Teilnehmer im Ökosystem zu übertragen. Es gilt die verschiedenen Geschäftsmodelle entsprechender Nachhaltigkeitsaspekte auszurichten und abzustimmen.²³⁷

3.3.8 Requirements Engineering

Dem Requirements Engineering bei der Produktentwicklung von CPS sind einige Herausforderungen zu zuordnen. Dabei tangieren diese sowohl Aufgabenbereiche der Anforderungsanalyse²³⁸ als auch der Anforderungsverwaltung²³⁹.

²³³ Vgl. Sousa-Zomer und Miguel (2017), S. 702-703

²³⁴ Vgl. Sousa-Zomer und Miguel (2017), S. 701f

²³⁵ Vgl. Rondini u.a. (2017), S. 6932

²³⁶ Vgl. Wolfenstetter u.a. (2015), S. 1225

²³⁷ Vgl. Bertoni u.a. (2016), S. 44

²³⁸ Vgl. Pohl (2010), S. 48-50

²³⁹ Vgl. Pohl (2010), S. 51

Die Anforderungserhebung betreffend identifizieren Nilsson u.a. (2018) die Herausforderung, dass ein Verständnis des Gesamtproduktes geschaffen werden muss. Andernfalls besteht die Gefahr, dass mögliche Abhängigkeiten zwischen einzelnen Produktkomponenten vernachlässigt werden.²⁴⁰ Zudem ist es notwendig ein interdisziplinäres Verständnis zu schaffen, sodass verschiedene Disziplinen eine gemeinsame Sprache sprechen, bzw. die verschiedenen Sprachen sprechen können.²⁴¹

Roecker u.a. (2017) führen an, dass auf Seiten der Kunden oftmals wenig technisches Know-How vorhanden ist. Dies gestaltet eine Erhebung der Kundenanforderungen insofern herausfordernd als dass sich Kunden mit der späteren Lösung möglicherweise nicht identifizieren können. Es bedarf die Vermittlung des notwendigen technischen Know-Hows auf einer angemessenen Abstraktionsebene, um das Vorstellungsvermögen der Kunden zu fördern.²⁴²

Pagliari u.a. (2017) bringen nahe, dass sich eine wohldefinierte Dokumentation der Anforderungen in der Spezifikation schwierig gestalten kann. Als Grund führen sie die Verschiedenartigkeit der einzelnen Systemkomponenten und Domänen an, in denen spezifische Beurteilungskriterien verwendet werden. Es ist notwendig, eine geeignete Abstraktionsebene zur Dokumentation der Anforderungen zu finden, die dennoch eine notwendige Detailgetreue zur Weiterverwendung in den einzelnen Domänen gewährleistet.²⁴³

Die Komplexität die durch die gesamtheitliche Berücksichtigung aller Domänen entsteht, schlägt sich in den dokumentierten Anforderungen nieder. Nilsson u.a. (2018) sowie Liebel u.a. (2018) identifizieren die Herausforderungen alle zugrundeliegenden Aspekte einer Anforderungen zu verstehen bzw. diese für alle an der Entwicklung Beteiligten verständlich zu formulieren. So ist es in der Umsetzung einer Anforderung oftmals schwierig nachzuvollziehen, warum eine Anforderungen so formuliert wurde, wie sie in der Spezifikation vorliegt. Die zum Verständnis der Anforderungen notwendigen Details gehen häufig durch eine Abstraktion verloren, da diese zum Zeitpunkt der Dokumentation für die spätere Umsetzung als nicht relevant erachtet werden. Aus diesem Grund ist es erfolgskritisch, die Beteiligten, die die Anforderungen weiterverwenden müssen, mit dem notwendigen Kontextwissen zu versorgen. Darüber hinaus

²⁴⁰ Vgl. Nilsson u.a. (2018), S. 884

²⁴¹ Vgl. Liebel u.a. (2018), S. 157

²⁴² Vgl. Roecker u.a. (2017), S. 3511

²⁴³ Vgl. Wolfenstetter u.a. (2017), S. 217, 221

gilt es, Anforderungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen zu verknüpfen, sodass notwendige Details mit einem abstrakteren Gesamtbild in Verbindung gebracht werden können.²⁴⁴

Das komplexe Konglomerat von Komponenten, aus denen sich ein CPS zusammensetzt hat Auswirkungen auf das Anforderungsmanagement. Dies gestaltet sich herausfordernd, betrachtet man die Schnelllebigkeit der CPS durch ihr evolutionäres Verhalten. Die Sicherstellung der Verfolgbarkeit und Wartbarkeit zahlreicher, verschiedenartiger Anforderungen, die verschiedene Domänen und Unternehmen betreffen können, ist entsprechend arbeitsintensiv.²⁴⁵ Werden Veränderungen an einer Systemkomponente oder an einem im Ökosystem beteiligten System vorgenommen, hat dies oftmals Auswirkungen auf andere Systeme und die damit verbundenen Anforderungen. Dies bedarf einer Aktualisierung und Versionierung der zugrundeliegenden Anforderungen und Artefakte, beispielsweise auf Modellebene.²⁴⁶

3.3.9 Flexibilität

Ein weiterer Problembereich, der sich im Kontext von CPS ergibt, ist die Notwendigkeit einer zunehmenden Flexibilität der Produktentwicklung. Vor dem Hintergrund eines ungewissen Systemverhaltens (siehe 3.3.5) und sich schnell ändernden oder unvorhersehbaren Kundenanforderungen mit dem Anspruch auf Individualität (siehe 3.3.2) gilt es die Produktentwicklung auf dynamische Veränderungen einzustellen. So soll gewährleistet werden, dass die Produktentwicklung die verändernden Anforderungen möglichst kurzfristig umsetzen und folglich auf die Veränderungen reagieren kann.

Aufgrund des Betriebs eines CPS im offenen Kontext, unterliegt dieses dynamischen, unvorhersehbaren Veränderungen. Dies kann dazu führen, dass sich Systemanforderungen über die Nutzungsphase des CPS hinweg verändern und entsprechende Anpassungen am System notwendig werden.²⁴⁷

Bures u.a. (2015) zeigen zwei Möglichkeiten auf, mit denen auf verändernde Systemanforderungen zur Laufzeit reagiert und entsprechende Ungewissheiten eingedämmt werden können. Mechanismen zum Monitoring des Systems tragen dazu bei auf unvorhergesehene Situationen flexibel reagieren zu können. Dabei werden möglichst viele, teilweise irrelevante Daten des Systems und der Umgebung erhoben, um

²⁴⁴ Vgl. Nilsson u.a. (2018), S. 884-886 und Liebel u.a. (2018), S. 155

²⁴⁵ Vgl. Fitzgerald u.a. (2015), S. 44

²⁴⁶ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 29

²⁴⁷ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 31 und Bartelt u.a. (2015), S. 22

auf jedwedem Szenario eingestellt zu sein. Zudem nennen die Autoren die Möglichkeit über menschliches Eingreifen, d.h. über das Eingreifen der Entwickler, zur Laufzeit auf verändernde Systemanforderungen zu reagieren. Die Autoren schließen, dass eine Balance zwischen der flexiblen Reaktion auf jede Anforderung einerseits und der Verwaltbarkeit des Entwicklungsprozess andererseits gefunden werden muss.²⁴⁸

Die zunehmende Kundenorientierung bedarf eine flexible Reaktion auf die Anforderungen der Kunden über den gesamten Lebenszyklus eines CPS. Diese Anforderungen gilt es kontinuierlich zu identifizieren, geeignet zu kanalisieren und in die Produktentwicklung einzubeziehen.²⁴⁹ Die Vielzahl verschiedener, verteilter Kundenschnittstellen erschwert eine Kanalisierung des Kundenfeedbacks. Dies bedarf neuer Feedback-Mechanismen, wie beispielsweise der Generierung von anonymisierten Nutzungsdaten der Systeme.²⁵⁰ Um eine flexible Reaktion auf Kundenfeedback zu ermöglichen bedarf es einer automatisierten Analyse des Feedbacks, auf die die Produktentwicklung aufbauen kann.²⁵¹

Neben der flexiblen Ausrichtung der Anforderungserhebung wird in der Literatur die Notwendigkeit eines flexiblen Systementwurfs thematisiert. Das entworfene System hat den Anspruch, flexibel auf Änderungen reagieren zu können. Durch eine möglichst modulare Architektur, wie z.B. einer *Microservice-Architektur*, soll es ermöglicht werden eine flexible Rekonfiguration des Systems auch während der Nutzungsphase vorzunehmen.²⁵²

3.3.10 Datenmanagement

Die verschiedenen Sensoren eines einzelnen ES erzeugen eine große Menge an Daten, die es zu verarbeiten gilt. Eine Vielzahl heterogener Systeme im Ökosystem führen zu einem erheblichen Anstieg der Datenmengen, die zwischen den Systemen ausgetauscht und verarbeitet werden müssen. Dabei führt die Heterogenität der Systeme, die verschiedene Datenquellen im Ökosystem darstellen, zu einer Vielfältigkeit der Daten. Hinzukommt eine Schnelligkeit der Daten, die häufig im Sekunden bzw. Millisekunden Bereich aktualisiert werden.²⁵³ *Big Data*, die geläufige Bezeichnung für

²⁴⁸ Vgl. Bures u.a. (2015), S. 31

²⁴⁹ Vgl. Song und Sakao (2017), S. 1673 und Vogel-Heuser u.a. (2015), S. 37

²⁵⁰ Vgl. Broy und Schmidt (2014), S. 72

²⁵¹ Vgl. Casale u.a (2016), S. 38

²⁵² Vgl. Wolfenstetter u.a. (2015), S. 1226 und Maleki u.a. (2018), S. 1587

²⁵³ Vgl. Udoh und Kotonya (2018), S. 67 und Nazarenko und Camrinha-Matos (2017), S. 12

Datenmengen mit diesen Charakteristika²⁵⁴, nehmen demnach Einfluss auf die Produktentwicklung von CPS.

Forgeau u.a. (2016) führen die Notwendigkeit an, eine Konsistenz der Daten verschiedener Systeme zu gewährleisten. Die angesprochene Vielfältigkeit der Daten führt zur Herausforderung, Daten verteilter Systeme zu integrieren, sodass diese, beispielweise zur Erfüllung gemeinsamer Funktionalitäten, für alle beteiligten Systeme verwertbar gemacht werden können. Es gilt folglich die Datenmodelle der verschiedenen Systeme im Kontext des Systementwurfs zu berücksichtigen und diese zu integrieren.²⁵⁵

Novales u.a. (2016) und Udoh und Kotonya (2018) zeigen die Notwendigkeit der Qualitätssicherung der Daten auf. Die Verteiltheit der Systeme führt zu einem erhöhten Risiko, dass korrupte Daten, beispielweise aufgrund des Ausfalls von Sensoren oder Kommunikationsschnittstellen, vorliegen. Die Existenz korrupter Daten kann zur Gefährdung der Qualitätsanforderungen des Gesamtsystems führen. Vor dem Hintergrund hoher Qualitätsanforderungen (siehe 3.3.6) kommt der Qualitätssicherung im Rahmen des Datenmanagements eine entsprechend hohe Bedeutung zu.²⁵⁶

Neben dem Datenmanagement im Kontext des Systementwurfs, kommt dem Datenmanagement eine wichtige Rolle bei der Erhebung von Nutzungsdaten der Systeme zu. Einerseits können diese als Feedback-Mechanismus und Anforderungsquelle genutzt werden und in die Produktentwicklung einbezogen werden. Andererseits dient ein Datenschatz als Grundlage für die Entwicklung und Umsetzung datenbasierter Geschäftsmodelle, die innerhalb der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen (siehe 3.3.13).²⁵⁷

Die Herausforderung der Verarbeitung und Interpretation von dienstleistungsbezogenen Daten, die Matschewsky u.a. (2018) aufgreifen lässt, sich zudem anführen. Bei der Entwicklung von PSS gilt es, geeignete Schnittstellen zum Dienstleistungspersonal zu schaffen, um relevante Kundendaten die die Produktkomponente betreffen, kanalisieren und verarbeiten zu können.²⁵⁸

²⁵⁴ Vgl. McAfee und Brynjolfsson (2012), S. 4-5

²⁵⁵ Vgl. Forgeau u.a. (2016), S. 147

²⁵⁶ Vgl. Novales u.a. (2016), S. 1601 und Udoh und Kotonya (2018), S. 67

²⁵⁷ Vgl. Casale u.a. (2016), S. 36 und Kuhlenkütter u.a. (2017), S. 343-344

²⁵⁸ Vgl. Matschewsky u.a. (2018), S. 2152

3.3.11 Systemmodellierung

Vor dem Hintergrund der modellbasierten Produktentwicklung und der Notwendigkeit durch eine möglichst frühe Simulation des Gesamtsystems eine Qualitätssicherung vorzunehmen nimmt die Systemmodellierung einen hohen Stellenwert in der Produktentwicklung von CPS ein.²⁵⁹ Ein großer Anteil der Literatur zeigt Herausforderungen hinsichtlich der Systemmodellierung von CPS auf.

