

Jan Hicking

Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau



Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh

Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau

Specification of Intelligent Products in Mechanical Engineering

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Jan Hicking

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
apl. Prof. Dr.-Ing. Volker Stich

Tag der mündlichen Prüfung: 08. September 2020

SCHRIFTENREIHE RATIONALISIERUNG

Jan Hicking

Spezifikation von intelligenten Produkten im
Maschinenbau

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Band 175

fir  an der
RWTH Aachen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Jan Hicking:

Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau

1. Auflage, 2020

Apprimus Verlag, Aachen, 2020
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-907-2

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Versprechen eingelöst Großvater.

Danksagung

Die Zeit fliegt dahin – und sie vergeht noch schneller, wenn sich dazu entschlossen wird, zu promovieren. Die Zeit von meinem ersten Tag am Institut bis zum Tag der Promotionsprüfung verging wie im Flug. Und obwohl so vieles erlebt, neue Erfahrungen gemacht und neue Erkenntnisse gewonnen worden sind, fühlt sich der Weg, trotz eines Blicks zurück, zeitlich wie ein Wimpernschlag an.

Nicht endende Motivation ist ein weiterer wesentlicher Baustein neben der Stütze im privaten Raum, der als Erfolgsfaktor für einen Promotionsprozess gelten kann. Ohne gewisse Personen wäre dieser Prozess für mich offensichtlich nicht möglich bzw. deutlich schwieriger gewesen. Denn es ist von besonderer Wichtigkeit, dass einen selbst Menschen umgeben, die sich in einem vergleichbaren Lebensabschnitt befinden, die temporäre Frustration nachvollziehen können und durch gute Lösungsvorschläge zur Wiederfindung der Motivation beitragen. Einerseits sind dort meine langjährigen Begleiter und Unterstützer Dr. Sebastian Schmitz, Dr. Anne Bernardy, Dr. Martin Bleider, Dr. Jörg Hoffmann, Pit Heimes, Dr. Violett Zeller und Dr. Matthias Deindl zu nennen. Andererseits möchte ich meinen Mitarbeitern Lennart Terjung, Patrick Lünendonk und Tim Lanzerath dafür danken, dass sie sich die Zeit genommen haben, Ideen, Konzepte und Ergebnisse kritisch zu hinterfragen und zu evaluieren.

Den Weg zur Promotion haben mir mein Doktorvater und Direktor des FIR, Prof. Dr. Günther Schuh, und unser Geschäftsführer, Prof. Dr. Volker Stich ermöglicht, die allen Promovierenden ein inspirierendes, lebendiges und industrienahes Umfeld geschaffen haben. Viele grundlegende Ansätze und Ideen wären ohne den intensiven Austausch mit Industriepartnern im Umfeld des RWTH Aachen Campus nicht möglich gewesen.

Die größte Herausforderung in dieser Zeit war, geliebten Menschen, sei es die eigene Frau oder enge Freunde in energiezehrender Regelmäßigkeit mit Verweis auf das Promotionsverfahren trösten zu müssen. Daher gilt mein größter Dank meiner Frau, Alicia, meiner Familie und meinen Freunden, die zu jedem Zeitpunkt vollstes Verständnis für meine Abwesenheit aufbringen konnten.

Aachen, im September 2020

Jan Hicking

Vorbemerkung

Alle Markennamen wurden aus Gründen der einfachen Lesbarkeit jeweils nur bei erster Nennung mittels Copyright- oder Trademarke-Zeichen dargestellt. Der Autor steht in keiner Beziehung zu den aufgezählten Unternehmen und deren Produkten, sie werden jeweils nur als Exemplare bekannter Marken angegeben.

Auf eine gendergerechte Schreibweise wurde aus Gründen der einfachen Lesbarkeit in der vorliegenden Untersuchung verzichtet. Dies darf in keiner Weise diskriminierend verstanden werden, vielmehr sind mit Begriffen wie „Mitarbeiter“, „Kunde“ oder „Anbieter“ sowohl die männliche als auch die weibliche Formen sowie alle nicht dem binären Geschlechtssystem zugeordneten Formen, die auch als „divers“ bezeichnet werden, gemeint.