Die Multidisziplinarität (siehe 3.3.1) von CPS einerseits und die Verteilung unterschiedlicher Systeme im Ökosystem (siehe 3.3.3) andererseits erfordert eine integrierte Modellierung der Systemkomponenten. Häufig werden jedoch separate, domänen- bzw. unternehmensspezifische Modelle erstellt. Diese koexistieren über den gesamten Lebenszyklus der einzelnen Systeme hinweg. Diese Koexistenz kann dazu führen, dass etwaige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Modellen und folglich auch den dazugehörigen Systemen vernachlässigt werden. Eine integrierte Modellierung gestaltet sich jedoch aus verschiedenen Gründen schwierig.²⁶⁰

Die Komplexität des zu modellierenden Gesamtsystems gestaltet eine Abbildung aller Komponenten im Modell schwierig. Es bedarf eine Abstraktion des Gesamtsystems, um die Komplexität im Modell zu reduzieren, und das Verständnis des Modells, sowie dessen Wartbarkeit zu erhöhen. Diese Abstraktion hat eine Vernachlässigung der Details zur Folge. Die Herausforderung ist es folglich, einerseits eine Abstraktion des Systems vorzunehmen, sodass die Komplexität reduziert und das Modell handhabbar gemacht wird und andererseits notwendige Details durch eine zu hohe Abstraktion nicht zu vernachlässigen.²⁶¹

Die Heterogenität und Multidisziplinarität der Systeme schlägt sich in deren Modelle nieder. So unterscheidet sich z.B. eine Modellierung von tangiblen Komponenten (z.B. mittels CAD) erheblich von der Modellierung von Software-Komponenten (z.B. mittels UML). Ein hybrider Formalismus, der eine kombinierte Modellierung von Software-Komponenten und tangiblen Komponenten erlaubt, ist schwer zu definieren. Die Integration verschiedener Modellierungsansätze gestaltet sich entsprechend herausfordernd.²⁶²

Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Systemkomponenten sind möglichst früh in der Produktentwicklung zu berücksichtigen und für fortschreitende Aktivitäten zu

²⁵⁹ Vgl. Törngren u.a. (2014), S. 745- 746

²⁶⁰ Vgl. Koutsoumpas (2015), S. 27

²⁶¹ Vgl. Bures (2014), S. 189

²⁶² Vgl. Pagliari u.a. (2017), S. 218 und Bures u.a. (2015), S. 29

dokumentieren. Dies bedarf eine entsprechend frühe Modellierung der Systemkomponenten. Plateaux u.a. (2017) zeigen allerdings auf, dass v.a. Modelle der tangiblen Komponenten in der Regel erst verhältnismäßig spät erstellt werden können, da notwendige 3D-Daten zumeist erst zum Zeitpunkt eines detaillierten Systementwurfs erhoben werden. Aus der frühen Modellierung aller Komponenten würde sich der Vorteil von Kosteneinsparung durch etwaigen Änderungsbedarf in späten Aktivitäten der Produktentwicklung ergeben.²⁶³

Wiesner u.a. (2014) thematisieren die Systemmodellierung im Kontext des Requirements Engineerings (siehe 3.3.8). Der Einbezug verschiedener Stakeholder aus verschiedenen Domänen erfordert eine informelle Anforderungsspezifikation, um diese für alle Stakeholder verständlich zu gestalten. Die Integration der spezifizierten Anforderungen in aktive Systemelemente und digitale Modelle, beispielsweise zur Simulation innerhalb des Gesamtsystems, erfordert hingegen formale Modellierungsansätze.²⁶⁴

3.3.12 Umfang und Komplexität des Lösungsraums

Die Heterogenität der Systemkomponenten von CPS weitet den ursprünglichen Lösungsraum im Vergleich zu einem herkömmlichen homogenen System, wie beispielsweise einem tangiblen Industriegut, erheblich aus. Dies bedeutet, dass die Vielfalt der Lösungen für ein bestimmtes Problem zunimmt. Dies eröffnet der Produktentwicklung einerseits eine Vielfalt neuer Entwurfsmöglichkeiten. Andererseits stellt ein vergrößerter und damit einhergehend komplexer Lösungsraum die Herausforderung dar, Kundenanforderungen und mögliche Lösungen handhabbar zu machen.²⁶⁵

Die Vielfältigkeit möglicher Lösungskonzepte gestaltet unter anderem auch die Bewertung und Auswahl dieser Lösungskonzepte komplex, wie Bertoni u.a. (2016) verdeutlichen.²⁶⁶

Ein umfangreicher Lösungsraum ermöglicht die Entwicklung innovativer Produkte bzw. Geschäftsmodelle. Dies mündet oftmals in unklaren Produktperspektiven und planlosen Produktentwicklungsprojekten ohne nötige Zielorientierung. Ein großer Lösungsraum besitzt folglich das Potential den am Markt gegenwärtigen Innovationsdruck gerecht zu werden, birgt jedoch die Gefahr einer ineffizienten Produktentwicklung (siehe

²⁶³ Vgl. Plateaux u.a. (2017), S. 596

²⁶⁴ Vgl. Wiesner u.a. (2014), S. 285

²⁶⁵ Vgl. De Roeck u.a. (2014), S. 521

²⁶⁶ Vgl. Bertoni u.a. (2016), S: 3

3.3.7), die Vernachlässigung einer Orientierung am Kunden (siehe 3.3.2), sowie die Nichterfüllung notwendiger Qualitätsanforderungen (siehe 3.3.6).²⁶⁷

3.3.13 Abstimmung mit dem Geschäftsmodell

Vereinzelte Arbeiten gehen auf die Abstimmung zwischen der Produktentwicklung und der Geschäftsmodellentwicklung ein. Die Komplexität der Systeme schlägt sich in den zugehörigen Geschäftsmodellen nieder. Moser u.a. (2015) führen an, dass die Entwicklung von zielführenden Geschäftsmodellen für PSS schwieriger ist als für die Entwicklung herkömmlicher, einfacher Produkte.²⁶⁸

Zhang und Banerji (2017) konkretisieren diese Aussage. Sie verdeutlichen, dass sich das Wertversprechen von einer einseitigen Wertstiftung zu einer beidseitigen Wertstiftung durch *Co-Creation* wandelt, was eine entsprechende Kundenorientierung (siehe 3.3.2) der Produktentwicklung voraussetzt. Zudem verändert sich die Ausrichtung notwendiger Ressourcen und Partnerschaften, beispielsweise über Unternehmensgrenzen hinweg (siehe 3.3.3). Die flexiblen Kosten- und Preisstrukturen haben dadurch Auswirkungen auf die Produktentwicklung, da zum einen die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Auswahl bestimmter Produktstrukturen (z.B. im Rahmen einer Nutzwertanalyse) und zum anderen die Umsetzung dieser Strukturen entsprechend flexibel gestaltet werden muss (siehe 3.3.9).²⁶⁹

Nylander u.a. (2017), die sich in ihrer Arbeit dem Thema Entwicklung von vernetzten Produkten im IoT widmen, zeigen den Bedarf einer Neuausrichtung des Geschäftsmodells auf. Hauptsächlich die Software-Komponente bringt den Anspruch der kontinuierlichen Wartung und Aktualisierung des Produktes mit sich. Traditionelle Abrechnungs- und Bereitstellungsmodelle durch den bloßen Verkauf eines Produktes werden durch flexible Modelle, wie z.B. Leasing- oder Abonnementmodelle, ergänzt oder gänzlich abgelöst. Es ergibt sich die Notwendigkeit einer Veränderung in der Beziehung zum Kunden (siehe 3.3.2) und damit einhergehend des Aufbaus entsprechender Kanäle, wie z.B. den Support des Produktes. Diese wiederum müssen entsprechende Schnittstellen zur Produktentwicklung besitzen und mit dieser abgestimmt sein.²⁷⁰

Kuhlenkötter u.a. (2017) thematisieren die Rolle des Geschäftsmodells im Kontext des Ökosystems (siehe 3.3.3) indem ein Produkt auftritt. Das kollaborative Verhalten von

²⁶⁷ Vgl. Roecker u.a. (2017), S. 3511- 3512

²⁶⁸ Vgl. Moser u.a. (2015), S. 21

²⁶⁹ Vgl. Zhang und Banerji (2017), S. 220

²⁷⁰ Vgl. Nylander u.a. (2017), S. 5

CPS bedarf eine Abstimmung der Geschäftsmodelle der am Ökosystem beteiligten kollaborativen Unternehmen. Diese müssen sich vor dem Hintergrund einer gemeinsamen Zielerreichung ergänzen und dürfen sich nicht widersprechen. In die Produktentwicklung von CPS gilt es deshalb sowohl das eigene Geschäftsmodell als auch die Geschäftsmodelle potentieller Partnerunternehmen einzubeziehen und abzustimmen.²⁷¹

3.3.14 Methodische und toolbasierte Unterstützung

Wie in den voranstehenden Problembereichen bereits angedeutet wurde, besteht in der Produktentwicklung von CPS ein Mangel an Unterstützung durch Methoden und Tools zur zielführenden Durchführung relevanter Aktivitäten. Unter Berücksichtigung ökonomischer Einflussfaktoren (siehe 3.3.7) und den hohen Qualitätsanforderungen (siehe 3.3.6) ist eine effiziente Gestaltung der Produktentwicklung durch entsprechenden Methodeneinsatz anzustreben.²⁷² Die Multidisziplinarität von CPS impliziert die Existenz disziplinspezifischer Methoden und Tools. Die Herausforderung liegt darin, diese hinsichtlich einer hybriden Produktentwicklung disziplinübergreifend zu integrieren, sodass verschiedene Domänenexperten eine gemeinsame Sicht auf den Problemlösungsprozess besitzen.²⁷³ Darüber hinaus gilt es eine effektive Kollaboration über Unternehmensgrenzen sicherzustellen. Es sind sowohl unternehmensinterne als auch unternehmensübergreifende Barrieren aufzulösen, die die Kommunikation und Kollaboration notwendiger Beteiligter hemmen.²⁷⁴

Maleki u.a. (2018) und Törngren u.a. (2014) motivieren eine multidisziplinäre Systematik zur Abstimmung verschiedener Standpunkte und den Einbezug aller heterogener Komponenten in das Entwicklungsprojekt. Verschiedenartige Modellierungswerkzeuge der einzelnen Komponenten gefährden ein disziplinübergreifendes Verständnis der Modelle. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass notwendige Abhängigkeiten zwischen den Modellen nicht berücksichtigt werden. Es ist demnach wichtig, eine Interoperabilität der Werkzeuge zu gewährleisten.²⁷⁵

Song (2017) kritisiert, dass Methoden des Requirements Engineerings bei der Produktentwicklung herkömmlicher, einfacher Produkte oder Dienstleistungen eine Behandlung der Anforderungen zur Entwicklung von PSS als hybride Produkte nicht

²⁷¹ Vgl. Kuhlenkütter u.a. (2017), S. 344

²⁷² Vgl. Heiss u.a. (2015), S. 4

²⁷³ Vgl. Chabot u.a. (2016), S. 396 und Barelt u.a. (2015) S. 23

²⁷⁴ Vgl. Iram u.a. (2016), S. 385-386 und Törngren u.a. (2014), S. 746

²⁷⁵ Vgl. Maleki u.a. (2018), S. 1586 und Törngren u.a. (2014), S. 746

zulassen. Zudem bringt er zum Ausdruck, dass diese Methoden in der Regel lediglich frühe Aktivitäten der Produktentwicklung fokussieren. Im Kontext von PSS ist jedoch der Einbezug fortgeschrittener Produktentwicklungsaktivitäten notwendig.²⁷⁶

Trevisan und Brissaud (2017) teilen diese Sicht. Sie fordern eine pragmatische Unterstützung, die derzeit lediglich bei der Entwicklung der separaten Komponenten in Form systematischer Methodologien vorliegt. Eine entsprechende ist auch für die integrierte Entwicklung von PSS notwendig.²⁷⁷

Broy und Schmidt (2014) bringen zum Ausdruck, dass bestehende Vorgehen des Requirements Engineerings nicht ausreichend sind, um die Masse verschiedener Anforderungen, die einem dynamischen und komplexen Umfeld unterliegen und von zahlreichen Stakeholdern stammen, handhabbar zu machen.²⁷⁸

Kuhlenkötter u.a. (2017) führen an, dass eine Weiterentwicklung bestehender Ansätze bzw. deren Integration zur erfolgreichen Entwicklung von CPS nicht zielführend ist. Die Komplexität der Systeme bedarf, im Vergleich zur herkömmlichen Produktentwicklung, grundlegend verschiedene Ansätze. Dies begründen sie v.a. durch die Unterschiedlichkeit der spezifischen Lebenszyklen in den einzelnen Domänen.²⁷⁹

Nach De Roeck u.a. (2014) sowie Nguyen-Duc u.a. (2019) erfordert der umfangreiche, komplexe Lösungsraum (siehe 3.3.12) und die Heterogenität der Produktstruktur (siehe 3.3.1) systematische Vorgehensweisen und eine Überarbeitung der Tools zum Prototyping und Erstellen eines sogenannten *Minimal-Viable-Products (MVP)*. Der Einbezug vernetzter Produkte und die Integration von tangiblen und digitalen Komponenten wird in den vorhandenen Tools und Vorgehensmodellen nicht fokussiert.²⁸⁰

²⁷⁶ Vgl. Song (2017), S. 12

²⁷⁷ Vgl. Trevisan und Brissaud (2017), S. 628

²⁷⁸ Vgl. Broy und Schmidt (2014), S. 72

²⁷⁹ Vgl. Kuhlenkötter u.a. (2017), S. 342

²⁸⁰ Vgl. De Roeck u.a. (2014), S. 521 und Nguyen-Duc u.a. (2019), S. 1

4. Schlussbetrachtung

4.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Ziel der Arbeit ist es folgende Hauptforschungsfrage zu beantworten, wobei diese in vier FF untergliedert wird, die die HFF gesamtheitlich beantworten:

HFF: Welche Herausforderungen entstehen bei der Produktentwicklung von CPS und wie können diese für weitere Forschungsarbeiten kommunizierbar gemacht werden?

Zur Beantwortung der HFF bedient sich die Arbeit einer methodisch rigorosen Vorgehensweise in Form einer strukturierten Literaturanalyse. Dabei werden 91 Herausforderungen identifiziert, die sich 14 Problemfeldern zuordnen lassen. Die umfangreichen Ergebnisse dieser Arbeit leisten somit einen wichtigen Beitrag für zukünftige Forschungsarbeit, indem die Komplexität der Masse an Herausforderungen durch eine strukturierte Übersicht dieser gemindert wird.

FF1: Wie lassen sich die Herausforderungen mittels einer strukturierten Literaturanalyse erheben?

In Kapitel 2 wird eine Vorgehensweise zur Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse vorgestellt. Dabei wird zunächst die Methodik im Allgemeinen motiviert. Ziel einer strukturierten Literaturanalyse ist es, die unübersichtliche Masse an bestehendem Wissen zu akkumulieren und eine Weiterentwicklung des Wissens durch das Aufzeigen von Forschungslücken oder -richtungen zu initiieren. Dabei liefern strukturierte Literaturanalysen die entscheidenden Vorteile der effektiven Erkenntnisgewinnung und Wahrung der methodischen Rigorosität (Nachvollziehbarkeit und Validität).

Neben der Motivation der Methodik wird ein Phasenmodell erläutert, welches fünf Phasen zur systematischen Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse umfasst. Die Durchführung der beiden Literaturanalysen in den Kapiteln 3.1 und 3.2 orientiert sich an diesen fünf Phasen. Es werden der Problemstellung entsprechende Suchterme erarbeitet, die zur Suche in fünf, den interdisziplinären Themenbereich abdeckende, Literaturdatenbanken verwendet werden.

Die Durchführung der ersten Literaturanalyse (siehe Kapitel 3.1) führt zu der Erkenntnis, dass das Vorgehen zur Identifizierung von Herausforderungen bei der herkömmlichen, einfachen Produktentwicklung nicht zielführend ist. Aus diesem Grund findet mit der Durchführung einer zweiten Literaturanalyse (siehe Kapitel 3.2) die Fokussierung der Analysedomänen statt, sodass anstelle der Produktentwicklung einfacher

Produkte, die Produktentwicklung hybrider Produkte analysiert wird. Eine erfolgreiche Durchführung der zweiten Literaturanalyse, liefert insgesamt 74 relevante Arbeiten, die die Grundlage für die weitere Arbeit darstellen.

FF2: Welche spezifischen Herausforderungen entstehen jeweils bei der isolierten Produktentwicklung von Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen?

Die Durchführung einer strukturierten Literaturanalyse zur Identifizierung von Herausforderungen bei der Produktentwicklung von Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen erweist sich als nicht zielführend. Eine signifikante Diskrepanz zwischen der Zielvorstellung und den Inhalten der Suchtreffer gefährdet die Erfüllung des Gesamtziels der Arbeit. Folglich findet im Sinne des iterativen Vorgehens des Phasenmodells eine Anpassung des Suchterms statt, sodass anstelle der einfachen Produkte, hybride Produkte als Analysegegenstand herangezogen werden. Diese Konkretisierung ermöglicht die Durchführbarkeit der Literaturanalyse (siehe Kapitel 3.2) und die Identifizierung relevanter Herausforderungen.

FF3: Inwieweit lassen sich die identifizierten Herausforderungen auf die Produktentwicklung von CPS als Leistungsbündel aus Softwareprodukten, tangiblen Produkten und Dienstleistungen übertragen?

In Kapitel 3.3 findet eine argumentativ-deduktive Übertragung auf Basis der in der zweiten Literaturanalyse (siehe Kapitel 3.2) identifizierten Herausforderungen statt. Diese Herausforderungen beziehen sich auf die Produktentwicklung hybrider Produkte, die zur Konzeptualisierung von CPS beitragen. Die Herausforderungen besitzen folglich bei der Produktentwicklung von CPS weiterhin Gültigkeit, weshalb eine Übertragbarkeit der Herausforderungen auf die Produktentwicklung von CPS gewährleistet ist. Die Übertragung und Strukturierung der Herausforderungen ergibt 14 Problemfelder, die im Rahmen der Produktentwicklung von CPS adressiert werden müssen. Im Einzelnen sind dies:

- Multidisziplinarität
- Orientierung am Kunden
- Orientierung am Ökosystem
- Einflussfaktor Mensch
- Ungewissheit hinsichtlich des Systemverhaltens
- Hohe Qualitätsanforderungen

- Ökonomische Einflussfaktoren
- Requirements Engineering
- Flexibilität
- Datenmanagement
- Systemmodellierung
- Umfang und Komplexität des Lösungsraums
- Abstimmung mit dem Geschäftsmodell
- Methodische und toolbasierte Unterstützung

FF4: Wie können die identifizierten Herausforderungen kommunizierbar und für weitere Forschungsarbeit zugänglich gemacht werden?

Die Durchführung der strukturierten Literaturanalyse ergibt eine Vielzahl von Herausforderungen. Eine bloße Auflistung dieser Herausforderungen würde die Kommunizierbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit nicht fördern. Um einen wertstiftenden Beitrag für weitere Forschungsarbeit zu leisten, wird deshalb eine Strukturierung der Herausforderungen vorgenommen. Mittels der KJ Methode wird ein Affinitätsdiagramm erstellt, das die Herausforderungen 14 Problemfeldern zuordnet. Diese 14 Problemfelder nehmen eine integrierte Thematisierung der 91 Herausforderungen vor. Sie leisten damit einen Beitrag zur Kommunizierbarkeit der Ergebnisse der Arbeit, sodass weitere Forschungsarbeit darauf aufbauen kann.

4.2 Kritische Würdigung der Arbeit

Wie aufgezeigt wurde erfüllt die Arbeit die zugrundeliegenden Ziele. Dennoch geht diese erwartungsgemäß mit Limitationen einher, die im Folgenden diskutiert werden sollen. In diesem Rahmen sollen sowohl Methodik als auch Ergebnisse kritisch gewürdigt werden.

Das Forschungsdesign der Arbeit orientiert sich an der DSRM. Diese empfiehlt sich um dem Anspruch an Relevanz und Rigorosität, die von der gestaltungsorientierten WI gefordert sind, gerecht zu werden. Ein problemzentriertes Vorgehen durch die Entwicklung und Evaluation eines Lösungsartefaktes soll dies bewerkstelligen. Im Rahmen der Arbeit wurde in den Kapiteln 1.1 und 1.2 eine Definitionen und Motivation des Problems vorgenommen. Zur Lösung dieses Problems wurde mit der Entwicklung eines kommunizierbaren Artefakts beigetragen. Jedoch sieht die DSRM auch eine

Evaluation der Lösung vor. Diese wurde im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt. Die Validität der Ergebnisse ist folglich in zukünftigen Arbeiten zu überprüfen.

Zur Identifizierung der Herausforderungen wurde eine strukturierte Literaturanalyse durchgeführt. Diese Methodik eignet sich zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit des Problemlösungsprozesses sowie der Validität der Ergebnisse. Darüber hinaus ermöglicht der iterative Charakter des Phasenmodells ein exploratives Vorgehen. Die Arbeit profitiert von diesem v.a. im Rahmen der Anpassung des Suchterms in Kapitel 3.2.

Das Vorgehen der strukturierten Literaturanalyse geht jedoch mit einer Subjektivität hinsichtlich der Entscheidungen innerhalb der Literatursuche einher. Die Wahl der Suchkriterien, wie beispielsweise des Suchterms oder -zeitraums, kann nur begrenzt objektiv begründet werden. Im Lesen der Literatur liegt ein Interpretationsspielraum vor, sodass die definierten Einschluss- bzw. Ausschlusskriterien nur begrenzte Rückschlüsse auf die Wahl bestimmter Literatur und die Extraktion bestimmter Herausforderungen zulassen.

In der durchgeführten Literaturanalyse wird, neben hochrangigen Fachzeitschriften und Konferenzbänden, auch graue Literatur berücksichtigt, um dem Anspruch auf Vollständigkeit der Herausforderungen gerecht zu werden. Rückschlüsse auf die Qualität der Ergebnisse sind folglich schwer zu ziehen.

Eine explorative Erarbeitung der Konzepte mit Verlauf der Analyse hat zur Folge, dass möglicherweise relevante, früh im Analyseprozess analysierte Literatur bei der Untersuchung der Suchtreffer nicht mit einbezogen wird. Eine Vollständigkeit der Konzeptmatrix in Bezug auf die Zuordnung von Herausforderungen und Literatur ist nicht gegeben. Dies ist jedoch mit dem festgelegten, selektiven Analysekontext der Literaturanalyse vereinbar.

Der Suchzeitraum der Literaturanalyse ist relativ klein festgelegt. Diese Beschränkung vernachlässigt eine Berücksichtigung zuvor veröffentlichter Literatur und möglicherweise Herausforderungen, die bereits außerhalb des Suchzeitraums relevant waren. Auf eine Vorwärts- bzw. Rückwärtssuche wird aufgrund der hohen Anzahl zu analysierender Literatur ebenfalls verzichtet.