Zusammenfassung

Der gesellschaftliche Wunsch, nachhaltiger zu leben und die zur Verfügung stehenden Ressourcen effizient einzusetzen, wird in nutzerzentrierten Geschäftsmodellen und den darin eingesetzten intelligenten Produkten berücksichtigt, die sich während der Nutzungsphase anpassen können, um Kunden neuen Mehrwert zu bieten. Ein Verständnis über das Nutzungsverhalten und die tatsächlichen Bedarfe der Kunden während der Nutzungsphase zu erhalten, löst das Paradoxon der Produktentwicklung auf, erst wissen zu können, wessen ein Kunde bedarf, wenn das Produkt bereits fertiggestellt ist. Obwohl der Einsatz intelligenter Produkte im Privatkundenbereich zum Stand der Technik gehört, stehen mittelständische Maschinenbauer vor großen die Smartifizierung betreffenden Herausforderungen. Neben Vorgehensmodellen, die vorrangig bei konstruktiven Fragestellungen oder bei Neuentwicklungen unterstützen, fehlt es auch an Aspekten der Vernetzung und Digitalisierung, die in Methoden des Anforderungsmanagements nicht enthalten sind. Somit wissen mittelständische Unternehmen nicht, welche Methoden geeignet sind, um bestehende Produkte zu smartifizieren. Daher repräsentiert der Übergang vom Anforderungs- in den Lösungsraum während der Entwicklung intelligenter Produkte eine große Hürde, die es methodisch mithilfe der vorliegenden Untersuchung zu lösen gilt.

Um jene zu beherrschen, wird eine Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau entwickelt. Diese beruht auf generischen Entwicklungszielen und Anwendungsfällen, um unter Berücksichtigung spezifischer Rahmenbedingungen Digitalisierungsanforderungen abzuleiten, die die Initiierung von Smartifizierungsprojekten unterstützen und beschleunigen. Anhand des Fallstudienforschungsprozesses werden zunächst generische Entwicklungsziele identifiziert, beschrieben und mittels Literaturrecherche ergänzt. Das gleiche Vorgehen wird zur Identifikation von Anwendungsfällen intelligenter Produkte angewendet, welche mittels Use-Case-Modellierung beschrieben und illustriert werden. Abschließend werden spezifische Rahmenbedingungen von Maschinenbauprodukten abgeleitet, die mittels eines morphologischen Kastens strukturiert sind. Des Weiteren werden Digitalisierungsanforderungen für intelligente Produkte beschrieben. Um die Anforderungen systematisch zu beschreiben, wird ein morphologischer Kasten aufgestellt, welcher die Ordnung des möglichen Lösungsraums gewährleistet. Anschließend werden die Wirkungszusammenhänge zwischen den Beschreibungselementen erläutert, die das Bindeglied zwischen den Einzелеlementen darstellen.

Die Anwendung der Methode erfolgt sequenziell an der Schnittstelle von planerischen und konzipierenden Aktivitäten mit dem Fokus auf der Smartifizierung eines bestehenden Produkts. Das Ergebnis der Anwendung ist eine zielbezogene und anwendungsspezifische Spezifikation, die den Entwicklungsprozess beschleunigt. Die entwickelte Methode wurde in zwei Fallstudien angewendet und erfolgreich überprüft.

Summary

The social desire to live more sustainably and to use available resources efficiently is taken into account in user-centred business models and the intelligent products used in them, which can adapt during the usage phase to offer customers new added value. Understanding the usage behavior and actual needs of customers during the usage phase resolves the paradox of being able to know what a customer needs when the product is already produced. Although the use of intelligent products in the private customer sector is state of the art, medium-sized machine manufacturers face major challenges in terms of smartification. In addition to process models, which primarily support constructive questions or new developments, there are also missing aspects of networking and digitization, which are not included in methods of requirements management. Thus, medium-sized companies do not know which methods are suitable to smartify existing products. Therefore, the transition from the requirements space to the solution space during the development of intelligent products represents a major hurdle, which has to be solved methodically with the help of the present study.

In order to master these, a method for the specification of intelligent products in mechanical engineering is being developed. This is based on generic development goals and application cases in order to derive digitization requirements that support and accelerate the initiation of smartification projects under specific framework conditions. Based on the case study research process, generic development goals are first identified, described and supplemented by means of literature analysis. The same procedure is used to identify use cases of intelligent products, which are described and illustrated by means of Use Case Modeling. Finally, specific framework conditions are derived from mechanical engineering products which are structured by means of a morphological box. Furthermore, digitisation requirements for intelligent products are described. In order to describe the requirements systematically, a morphological box is set up, which ensures the order of the possible solution space. Subsequently, the interdependencies between the description elements, which represent the link between the individual elements, are explained.