Die KJ Methode zur Erstellung von Affinitätsdiagrammen stellt ein geeignetes Instrument zur Strukturierung einer Vielzahl von Informationen dar. Die Durchführung der Methode wurde jedoch alleinig durch den Autor vorgenommen, weshalb eine

Objektivität der Strukturierung nicht gewährleistet werden kann. Zudem ist anzumerken, dass durch die Strukturierung eine Abstraktion der Ergebnisse erfolgt. Ein entsprechender Verlust von Detailinformationen ist die Folge. Im Sinne der Kommunizierbarkeit der Ergebnisse ist dieser Informationsverlust allerdings zu vertreten.

Neben der Methodik weisen auch die Ergebnisse der Arbeit einige Limitationen auf. Eine strukturierte Literaturanalyse erweist sich für die Identifizierung von Herausforderungen bei der herkömmlichen, einfachen Produktentwicklung als ungeeignet, weshalb der Suchterm entsprechend der hybriden Produktentwicklung angepasst wird. Entsprechende Abstriche müssen bei der Beantwortung von FF2 gemacht werden. Das Gesamtergebnis der Arbeit rechtfertigt jedoch diese Abstriche.

Die Übertragung der Herausforderungen findet, vor dem Hintergrund einer Literaturanalyse aus neutraler Perspektive, ohne Positionsbezug des Autos statt. Eine entsprechende Diskussion ist nicht vorgesehen und bleibt folglich aus.

Betrachtet man die 14 Problemfelder so ist zu erkennen, dass diese in verschiedenen Abstraktionsebenen vorliegen. Die unterschiedliche Granularität der Problemfelder kann sich negativ auf die Verwendbarkeit der Ergebnisse in zukünftiger Forschungsarbeit auswirken. Ebenso sind die Problemfelder nicht trennscharf und weisen Abhängigkeiten auf. Eine separate Betrachtung der Problemfelder ist folglich schwierig. Die Arbeit zeigt die Zusammenhänge der Problemfelder nur begrenzt auf.

Letztlich ist zu kritisieren, dass die Problemfelder und die enthaltenen Herausforderungen sehr allgemein und oberflächlich dargelegt werden. Die Verallgemeinerung vernachlässigt einen spezifischen Bezug zu verschiedenen Anwendungsdomänen von CPS, der vor dem Hintergrund des umfangreichen Lösungsraums notwendig ist. Die essentielle Leistung der Arbeit ist dennoch die Minderung der Komplexität durch eine Verallgemeinerung einer Vielzahl von Herausforderungen. Sie bietet dadurch Ausgangspunkte für weitere Forschungsarbeit, in der eine Präzisierung der Inhalte erfolgen kann.

4.3 Ausblick

Aus den zuvor aufgezeigten Ergebnissen der Arbeit sowie deren Limitationen lassen sich einige Implikationen für zukünftige Forschungsarbeiten ableiten, die im Folgenden dargelegt werden sollen. Zudem soll ein mögliches Forschungsszenario skizziert werden.

In einem ersten Schritt gilt es die ausstehende Phase der Evaluation im Sinne der DSRM durchzuführen. Die Arbeit bildet mit dem Überblick über die verschiedenen Problemfelder einen guten Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeit im Kontext der Produktentwicklung im SiB. Allerdings ist es zuvor notwendig die Ergebnisse der Arbeit auf ihre Validität zu überprüfen. Bislang basieren die Erkenntnisse der Arbeit auf wissenschaftlicher Literatur. Ihre Relevanz in der Praxis gilt es im nächsten Schritt zu validieren. So können einerseits Fallstudien durchgeführt werden, die die Ergebnisse der Arbeit überprüfen. Zudem empfiehlt es sich in Expertenworkshops mit Vertretern aus Forschung und Praxis eine Priorisierung der Problemfelder vorzunehmen. Dies ermöglicht eine Beurteilung der Relevanz einzelner Problemfelder, sodass eine Fokussierung erfolgen kann. Darüber hinaus kann der Input von Experten, beispielsweise aus Interviews, dazu verwendet werden, bestimmte Problemfelder zu überarbeiten oder eine Restrukturierung der Übersicht vorzunehmen.

Die 14 Problemfelder bieten einen allgemeinen Überblick über die Herausforderungen bei der Produktentwicklung von CPS. Um jedoch Lösungsvorschläge ableiten zu können ist es notwendig die einzelnen Problemfelder zu konkretisieren. Eine Konkretisierung empfiehlt sich dann durchzuführen, wenn die Problemfelder hinsichtlich ihrer Relevanz priorisiert wurden. Eine Möglichkeit zur Konkretisierung einzelner Problemfelder stellt eine Durchführung präzisierter Literaturanalysen dar. Dies kann zum einen durch Vorwärts- und Rückwärtssuchen, die auf die in der Arbeit analysierte Literatur aufbauen, geschehen. Zum anderen können gänzlich neue Literaturanalysen durchgeführt werden, indem beispielsweise das Problemfeld betreffende Schlagworte und Konzepte aus der Arbeit und der analysierten Literatur abgeleitet werden. Darüber hinaus empfiehlt es sich die Herausforderungen in spezifischen Anwendungsdomänen von CPS zu untersuchen, um beispielsweise Unterschiede und Gemeinsamkeiten in diesen Domänen diskutieren zu können.

Aus den Ergebnissen der Arbeit lassen sich Gestaltungsempfehlungen für die Entwicklung von Vorgehensweisen und Tools zur Produktentwicklung von CPS ableiten. Basierend auf diesen Gestaltungsempfehlungen kann eine Beurteilung bestehender Ansätze zur Produktentwicklung stattfinden, sodass im nächsten Schritt eine Anpassung dieser bzw. eine komplette Neuentwicklung durchgeführt werden kann.

Die Multidisziplinarität von CPS, die Integration in Wertschöpfungsökosysteme sowie die Notwendigkeit zur kundenorientierten Produktentwicklung erfordern darüber hinaus eine Anpassung organisatorischer Strukturen. Es empfiehlt sich, aus den

Ergebnissen der Arbeit organisatorische Maßnahmen abzuleiten, die diese Anpassungen unterstützen.

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeit lässt sich ein mögliches Forschungsszenario formulieren. Zunächst soll eine Priorisierung der Problemfelder im Rahmen von Expertenworkshops durchgeführt werden. Dabei sollen diese nach ihrer Relevanz in der Praxis priorisiert werden. Hierbei soll auch eine Evaluation und Diskussion der Ergebnisse stattfinden. Aus den Erkenntnissen der Expertenworkshops sollen Anforderungen an die Methodik zur Produktentwicklung von CPS abgeleitet werden. Eine möglich Methodik, die diesen Anforderungen gegenübergestellt werden kann, stellt das Quality Function Deployment (QFD) dar. QFD eignet sich zur kundenorientierten Produktentwicklung unter Berücksichtigung hoher Qualitätsanforderungen. Zudem hat die Methodik den Anspruch, die Interessen aller Stakeholder zu berücksichtigen.²⁸¹

Die Betrachtung der Problemfelder führt zu der Annahme, dass die Methodik des QFD aufgrund ihrer Zielsetzung potentiell dazu geeignet ist, durch mögliche Anpassungen den Anforderungen der Produktentwicklung von CPS gerecht zu werden. Diese Annahme gilt es mit Entwicklung einer entsprechenden Methode, unter anderem unter Rückbezug auf die in dieser Arbeit erarbeiteten Problemfelder, zu überprüfen.

²⁸¹ Vgl. Akao (1992), S. 16

Anhang

Anhang 1: Übersicht über die in der strukturierten Literaturanalyse identifizierte relevante Literatur

Die folgende Liste beinhaltet alle Literaturquellen, die im Rahmen der strukturierten Literaturanalyse in Kapitel 3.2 als relevant identifiziert wurden (insgesamt 74 Arbeiten). Sie Liste enthält der Vollständigkeit halber auch Literaturquellen, die im Text nicht explizit referenziert werden. Das Literaturverzeichnis am Ende der Arbeit enthält nur die Literaturquellen, die selektiv zur Analyse im Text verwendet wurden.

Afsarmanesh, H., Camarinha-Matos, L.M. und Soares, A.L. (Hrsg., 2016), *Collaboration in a Hyperconnected World*, Cham 2016

Al Faruque, M., Regazzoni, F. und Pajic, M. (2015), Design methodologies for securing cyber-physical systems, in: 2015 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), 2015, S. 30-36

Bandyszak, T., Daun, M., Tenbergen, B. und Weyer, T. (2018), Model-based Documentation of Context Uncertainty for Cyber-Physical Systems, in: 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2018, S. 1087-1092

Bartelt, C., Rausch, A. und Rehfeldt, K. (2015), Quo Vadis Cyber-Physical Systems. Research Areas of Cyber-Physical Ecosystems. A Position Paper, in: Proceedings of the 1st International Workshop on Control Theory for Software Engineering, 2015, S. 22-25

Becker, M. und Zhang, B. (2018), How do our neighbours do product line engineering? - A comparison of hardware and software product line engineering approaches from an industrial perspective, in: Proceedings of the 22nd International Systems and Software Product Line Conference, 2018, S. 190-195

Bertoni, A., Bertoni, M., Panarotto, M., Johansson, C. und Larsson, T.C. (2016), Value-driven product service systems development: Methods and industrial applications, in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 15, 2016, 1, S. 42-55

Brambila-Macias, S.A., Sakao, T. und Kowalkowski, C. (2018), Bridging the gap between engineering design and marketing: insights for research and practice in product/service system design, in: Design Science, 4, 2018, 7, S. 1-61

Broy, M. und Schmidt, A. (2014), Challenges in Engineering Cyber-Physical Systems, in: Computer, 42, 2014, 2, S. 70-72

Bures, T. (2014), Development of Smart Cyber-physical Systems, in: Proceedings of the 17th International ACM Sigsoft Symposium on Component-based Software Engineering, 2014, S. 189-190

- Bures, T., Weyns, D., Berger, C., Biffi, S., Daun, M., Gabor, T., Garla, D., Gerostathopoulos, I., Julien, C., Krikava, F., Mordinyi, R. und Pronios, N. (2015), Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems – Towards a Research Agenda. Report on the First International Workshop on Software-Engineering for Smart CPS, in: ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 40, 2015, 6, S. 28-32
- Cardin, M.-A., Fong, S.H., Krob, D., Lui, P.C. und Tan, Y.H. (Hrsg., 2016), Complex Systems Design & Management Asia. Smart Nations – Sustaining and Designing: Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference on Complex Systems Design & Management, Cham 2016
- Casale, G., Chesta, C., Deussen, P., Di Nitto, E., Gouvas, P., Koussouris, S., Stankovski, V., Symeonidis, A., Vlasiou, V., Zafeiropoulos, A. und Zhao, Z. (2016), Current and Future Challenges of Software Engineering for Services and Applications, in: Procedia Computer Science, 97, 2016, 1, S. 34-42
- Chabot, M., Pierre, L. und Nabais-Moreno, A. (2016), A Requirement Driven Testing Method for Multi-disciplinary System Design, in: Proceedings of the ACM/IEEE 19th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, 2016, S. 396-405
- De Roeck, D., Stappers, P.J., und Standaert, A. (2014), Gearing up!: a designer-focused evaluation of ideation tools for connected products, in: Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, 2014, S. 521-530
- Ding, W., Yang, F.-J. und Srinivasan (2015), Declarative Cyber Physical Systems Modeling to Facilitate Autonomous Vehicles Design, in: 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2015, S. 354-359
- Eklund, U. und Berger, C. (2017), Scaling Agile Development in Mechatronic Organizations – A Comparative Case Study, in: IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice Track, 2017, S. 173-182
- Fargnoli, M. und Haber, N. (2019), A practical ANP-QFD methodology for dealing with requirements' inner dependency in PSS development, in: Computers & Industrial Engineering, 127, 2019, 1, S. 536-548
- Fitzgerald, J., Gamble, C., Larsen, P.G., Pierce, K. und Woodcock, J. (2015), Cyber-Physical Systems Design: Formal Foundations, Methods and Integrated Tool Chains, in: 2015 IEEE/ACM 3rd FME Workshop on Formal Methods in Software Engineering, 2015, S. 40-46
- Fourgeau, E., Gomez, E. und Hagege, M. (2016), Managing the Embedded Systems Development Process with Product LifeCycle Management, in: Cardin u.a. (Hrsg., 2016), S. 147-158
- Frömel, B. (2016), Interface Design in Cyber-Physical Systems-of-Systems, in: 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE), 2016, S. 1-8

- Grabot, B., Vallespir, B., Gomes, S., Bouras, A. und Kiritsis, D. (Hrsg., 2014), Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World. APMS 2014. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 438, Berlin und Heidelberg 2014
- Heiss, M., Oertl, A., Sturm, M., Palensky, P., Vielguth, S. und Nadler, F. (2015), Platforms for industrial cyber-physical systems integration: contradicting requirements as drivers for innovation, in: 2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 2015, S. 1-8
- Hofer, F. (2018), Architecture, Technologies and Challenges for Cyber-physical Systems in Industry 4.0: A Systematic Mapping Study, in: Proceedings of the 12th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, 2018, S. 1-10
- Iram, S., Fernando, T. und Bassanino, M. (2016), A Novel Hybrid Engineering Methodology to Enhance Collaboration During the Design and Development of Meta Product Services, in: Afsarmaesh u.a. (Hrsg., 2016), S. 385-393
- Jarus, N. Sedigh, S.S. und Hurson. A. (2016), Models, Metamodels, and Model Transformation for Cyber- Physical Systems, in: Seventh International Green and Sustainable Computing Conference (IGSC), 2016, S. 1-8
- Katumba, B. und Knauss, E. (2014), Agile Development in Automotive Software Development: Challenges and Opportunities, in: Jedlitschka u.a. (2014), S. 33-47
- Kellner, A., Ahrens, M., Friedl, M., Hehenberger, P., Weingartner, L., Zeman, K., Kernschmidt, K., Feldmann, S. und Vogel-Heuser, B. (2016), Challenges in Integrated Requirements in Model Based Development Processes in the Machinery and Plant Building Industry, in: 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), 2016, S. 1-6
- Kimita, K., Watanabe, K., Hara, T. und Komoto, H. (2015), in: 7th Industrial Product-Service-Systems Conference – PSS, industry transformation for sustainability and business, 30, 2015, 1, S. 372-377
- Koutsoumpas, V. (2015), A Model-based Approach for the Specification of a Virtual Power Plant Operating in Open Context, in: 2015 IEEE/ACM 1st International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems, 2015, S. 26-32
- Kriebel, F., Rehman, S., Hanif, M.A., Khalid, F. und Shafique, M. (2018), Robustness for Smart Cyber Physical Systems and Internet.of-Things: From Adaptive Robustness Methods to Reliability and Security for Machine Learning, in: 2018 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI), 2018, S. 581-586
- Krüger, J., Nielebock, S., Krieter, S., Diedrich, C., Leich, T., Saake, G., Zug, S. und Ortmeier, F. (2017), Beyond Software Product Lines: Variability Modeling in Cyber-Physical Systems, in: Proceedings of the 21st International Systems and Software Product Line Conference, 2017, S. 237-241

- Kuhlenkoetter, B., Bender, B., Wilkens, U., Abramovici, M., Goebel, J.C., Herzog, M., Hypki, A. und Lenkenhoff, K. (2017), Coping with the Challenges of Engineering Smart Product Service Systems – Demands for Research Infrastructure, in: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17). Vol 3: Product, Services, and Systems Design, 3, 2017, 1, S. 341-350
- Larrucea, X., Combelles, A., Favaro, J., Taneja, K. (2017), Software Engineering for the Internet of Things, in: IEEE Software, 34, 2017, 1, S. 24-28
- Lazarova-Molnar, S., Mohamed, N. und Shaker, H.R. (2017), Reliability modeling of cyber-physical systems: A holistic overview and challenges, in: 2017 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 2017, S. 1-6
- Liebel, G., Tichy, M., Knauss, E., Ljungkrantz, O. und Stieglbauer, G. (2018), Organisation and communication problems in automotive requirements engineering, in: Requirements Engineering, 23, 2018, 1, S. 145-167
- Lima, G.L.B., Ferreira, G.A.L., Saotome, O., da Cunha, A.M. und Dias A.B. (2015), Hardware Development: Agile and Co-Design, in: Proceedings of the Twelfth International Conference on Information Technology, 2015, S. 784-787
- Ly, K., Sun, W. und Jin, Y. (2016), Emerging Challenges in Cyber-Physical Systems: A Balance of Performance, Correctness, and Security, in: 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2016, S. 498-502
- Macher, G., Armengaud, E., Schneider, D., Brenner, E. und Kreiner, C. (2017), Towards Dependability Engineering of Cooperative Automotive Cyber-Physical Systems, in: Stolfa u.a. (Hrsg., 2017), S. 205-215
- Maleki, E., Belkadi, F. und Bernard, A. (2017), Systems Engineering as a Foundation for PSS Development Projects: Motivations and Perspectives, in: Procedia CIRP 64, 2017, S. 205-210
- Maleki, E., Belkadi, F. und Bernard, A. (2018), Industrial Product-Service System modelling base on Systems Engineering: Application of sensor integration to support smart services, in: IFAC PapersOnLine 52, 2018, 11, S. 1586-1591
- Matschewsky, J., Kambanou, M.L. und Sakao, T. (2018), Designing and providing integrated product-service systems – challenges, opportunities and solutions resulting from prescriptive approaches in two industrial companies, in: International Journal of Production Research, 56, 2018, 6, S. 2150-2168
- Moser, U., Maisenbacher, S., Kasperek, D. und Maurer, M. (2015), Definition of an Approach for the Development of Product-Service Systems, in: Procedia CIRP 30, 2015, 1, S. 18-23
- Mosterman, P.J. und Zander, J. (2016), Cyber-physical systems challenges: a needs analysis for collaboration embedded software systems, in: Software & Systems Modeling, 15, 2016, 1, S. 5-16

- Nazarenko, A.A. und Camarinha-Matos, L.M. (2017), Towards Collaborative Cyber-Physical Systems, in: 2017 International Young Engineers Forum (YEF-ECE), 2017, S. 12-17
- Nguyen-Duc, A., Khalid, K., Bajwa, S.S. und Lonnestad, T. (2019), Minimum Viable Products for Internet of Things Applications: Common Pitfalls and Practices, in: Future Internet, 11, 2019, 2, S. 1-21
- Nilsson, S., Sundin, E. und Lindahl, M. (2018), Integrated product service offerings – Challenges in setting requirements, in: Journal of Cleaner Production, 201, 2018, 1, S. 879-887
- Novalés, A., Mocker, M. und Simonovich, D. (2016), IT-enriched “Digitized” Products: Building Blocks and Challenges, in: Twenty-second Americas Conference on Information Systems, 2016, S. 1595-1604
- Nylander, S., Wallberg, A. und Hansson, P. (2017), Challenges for SME Entering the IoT World – Success is about so Much More than Technology, in: Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things. 2017, S. 1-7
- Osswald, S., Matz, S. und Lienkamp, M. (2014), Prototyping Automotive Cyber-Physical Systems, in: Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interface and Interactive Vehicular Applications, 2014, S. 1-6
- Pagliari, L., Mirandola, R. und Trubiani, C. (2017), A Case Study to Elicit Challenges for Performance Engineering of Cyber Physical System, in: Proceedings of the 8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering Companion, 2017, S. 217-222
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S. und Hammadi, M. (2017), Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems, in: Computers in Industry, 86, 2017, S. 52-69
- Plateaux, R., Penas, O., Barbedienne, R., Hehenberger, P., Choley, J.-Y. und Warniez, A. (2017), Use of technologically and topologically related surfaces (TTRS) geometrical theory for mechatronic design ontology, in: Computer Aided Design & Applications, 14, 2017, 5, S. 595-609
- Roecker, J., Mocker, M. und Novalés, A. (2017), Digitized Products: Challenges and Practices from the Creative Industries, in: Twenty-third Americas Conference on Information Systems, 2017, S. 3506-3515
- Rondini, A., Tomese, F., Gnoni, M.G., Pezzotta, G. und Pinto, R. (2017), Hybrid simulation modelling as a supporting tool for sustainable product service systems: a critical analysis, in: International Journal of Production Research, 55, 2017, 23, S. 6932-6945
- Rüchardt, D. und Bräuchle, C. (2016), A large software vendor’s view on Cyber Physical Systems, in: 3rd International Workshop on Emerging Ideas and Trends in Engineering of Cyber-Physical Systems (EITEC), 2016, S. 29-34

- Saleem, K., Shahzad, B., Orgun, M.A., Al-Muhtadi, J., Rodrigues, J.J.P.C. und Zakariah, M. (2017), Design and deployment challenges in immersive and wearable technologies, in: *Behaviour & Information Technology*, 36, 2017, 7, S. 687-698
- Saidi, S., Steinhorst, S., Hamann, A., Ziegenbein, D. und Wolf, M. (2018), Special Session: Future Automotive Systems Design: Research Challenges and Opportunities, in: *2018 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, 2018, S. 1-7
- Seshia, S.A., Hu, S., Li, W. und Zhu, Q. (2017), Design Automation of Cyber-Physical Systems: Challenges, Advances, and Opportunities, in: *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 36, 2017, 9, S. 1421-1434
- Shimomura, Y., Nemoto, Y., Ishii, T. und Nakamura, T. (2018), A method for identifying customer orientations and requirements for product-service systems design, in: *International Journal of Production Research*, 56, 2018, 7, S. 2585-2595
- Song, W. (2017), Requirement management for product-service systems: Status review and future trends, in: *Computers in Industry*, 85, 2017, 1, S. 11-22
- Song, W. und Sakao, T. (2017), A customization-oriented framework for design of sustainable product/service system, in: *Journal of Cleaner Production*, 140, 2017, 3, S. 1672-1685
- Song u.a. (2015), An integrative framework for innovation management of product-service system, in: *International Journal of Production Research*, 53, 2015, 8, S. 2252-2268
- Sousa-Zomer, T.T. und Miguel, P.A.C. (2017), A QFD-based approach to support sustainable product-service systems conceptual design, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2017, 1-4, S. 701-717
- Stolfa, J., Stolfa, S., O'Connor, R. und Messnarz, R. (Hrsg., 2017), *Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2017. Communications in Computer and Information Science*, 748, Cham 2017
- Tavcar und Horvath (2019), A Review of the Principles of Designing Smart Cyber-Physical Systems for Run-Time Adaptation: Learned Lessons and Open Issues, in: *IEEE Transactions on Systems Manufacturing and Cybernetics*, 41, 2019, 1, S. 145-157
- Törngren, M., Qamar, A., Biehl, M., Loiret, F. und El-khoury, J. (2014), Integrating viewpoints in the development of mechatronic products, in: *Mechatronics*, 24, 2014, 7, S. 745-762
- Trevisan, L. und Brissaud, D. (2017), A system-based conceptual framework for product-service integration in product-service system engineering, in: *Journal of Engineering Design*, 28, 2017, 10-12, S. 627-653