The method is applied sequentially at the interface of planning and design activities with a focus on the smartification of an existing product. The result of the application is a target-oriented and application-specific specification that accelerates the development process. The developed method was successfully tested in two case studies.

Inhaltsübersicht

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Abgrenzung der Untersuchung	9
3	Stand der Erkenntnisse.....	35
4	Herleitung des Konzeptansatzes.....	79
5	Beschreibungselemente zur Spezifikation intelligenter Produkte	105
6	Beschreibung der Anforderungen an intelligente Produkte.....	165
7	Wirkung von Beschreibungselementen auf Anforderungen	187
8	Gestaltung der Methode zur Spezifikation intelligenter Produkte.....	237
9	Evaluation	245
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	265
11	Literaturverzeichnis.....	269
	Anhang	309

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfrage	4
1.3	Wissenschaftstheoretische Einordnung und Aufbau der Arbeit.....	5
2	Grundlagen und Abgrenzung der Untersuchung	9
2.1	Betrachtung intelligenter Produkte	9
2.1.1	Bestimmung des Begriffs „Produkt“	9
2.1.2	Bestimmung des Begriffs „Intelligentes Produkt“	13
2.1.3	Exkurs: Menschliche und Künstliche Intelligenz	17
2.1.4	Bestimmung des Begriffs „Mehrwertdienst“	18
2.2	Begriffe im Kontext des Informationsmanagements	19
2.2.1	Informationsmanagement.....	19
2.2.2	Informations- und Kommunikationstechnologie.....	21
2.2.3	Daten und Informationen	21
2.3	Grundlagen und Definitionen im Kontext der Produktentwicklung.....	25
2.3.1	Produktentwicklungsprozess	25
2.3.2	Art des Entwicklungsprojekts.....	27
2.3.3	Entwicklungsziel	27
2.3.4	Produktlebenszyklus.....	28
2.3.5	Anforderung und Spezifikation	29
2.4	Abgrenzung des Untersuchungsbereichs.....	31
3	Stand der Erkenntnisse	35
3.1	Beschreibungselemente zur Spezifikation intelligenter Produkte	35
3.2	Modelle zur Beschreibung der Produktintelligenz	40
3.3	Vorarbeiten zur systematischen Beschreibung intelligenter Produkte.....	47
3.3.1	Architekturen intelligenter Produkte.....	47
3.3.2	Vorarbeiten zu hybriden Leistungssystemen	58
3.3.3	Taxonomien intelligenter Produkte	59
3.4	Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung	65
3.5	Methoden des Anforderungsmanagements für intelligente Produkte.....	73
3.6	Zwischenfazit und Ableitung des Forschungsbedarfs	77
4	Herleitung des Konzeptansatzes	79
4.1	Anforderungen an die zu entwickelnden Modelle	79
4.2	Methodische Grundlagen	81
4.2.1	Grundlagen der Systemtheorie.....	81
4.2.2	Grundlagen der Modellbildung	85
4.2.3	Fallstudienforschung	87
4.2.4	Ziele, Zielsysteme und Ziel-Mittel-Beziehung.....	91

4.2.5	Anwendungsfallmodellierung.....	94
4.2.6	Morphologische Methode	97
4.2.7	Identifikation und Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen	100
4.3	Konkretisierung der Vorgehensweise.....	101
5	Beschreibungselemente zur Spezifikation intelligenter Produkte	105
5.1	Begriffskonkretisierung: Intelligentes Produkt	106
5.2	Beschreibung der Auswahl und Analyse der Fallstudien.....	109
5.2.1	Theoretische Begründung der Fallstudienauswahl.....	109
5.2.2	Aufnahme und Untersuchung der Fallstudien	112
5.3	Beschreibung von Entwicklungszielen intelligenter Produkte.....	116
5.3.1	Steigerung der Produkteffizienz	118
5.3.2	Steigerung der Produkteffektivität	119
5.3.3	Verbesserung der Produktentwicklung.....	119
5.3.4	Verbesserung von Service-Prozessen	121
5.3.5	Steigerung der Service-Flexibilität	122
5.3.6	Realisierung digitaler Geschäftsmodelle	122
5.3.7	Zwischenfazit.....	123
5.4	Beschreibung von Anwendungsfällen intelligenter Produkte.....	126
5.4.1	Produktzustände überwachen	129
5.4.2	Nutzungsverhalten verfolgen.....	131
5.4.3	Produkt mobil steuern.....	133
5.4.4	Energieeffizienz steigern	134
5.4.5	Produktverfügbarkeit steigern.....	136
5.4.6	Produktbestand managen	138
5.4.7	Produkt updaten	140
5.4.8	Produkt benchmarken	142
5.4.9	Produktleistung verbessern	144
5.4.10	Mehrwertdienste anbieten	146
5.4.11	Verfügbarkeit anbieten	148
5.4.12	Abonnement anbieten	150
5.4.13	Zwischenfazit.....	152
5.5	Spezifische Rahmenbedingungen von Maschinenbauprodukten.....	157
5.6	Zusammenfassung und Ergebnisreflexion	162
6	Beschreibung der Anforderungen an intelligente Produkte	165
6.1	Herleitung der Merkmalsdimensionen	166
6.2	Herleitung der Merkmale und Ausprägungen der Dimension „Intelligent“ ..	167
6.2.1	Art der Datenerfassung	167
6.2.2	Art der Interaktion	169
6.2.3	Grad der Produktintelligenz	171
6.2.4	Grad der Eigenständigkeit	173