- Udoh, I.S. und Kotonya, G. (2018), Developing IoT applications: challenges and frameworks, in: IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 3, 2018, 2, S. 65-72
- Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, H., Kiritsis, D. und von Cieminski, G. (Hrsg., 2015), Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth, Cham, Heidelberg u.a. 2015
- Vogel-Heuser, B., Fomler, J., Aicher, T., Mund, J. und Rehberger, S. (2015), Coupling simulation and model checking to examine selected mechanical constraints of automated production systems, in: 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2015, S. 37-42
- Wagner, (2014), Scrum for cyber-physical systems: a process proposal, in: 1st International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering, 2014, S. 51-56
- Wallin, J., Parida, V. und Isaksson, O. (2015), Understanding product-service system innovation capabilities development for manufacturing companies, in: Journal of Manufacturing, 26, 2015, 5, S. 263-787
- Weidmann, D., Isemann, M., Kandlbinder, P., Hollauer, C., Kattner, N., Becerril, L. und Lindemann, U. (2017), Product Models in Mechatronic Design: Literature Analysis on the Interdisciplinary Character of Product Models, in: 2017 Proceedings of PICMET '17: Technology Management for Interconnected World, 2017, S. 1-7
- Wiesner, S., Gorltd, C., Soeken, M., Thoben, K.D. und Drechsler, R. (2014), Requirements Engineering for Cyber-Physical Systems. Challenges in the Context of "Industry 4.0", in: Grabot u.a. (Hrsg., 2014), S. 281-288
- Wiesner, S., Hauge, J.B. und Thoben, K.-D. (2015), Challenges for Requirements Engineering of Cyber-Physical Systems in Distributed Environments, in: Umeda u.a. (Hrsg., 2015), S. 49-58
- Wilberg, J., Heitzer, F., Hollauer, C. und Omer, M. (2017), Goal System Management for Use-Oriented Product-Service Systems, in: 2017 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), 2017, S. 1-7
- Wolfenstetter, T., Böhm, M., Krcmar, H. und Bründl, S. (2015), Why Product Service Systems Development is Special, in: Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015, S. 1221-1228
- Zhang, M., Yue, T., Ali, S., Selic, B., Okariz, O., Norgre, R. und Intxausti, K. (2018), Specifying uncertainly in use case models, in: Journal of Systems and Software, 144, 2018, 1, S. 573-603
- Zhang, W. und Banerji, S. (2017), Challenges of servitization: A systematic literature review, in: Industrial Marketing Management, 65, 2017, 1, S. 217-227

Anhang 3: Übersicht der Zuordnung der Herausforderungen zu den entsprechenden Problemfeldern

Problemfeld	Herausforderung
Multidisziplinarität	<ul style="list-style-type: none"> • Crossfunktionale Kollaboration schaffen • Gemeinsame Sprache (Pragmatik) • Kommunikationsschnittstellen • Anpassung der Organisationsstruktur • Gemeinsame(s) Produktvision/Systemverständnis • Entwicklung basierend auf Annahmen • Geeignete Abstraktionsebene des Gesamtsystems • Domänenspezifische Standards und Zertifizierungen • Unterschiedliche Produktlebenszyklen • Unterschiedliche Vorgehensmodelle • Leistungserstellung zum Zeitpunkt der Leistungserbringung • Notwendigkeit interdisziplinärer Fähigkeiten • Kultur des <i>information sharings</i> • Umdenken von goods-dominant logic zu service-dominant logic • Technisches Know-How notwendig
Orientierung am Kunden	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierlicher Einbezug des Kunden in alle Aktivitäten der Produktentwicklung • Masse heterogener Kundenanforderungen bei komplexem Lösungsraum • Geringes technisches Know-How des Kunden • Hohe Erwartungen des Kunden • Geringe Zahlungsbereitschaft • Individualisierung und Customization von Kundenlösungen • Variantenvielfalt ("Varianten Urwald")
Orientierung am Ökosystem	<ul style="list-style-type: none"> • Integration von verteilten, dezentralen Systemen • Kollaboration und Koordination aller Systeme und Stakeholder • Isolierte Entwicklung verschiedener Systeme ohne Berücksichtigung der Interoperabilität • Zentrale Planung des System of Systems • Verschiedene Produktlebenszyklen der einzelnen Systeme • Möglichst frühe und kontinuierliche Einbeziehung aller Stakeholder in die Produktentwicklung • Widersprechende Interessen und Erwartungen • Negativbeeinflussung anderer System durch unvorhersehbares Systemverhalten • Verständnis des Ökosystems • Entscheidungen hinsichtlich der Rolle innerhalb des Ökosystems • Entscheidungen hinsichtlich der Offenheit des Systems • Definition einer Ökosystem Governance
Einflussfaktor Mensch	<ul style="list-style-type: none"> • Mensch als aktive Systemkomponente (Human-in-the-loop)
Ungewissheit hinsichtlich des Systemverhaltens	<ul style="list-style-type: none"> • Ungewissheit im Requirements Engineering • Ungewissheit in der Systemmodellierung • Entwurfsautomatisierung
Hohe Qualitätsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexität erschwert Erfüllung der Erfüllung von Funktionalitätsanforderungen • Fokussierung von domänenspezifische Qualitätsanforderungen, statt Qualitätsanforderungen des Gesamtsystems • Abhängigkeit der Systeme im System of Systems • Ungewissheit des Systemverhaltens gefährdet Qualitätsanforderungen • Unternehmensübergreifende Standards und Protokolle zur Sicherstellung der Interoperabilität • Koexistenz von Anwendungen führt zu Konkurrenz um beschränkte Ressourcen • Erfüllung der Anforderung von Effizienz durch Ressourcenbeschränkungen • Hohes Risiko durch Angriffsfläche für Cyberattacken • <i>Nomadische Software</i> erfordert Portierbarkeit • Notwendigkeit einer frühen Qualitätssicherung durch Simulationen erfordert integrierte Modellierung

Ökonomische Einflussfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitdruck durch Anforderung an geringe Time-to-Market • Kostendruck • Innovationsdruck • Multidisziplinarität und Partizipation im Ökosystem fördern Innovation, sind allerdings kosten- und zeitintensiv • Erfüllung von Qualitätsanforderung vor dem Hintergrund der Komplexität ist zeit- und kostenintensiv • Notwendigkeit eines integrierten Managements aller Stakeholder zur Effizienzsteigerung • Einführung von Standards zur Effizienzsteigerung vs. Innovation • Nachhaltigkeit vs. Methodische Unterstützung und vorherrschende Denkweise
Requirements Engineering	<ul style="list-style-type: none"> • Interdisziplinäres Verständnis des Gesamtproduktes • Wenig technisches Know-How auf Seiten der Kunden • Dokumentation der Anforderungen in der Systemspezifikation aufgrund von Verschiedenartigkeit und Vielzahl der Komponenten • Verständnis der Anforderungsdokumentation aufgrund der hohen Systemkomplexität (Abstraktion vs. Detail) • Versorgung aller Beteiligten mit notwendigem Kontextwissen zum Verständnis der Anforderungen • Verknüpfung von Anforderungen auf verschiedenen Abstraktionsebenen • Aufwändige Verfolgbarkeit und Wartbarkeit der Anforderungen aufgrund der Evolution des Gesamtsystems
Flexibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Schnelle Reaktion auf verändernde Anforderungen (Ungewissheit, Kundenanforderungen) • Umsetzung der Anforderungen zur Laufzeit • Kanalisierung des Kundenfeedbacks • Flexibilität des Systementwurfs (Modularität)
Datenmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Big Data (Volumen, Schnellebigkeit, Varietät) • Gewährleistung von Konsistenz zur Integration • Sicherung der Datenqualität • Erhebung von Nutzungsdaten (Feedback Mechanismen, Anforderungsquelle, Datenbasierte Geschäftsmodelle) • Erhebung von Daten im Rahmen der Erbringung von Dienstleistung
Systemmodellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Modellierung der Systemkomponenten zur Vermeidung einer Koexistenz von Modellen • Komplexität erfordert Abstraktion des Gesamtsystems • Heterogenität der Modellierungsansätze in den verschiedenen Disziplinen • Frühe Modellierung v.a. bei tangiblen Komponenten nicht wirtschaftlich • Informelle Anforderungsspezifikation bei gleichzeitiger Notwendigkeit formaler digitaler Modelle
Umfang und Komplexität des Lösungsraums	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogenität der Systemkomponenten führt zu großem Lösungsraum und folglich komplexer Handhabbarkeit • Bewertung und Auswahl der Lösungskonzepte komplex • Unklare Produktperspektiven und planlose Produktentwicklungsprojekte
Abstimmung mit dem Geschäftsmodell	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexität des Produktes wirkt sich auf Komplexität des Geschäftsmodells aus • Flexibilität von Kosten- und Preisstrukturen hat Auswirkungen auf Auswahl bestimmter Produktstrukturen • Kontinuierliche Wartung und Aktualisierung des Produktes • Veränderung herkömmlicher Kundenbeziehungen • Abstimmung der Geschäftsmodelle von Partnerunternehmen im Ökosystemen
Methodische und toolbasierte Unterstützung	<ul style="list-style-type: none"> • Integration disziplinspezifischer Methoden und Tools • Notwendigkeit zur methodischen und toolbasierten Unterstützung der Kollaboration und Koordination • Interoperabilität von Modellierungswerkzeugen • Methoden des Requirements Engineerings für komplexe Systeme mit zahlreichen Stakeholdern unzureichend • Unterschiedlichkeit der Lebenszyklen verschiedener Disziplinen bedarf grundlegend neue Methodik • Prototyping von tangiblen Komponenten

Tabelle 5: Finale Zuordnung der 91 identifizierten Herausforderungen zu den 14 Problemfeldern nach Durchführung der KJ Methode

Literaturverzeichnis

- Abrahamsson, P., Bosch, J., Brinkkepmer, S. und Mädche, A. (Hrsg., 2018), Software Business, Platforms, and Ecosystems: Fundamentals of Software Production Research - Report from Dagstuhl Seminar 18182, Schloss Dagstuhl 2018
- ACM (2019), The ACM Full-Text Collection, Auf den Seiten der Association for Computing Machinery, Inc. , https://dl.acm.org/contents_dl.cfm?coll=portal&dl=ACM, Stand: 12.05.2019
- Afsarmanesh, H., Camarinha-Matos, L.M. und Soares, A.L. (Hrsg., 2016), Collaboration in a Hyperconnected World, Cham 2016
- AIS (2019), Research – Association for Information Systems (AIS), Auf den Seiten der Association for Information Systems (AIS), <https://aisnet.org/page/AISeLibrary>, Stand: 12.05.2019
- Akao, Y. (Hrsg., 1992), QFD – Quality Function Deployment, Landsberg am Lech 1992
- Akao, Y. (1992), Eine Einführung in Quality Function Deployment (QFD), in: Akao (Hrsg., 1992), S. 15-34
- Al Faruque, M., Regazzoni, F. und Pajic, M. (2015), Design methodologies for securing cyber-physical systems, in: 2015 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), 2015, S. 30-36
- Anderl, R., Eigner, M., Sendler, U. und Stark, R. (Hrsg., 2012), Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung, Berlin und Heidelberg 2012
- Atzori, L., Iera, A. und Morabito, G. (2010), The Internet of Things: A survey, in: Computer Networks, 54, 2010, 15, S. 2787-2805
- Baars, S. und Jansen, S. (2012), A Framework for Software Ecosystem Governance, in: Cusumano u.a. (Hrsg., 2012), S.168-180
- Backhaus, K. und de Zoeten, R. (1992), Organisation der Produktentwicklung, in: Frese (Hrsg., 1992), S. 2024-2039
- Baker, M.J. (2000), Writing a Literature Review, in: Marketing Review, 1, 2000, 2, S. 219-247
- Bandyszak, T., Daun, M., Tenbergen, B. und Weyer, T. (2018), Model-based Documentation of Context Uncertainty for Cyber-Physical Systems, in: 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2018, S. 1087-1092
- Bartelt, C., Rausch, A. und Rehfeldt, K. (2015), Quo Vadis Cyber-Physical Systems. Research Areas of Cyber-Physical Ecosystems. A Position Paper, in: Proceedings of the 1st International Workshop on Control Theory for Software Engineering, 2015, S. 22-25

- Becker, M. und Zhang, B. (2018), How do our neighbours do product line engineering? - A comparison of hardware and software product line engineering approaches from an industrial perspective, in: Proceedings of the 22nd International Systems and Software Product Line Conference, 2018, S. 190-195
- Bertoni, A., Bertoni, M., Panarotto, M., Johansson, C. und Larsson, T.C. (2016), Value-driven product service systems development: Methods and industrial applications, in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 15, 2016, 1, S. 42-55
- Bitkom (2019), Digitalisierung kommt in den deutschen Unternehmen an, Auf den Seiten des Bitkom - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V., <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierung-kommt-den-deutschen-Unternehmen>, Stand: 17.05.2019
- Boehm, M. und Thomas, O. (2013), Looking beyond the rim of one's teacup: a multidisciplinary literature review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering & Design, in: Journal of Cleaner Production, 51, 2013, S. 245-260
- Broy, M. (Hrsg., 2010), Cyber-Physical Systems – Innovation durch Software-intensive eingebettete Systeme, Berlin und Heidelberg 2010
- Broy, M. (2010), Cyber-Physical Systems – Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung, in: Broy (Hrsg., 2010), S. 17-31
- Broy, M. und Schmidt, A. (2014), Challenges in Engineering Cyber-Physical Systems, in: Computer, 42, 2014, 2, S. 70-72
- Bruhn, M. und Hadwich, K. (2006), Produkt- und Servicemanagement-Konzepte – Methoden, Prozesse, München 2006
- Bullinger, H.-J. und Scheer, A.-W. (Hrsg., 2006), Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen, 2, Berlin und Heidelberg 2006
- Bullinger, H.-J. und Scheer, A.-W. (2006), Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen, in: Bullinger und Scheer (Hrsg., 2006), S. 3-18
- Bullinger, H.-J. und Schreiner, P. (2006), Service Engineering: Ein Rahmenkonzept für die systematische Entwicklung von Dienstleistungen, in: Bullinger und Scheer (Hrsg., 2006), S. 52-84
- Bures, T. (2014), Development of Smart Cyber-physical Systems, in: Proceedings of the 17th International ACM Sigsoft Symposium on Component-based Software Engineering, 2014, S. 189-190
- Bures, T., Weyns, D., Berger, C., Biffel, S., Daun, M., Gabor, T., Garla, D., Gerostathopoulos, I., Julien, C., Krikava, F., Mordinyi, R. und Pronios, N. (2015), Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems – Towards a Research Agenda.

- Report on the First International Workshop on Software-Engineering for Smart CPS, in: ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 40, 2015, 6, S. 28-32
- Burr, W. (2016), Service Engineering bei technischen Dienstleistungen – Eine ökonomische Analyse der Modularisierung, Leistungstiefengestaltung und Systembündelung, 2, Wiesbaden 2016
- Cardin, M.-A., Fong, S.H., Krob, D., Lui, P.C. und Tan, Y.H. (Hrsg., 2016), Complex Systems Design & Management Asia. Smart Nations – Sustaining and Designing: Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference on Complex Systems Design & Management, Basel 2016
- Casale, G., Chesta, C., Deussen, P., Di Nitto, E., Gouvas, P., Koussouris, S., Stankovski, V., Symeonidis, A., Vlassiou, V., Zafeiropoulos, A. und Zhao, Z. (2016), Current and Future Challenges of Software Engineering for Services and Applications, in: Procedia Computer Science, 97, 2016, 1, S. 34-42
- Chabot, M., Pierre, L. und Nabais-Moreno, A. (2016), A Requirement Driven Testing Method for Multi-disciplinary System Design, in: Proceedings of the ACM/IEEE 19th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems, 2016, S. 396-405
- Clarivate (2019), Web of Science Core Collection, Auf den Seiten von Clarivate Analytics, <https://clarivate.com/products/web-of-science/web-science-form/web-science-core-collection/>, Stand: 12.05.2019
- Cooper, H.M. (1988), Organizing Knowledge Synthese: A Taxonomy of Literature Reviews, in: Knowledge in Society, 1, 1988, 1, S. 104-126
- Cusumano M.A., Iyer B. und Venkatraman N. (Hrsg., 2012), Software Business. ICSOB 2012. Lecture Notes in Business Information Processing, 114, Berlin und Heidelberg 2012
- De Roeck, D., Stappers, P.J., und Standaert, A. (2014), Gearing up!: a designer-focused evaluation of ideation tools for connected products, in: Proceedings of the 8th Nordic Conference on Human-Computer Interaction, 2014, S. 521-530
- DIN (1998), Service Engineering – Entwicklungsbegleitende Normungen (EBN) für Dienstleistungen, Berlin, Wien und Zürich 1998
- Ding, W., Yang, F.-J. und Srinivasan, S. (2015), Declarative Cyber Physical Systems Modeling to Facilitate Autonomous Vehicles Design, in: 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2015, S. 354-359
- Duden (2019a), cyber-, Cyber-, Auf den Seiten der Bibliographisches Institut GmbH, https://www.duden.de/rechtschreibung/cyber_, Stand: 12.05.2019
- Duden (2019b), physisch, Auf den Seiten der Bibliographisches Institut GmbH, https://www.duden.de/rechtschreibung/cyber_, Stand: 12.05.2019

- EBSCO (2019a), Academic Search Premier, Auf den Seiten der EBSCO Industries, Inc., <https://www.ebsco.com/products/research-databases/academic-search-premier>, Stand: 12.05.2019
- EBSCO (2019b), Business Source Premier, Auf den Seiten der EBSCO Industries, Inc., <https://www.ebsco.com/products/research-databases/business-source-premier>, Stand: 12.05.2019
- EBSCO (2019c), EconLit, Auf den Seiten der EBSCO Industries, Inc., <https://www.ebsco.com/products/research-databases/econlit>, Stand: 12.05.2019
- Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H. (2017), Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenspiel, 6, München und Wien 2017
- Eigner, M., Reiner, A. und Stark, R. (2012), Interdisziplinäre Produktentstehung, in: Anderl u.a. (Hrsg., 2012), S. 7-16
- Eklund, U. und Berger, C. (2017), Scaling Agile Development in Mechatronic Organizations – A Comparative Case Study, in: IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice Track, 2017, S. 173-182
- Fettke, P. (2006), State-of-the-Art des State-of-the-Art – Eine Untersuchung der Forschungsmethode „Review“ innerhalb der Wirtschaftsinformatik, in: Wirtschaftsinformatik, 48, 2006, S. 257-266
- Fitzgerald, J., Gamble, C., Larsen, P.G., Pierce, K. und Woodcock, J. (2015), Cyber-Physical Systems Design: Formal Foundations, Methods and Integrated Tool Chains, in: IEEE/ACM 3rd FME Workshop on Formal Methods in Software Engineering, 2015, S. 40-46
- Fourgeau, E., Gomez, E. und Hagege, M. (2016), Managing the Embedded Systems Development Process with Product LifeCycle Management, in: Cardin u.a. (Hrsg., 2016), S. 147-158
- Frese, E. (Hrsg., 1992), Handwörterbuch der Organisation, 3, Stuttgart 1992
- Frömel, B. (2016), Interface design in cyber-physical System-of-Systems, in: 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE), 2016, S. 1-8
- Gawer, A. (2014), Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework, in: Research Policy, 43, 2014, 1, S. 1239-1249
- Geisberger, E. und Broy, M. (Hrsg., 2012), agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems (acatech STUDIE), Berlin und Heidelberg 2012
- Geisberger, E., Broy, M., Cengarle, M.V., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C. und Thönnißen-Fries, H.-J (2012a), Einführung, in: Geisberger und Broy (Hrsg., 2012), S. 17-28

- Geisberger, E., Broy, M., Cengarle, M.V., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C. und Thönnißen-Fries, H.-J (2012b), Geschäftsmodelle und Ökosysteme, in: Geisberger und Broy (Hrsg., 2012), S. 175-190
- Gericke, K., Meißner, M. und Paetzold, K. (2013), Understanding the context of product development, in: Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED), S. 191-200
- Haller, S. (2017), Dienstleistungsmanagement. Grundlagen – Konzepte - Instrumente, 7, Wiesbaden 2017
- Herzwurm, G. (2000), Kundenorientierte Softwareproduktentwicklung, Stuttgart, Leipzig und Wiesbaden 2000
- Heiss, M., Oertl, A., Sturm, M., Palensky, P., Vielguth, S. und Nadler, F. (2015), Platforms for industrial cyber-physical systems integration: contradicting requirements as drivers for innovation, in: 2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), 2015, S. 1-8
- Hevner, A.R. (2007), A Three Cycle View of Design Science Research, in: Scandinavian Journal of Information Systems, 19, 2007, 2, S. 87-92
- Hofer, F. (2018), Architecture, Technologies and Challenges for Cyber-physical Systems in Industry 4.0: A Systematic Mapping Study, in: Proceedings of the 12th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, 2018, S. 1-10
- IEEE (2019a), About IEEE Xplore, Auf den Seiten des Institutes of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), <https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/#!/overview-of-ieee-xplore/about-ieee-xplore>, Stand: 12.05.2019
- IEEE (2019b), Advanced Search Tips in IEEE Xplore, Auf den Seiten des Institutes of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/downloads/user-guides/IEEE_Xplore_Advanced_Search_Tips.pdf, Stand: 13.05.2019
- Iram, S., Fernando, T. und Bassanino, M. (2016), A Novel Hybrid Engineering Methodology to Enhance Collaboration During the Design and Development of Meta Product Services, in: Afsarmaesh u.a. (Hrsg., 2016), S. 385-393
- ISO 16355-1 (2015), Applications of statistical and related methods to new technology and product development process - Part 1: General Principles and Perspectives of Quality Function Deployment (QFD), Genf 2015
- ISO/IEC 25010 (2011), Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models, Genf 2011
- Jasperneite, J. (2012), Industrie 4.0: Alter Wein in neuen Schläuchen?, in: Computer und Automation, 12, 2012, S. 24-28

- Jedlitschka, A., Kuvaja, P., Kuhrmann, M., Männistö, T., Münch, J. und Raatikainen, M. (Hrsg., 2014), *Product-Focused Software Process Improvement*, Helsinki, 2014
- Katumba, B. und Knauss, E. (2014), *Agile Development in Automotive Software Development: Challenges and Opportunities*, in: Jedlitschka u.a. (Hrsg., 2014), S. 33-47
- Kotler, P., Keller, K.L. und Opresnik, M.O. (2015), *Marketing-Management: Konzepte – Instrumente – Unternehmensfallstudien*, 14, Hallbergmoos 2015
- Koutsoumpas, V. (2015), *A Model-based Approach for the Specification of a Virtual Power Plant Operating in Open Context*, in: *IEEE/ACM 1st International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems*, 2015, S. 26-32
- Krüger, J., Nielebock, S., Krieter, S., Diedrich, C., Leich, T., Saake, G., Zug, S. und Ortmeier, F. (2017), *Beyond Software Product Lines: Variability Modeling in Cyber-Physical Systems*, in: *Proceedings of the 21st International Systems and Software Product Line Conference*, 2017, S. 237-241
- Kuhlenkötter, B., Bender, B., Wilkens, U., Abramovici, M., Göbel, J.C., Herzog, M., Hypki, A. und Lenkenhoff, K. (2017), *Coping with the challenges of engineering smart product service systems – Demand for research infrastructure*, in: *Proceedings of the 21th International Conference on Engineering Design (ICED17)*, 2017, S. 341-350
- Lazarova-Molnar, S., Mohamed, N. und Shaker, H.R. (2017), *Reliability modeling of cyber-physical systems: A holistic overview and challenges*, in: *2017 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 2017, S. 1-6
- Lee, E.A. (2008), *Cyber Physical Systems: Design Challenges*, Forschungsbericht des Center of Hybrid and Embedded Software Systems, EECS der University of California, Berkeley, Berkeley 2008
- Lee, E.A. und Seshia, S.A. (2015), *Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach*, 2, Cambridge 2015
- Levy, Y. und Ellis, T.J. (2006), *A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research*, in: *Informing Science Journal*, 9, 2006, 1, S. 181-212
- Liebel, G., Tichy, M., Knauss, E., Ljungkrantz, O. und Stieglbauer, G. (2018), *Organisation and communication problems in automotive requirements engineering*, in: *Requirements Engineering*, 23, 2018, 1, S. 145-167
- Lima, G.L.B., Ferreira, G.A.L., Saotome, O., da Cunha, A.M. und Dias A.B. (2015), *Hardware Development: Agile and Co-Design*, in: *Proceedings of the Twelfth International Conference on Information Technology*, 2015, S. 784-787

- Lindström, J., Ljöfstrand, M., Karlberg, M. und Karlsson, L. (2012), A development process for Functional Products: hardware, software, service support system and management of operation, in: *International Journal of Product Development*, 16, 2012, 3-4, S. 284-303
- Ly, K., Sun, W. und Jin, Y. (2016), Emerging Challenges in Cyber-Physical Systems: A Balance of Performance, Correctness, and Security, in: *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2016, S. 498-502
- Maleki, E., Belkadi, F. und Bernard, A. (2017), Systems Engineering as a Foundation for PSS Development Projects: Motivations and Perspectives, in: *Procedia CIRP* 64, 2017, S. 205-210
- Maleki, E., Belkadi, F. und Bernard, A. (2018), Industrial Product-Service System modelling base on Systems Engineering: Application of sensor integration to support smart services, in: *IFAC PapersOnLine* 52, 2018, 11, S. 1586-1591
- Matschewsky, J., Kambanou, M.L. und Sakao, T. (2018), Designing and providing integrated product-service systems – challenges, opportunities and solutions resulting from prescriptive approaches in two industrial companies, in: *International Journal of Production Research*, 56, 2018, 6, S. 2150-2168
- McAfee, A. und Brynjolfsson, E. (2012), Big Data: The Management Revolution, in: *Harvard Business Review*, 90, 2012, 10, S. 66-68
- Meffert, H., Burmann, C., Kirchgeorg, M. und Eisenbeiß, M. (2019), *Marketing – Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung*, 13, Wiesbaden 2019
- Mellis, W., Herzwurm, G. und Stelzer, D. (1996), Software Process Improvement via ISO 9000? Results of two surveys among European software houses, in: *Software Process – Improvement and Practices*, 2, 1996, S. 192-210
- Meyer, A., Kantsperger, R. und Blümelhuber, C. (2006), Service Engineering zur Internationalisierung von Dienstleistungen, in Bullinger und Scheer (Hrsg., 2006), S. 402-422
- Mikusz, M. (2014) , Towards an Understanding of Cyber-Physical Systems as Industrial Software-Product-Service Systems, in: *Procedia CIRP* 16, 2014, S. 385-389
- Mikusz, M. und Csiszar, A. (2015), CPS Platform Approach to Industrial Robots: State of the Practice, Potentials, Future Research Directions, in: *Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS) 2015 Proceedings*, S. 1-16
- Mikusz, M. (2018), Channel Multiplicity im Digitized, Connected Products, in: *Thirty Ninth International Conference on Information Systems*, S. 1-17
- Moser, U., Maisenbacher, S., Kasperek, D. und Maurer, M. (2015), Definition of an Approach for the Development of Product-Service Systems, in: *Procedia CIRP* 30, 2015, 1, S. 18-23

- Mostermann, P.J. und Zander, J. (2016), Cyber-physical systems challenges: a needs analysis for collaborating embedded software systems, in: *Software & Systems Modeling*, 15, 2016, 1, S. 5-16
- Nazarenko, A.A. und Camarinha-Matos, L.M. (2017), Towards Collaborative Cyber-Physical Systems, in: *2017 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, 2017, S. 12-17
- Nguyen-Duc, A., Khalid, K., Bajwa, S.S. und Lonnestad, T. (2019), Minimum Viable Products for Internet of Things Applications: Common Pitfalls and Practices, in: *Future Internet*, 11, 2019, 2, S. 1-21
- Novales, A., Mocker, M. und Simonovich, D. (2016), IT-enriched "Digitized" Products: Building Blocks and Challenges, in: *Twenty-second Americas Conference on Information Systems*, 2016, S. 1595-1604
- Nylander, S., Wallberg, A. und Hansson, P. (2017), Challenges for SME Entering the IoT World – Success is about so Much More than Technology, in: *Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things*, 2017, S. 1-7
- Osswald, S., Matz, S. und Lienkamp, M. (2014), Prototyping Automotive Cyber-Physical Systems, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interface and Interactive Vehicular Applications*, 2014, S. 1-6
- Österle, H., Becker, J., Frank, U., Hess, T., Karagiannis, D., Krcmar, H., Loos, P., Mertens, P., Oberweis, A. und Sinz, E.J. (2010), Memorandum zur gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 62, 2010, 6, S. 664-672
- Pagliari, L., Mirandola, R. und Trubiani, C. (2017), A Case Study to Elicit Challenges for Performance Engineering of Cyber Physical System, in: *Proceedings of the 8th ACM/SPEC on International Conference on Performance Engineering Companion*, 2017, S. 217-222
- Paré, G., Trudel, M.-C., Jaana, M. und Kitsiou, S. (2015), Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews, in: *Information & Management*, 52, 2015, S. 183-199
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A. und Chatterjee, S. (2007), A Design Science Research Methodology for Information Systems Research, in: *Journal of Management Information Systems*, 24, 2007, 3, S. 45-77
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S. und Hammadi, M. (2017), Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems, in: *Computers in Industry*, 86, 2017, S. 52-69
- Pervan, G.P. (1998), A review of research in group support systems: leaders, approaches and directions, in: *Decision Support Systems*, 23, 1998, 2, S. 149-159
- Plateaux, R., Penas, O., Barbedienne, R., Hehenberger, P., Choley, J.-Y. und Warniez, A. (2017), Use of technologically and topologically related surfaces (TTRS)

- geometrical theory for mechatronic design ontology, in: *Computer Aided Design & Applications*, 14, 2017, 5, S. 595-609
- Pohl, K. (2010), *Requirements Engineering. Fundamentals, Principles, and Techniques*, Berlin und Heidelberg 2010
- Porter, M.E. und Heppelmann, J.E. (2014), How Smart, Connected Products are transforming a competition, in: *Harvard Business Review*, 92, 2014, 11, S. 1-23
- Ragin, C. (1994), *Constructing Social Research*, London 1994
- Recker, J. (2013), *Scientific Research in Information Systems. A Beginner's Guide*, Heidelberg u.a. 2013
- Roecker, J., Mocker, M. und Novales, A. (2017), Digitized Products: Challenges and Practices from the Creative Industries, in: *Twenty-third Americas Conference on Information Systems*, 2017, S. 3506-3515
- Rondini, A., Tomese, F., Gnoni, M.G., Pezzotta, G. und Pinto, R. (2017), Hybrid simulation modelling as a supporting tool for sustainable product service systems: a critical analysis, in: *International Journal of Production Research*, 55, 2017, 23, S. 6932-6945
- Rowe, F. (2014), What literature review is not: diversity, boundaries and recommendations, in: *European Journal of Information Systems*, 23, 2014, S. 241-255
- Rowley, J. und Slack, F. (2004), Conducting a literature review, in: *Management Research News*, 27, 2004, 6, S. 31-39
- Rüchardt, D. und Bräuchle, C. (2016), A large software vendor's view on Cyber Physical Systems, in: *3rd International Workshop on Emerging Ideas and Trends in Engineering of Cyber-Physical Systems (EITEC)*, 2016, S. 29-34
- Saleem, K., Shahzad, B., Orgun, M.A., Al-Muhtadi, J., Rodrigues, J.J.P.C. und Zakaiah, M. (2017), Design and deployment challenges in immersive and wearable technologies, in: *Behaviour & Information Technology*, 36, 2017, 7, S. 687-698
- Saidi, S., Steinhorst, S., Hamann, A., Ziegenbein, D. und Wolf, M. (2018), Special Session: Future Automotive Systems Design: Research Challenges and Opportunities, in: *2018 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS)*, 2018, S. 1-7
- Schwarz, W. (1997), *Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen*, Berlin 1997
- Scheer, A.-W., Griebler, O. und Klein, R. (2006), Modellbasiertes Dienstleistungsmanagement, in: *Bullinger und Scheer (Hrsg., 2006)*, S. 19-51
- Seshia, S.A., Hu, S., Li, W. und Zhu, Q. (2017), Design Automation of Cyber-Physical Systems: Challenges, Advances, and Opportunities, in: *IEEE Transactions on*

- Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 36, 2017, 9, S. 1421-1434
- Sneed, H. (1987), Software-Management, Köln 1987
- Song, W. (2017), Requirement management for product-service systems: Status review and future trends, in: Computers in Industry, 85, 2017, 1, S. 11-22
- Song, W. und Sakao, T. (2017), A customization-oriented framework for design of sustainable product/service system, in: Journal of Cleaner Production, 140, 2017, 3, S. 1672-1685
- Sousa-Zomer, T.T. und Miguel, P.A.C. (2017), A QFD-based approach to support sustainable product-service systems conceptual design, in: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88, 2017, 1-4, S. 701-717
- Spath, D. und Demuß, L. (2006), Entwicklung hybrider Produkte – Gestaltung materieller und immaterieller Leistungsbündel, in: Bullinger und Scheer (2006), S. 463-502
- Statista (2019), Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions), Auf den Seiten der Statista, Inc., <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>, Stand: 17.05.2019
- Torraco, R.J. (2005), Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples, in: Human Resource Development Review, 4, 2005, 3, S. 356-367
- Törngren, M., Qamar, A., Biehl, M., Loiret, F. und El-khoury, J. (2014), Integrating viewpoints in the development of mechatronic products, in: Mechatronics, 24, 2014, 7, S. 745-762
- Trevisan, L. und Brissaud, D. (2017), A system-based conceptual framework for product-service integration in product-service system engineering, in: Journal of Engineering Design, 28, 2017, 10-12, S. 627-653
- Udoh, I.S. und Kotonya, G. (2018), Developing IoT applications: challenges and frameworks, in: IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 3, 2018, 2, S. 65-72
- Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, H., Kiritsis, D. und von Cieminski, G. (Hrsg., 2015), Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth, Cham, Heidelberg u.a. 2015
- VDI 2206 (2004), Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Düsseldorf 2004
- VDI 2221 (1993), Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf 1993

- VDI 2221-1 (2018), Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung, Düsseldorf 2018
- VDI 2221-2 (2018), Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse, Düsseldorf 2018
- Velamuri, V.K., Neyer, A.-K. und Möslein K.M. (2011), Hybrid value creation: a systematic review of evolving research area, in: *Journal für Betriebswirtschaft*, 61, 2011, S. 3-35
- Vogel-Heuser, B., Fomler, J., Aicher, T., Mund, J. und Rehberger, S. (2015), Coupling simulation and model checking to examine selected mechanical constraints of automated production systems, in: *13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2015, S. 37-42
- vom Brocke, J., Simons, A., Niehaves, B. und Reimer, K. (2009), Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process, in: *European Conference on Information Systems (ECIS) 2009 Proceedings*, 2009, S. 1-12
- Wallin, J., Parida, V. und Isaksson, O. (2015), Understanding product-service system innovation capabilities development for manufacturing companies, in: *Journal of Manufacturing*, 26, 2015, 5, S. 263-787
- Wagner, (2014), Scrum for cyber-physical systems: a process proposal, in: *1st International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering*, 2014, S. 51-56
- Webster, J. und Watson, R.T. (2002), Analyzing the Past to Prepare the Future: Writing a Literature Review, in: *MIS Quarterly*, 26, 2002, 2, S. xiii – xxiii
- Werder, K., Brinkkemper, S., Bosch, J., Cusumano, M.A., Herzwurm, G., Holmström, H., Hyrynsalmi, S., Kittlaus, H.-B., Kude, T., Margaria, T., Papatheocharous, E., Spinellis, D., Tyrväinen, P. und Wang, X. (2018), Working Group on Software-Intensive Business Research: Definition and Roadmap, in: *Abrahamsson u.a. (Hrsg., 2018)*, S. 193-196
- Wiener N. (1948), Cybernetics, in: *Scientific American*, 179, 1948, 5, S. 14-19
- Wiesner, S., Hauge, J.B. und Thoben, K.-D. (2015), Challenges for Requirements Engineering of Cyber-Physical Systems in Distributed Environments, in: *Umeda u.a. (Hrsg., 2015)*, S. 49-58
- Wipfler, H., Müller, C., Vorbach, S. und Marko, W.A. (2014), Hybride Leistungsbündel – Wenn Produkt und Service verschmelzen, in: *WINGbusiness*, 3, 2014, S. 6-10
- Wolfenstetter, T., Böhm, M., Krcmar, H. und Bründl, S. (2015), Why Product Service Systems Development is Special, in: *Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, 2015, S. 1221-1228