6.3	Herleitung der Merkmale und Ausprägungen der Dimension „Vernetzend“	176
6.3.1	Ort der Produktintelligenz	176
6.3.2	Ort der Datenhaltung	177
6.3.3	Art der Vernetzung	179
6.3.4	Art der Konnektivität	182
6.3.5	Art des Zugriffs	183
6.4	Zusammenfassung der beschreibenden Merkmale	184
7	Wirkung von Beschreibungselementen auf Anforderungen	187
7.1	Vorgehensweise zur Erklärung der Wirkung von Anwendungsfällen auf Digitalisierungsanforderungen	188
7.2	Wirkung von Anwendungsfällen auf Digitalisierungsanforderungen	192
7.2.1	Wirkungen auf die Anforderungen an die Datenerfassung	192
7.2.2	Wirkungen auf die Anforderungen an die Interaktion	196
7.2.3	Wirkungen auf die Anforderungen an die Produktintelligenz	201
7.2.4	Wirkungen auf die Anforderungen an die Eigenständigkeit	205
7.2.5	Wirkungen auf die Anforderungen an den Ort der Produktintelligenz	208
7.2.6	Wirkungen auf die Anforderungen an den Ort der Datenhaltung	213
7.2.7	Wirkungen auf die Anforderungen an die Vernetzung	216
7.2.8	Wirkungen auf die Anforderungen an die Konnektivität	220
7.2.9	Wirkungen auf die Anforderungen an den Zugriff	221
7.3	Vorgehensweise zur Erklärung der Wirkung von Rahmenbedingungen auf Digitalisierungsanforderungen	225
7.4	Wirkung von Rahmenbedingungen auf Digitalisierungsanforderungen	229
7.5	Zusammenfassung und Ergebnisreflexion	234
8	Gestaltung der Methode zur Spezifikation intelligenter Produkte	237
8.1	Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau	237
8.1.1	Schritt 1: Zielsuche	239
8.1.2	Schritt 2: Lösungssuche	240
8.1.3	Schritt 3: Auswahl	242
8.2	Zusammenfassung und Ergebnisreflexion	243
9	Evaluation	245
9.1	Selektion der Fallstudien	245
9.2	Fallstudie 1: topocare GmbH	246
9.2.1	Unternehmens- und Problembeschreibung	246
9.2.2	Sequenzielle Anwendung der Methode	248
9.3	Fallstudie 2: Földner Machines & Services B.V.	253
9.3.1	Unternehmens- und Problembeschreibung	254
9.3.2	Sequenzielle Anwendung der Methode	255
9.4	Integrierte Bewertung der Evaluationsergebnisse	261

10 Zusammenfassung und Ausblick.....	265
11 Literaturverzeichnis.....	269
Anhang	309

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Beeinflussbarkeit von Eigenschaften intelligenter Produkte (eigene Darstellung)	2
Abbildung 1-2: Fokus der vorliegenden Dissertationsschrift (eigene Darstellung).....	4
Abbildung 1-3: Gliederung der Arbeit und angewendete Forschungsaktivitäten	8
Abbildung 2-1: Einteilung von Wirtschaftsgütern (eigene Darstellung i. A. a. THOMMEN ET AL. 2017, S. 6)	10
Abbildung 2-2: Produktbegriffe in Abhängigkeit von Produktkomplexität (eigene Darstellung)	11
Abbildung 2-3: Exemplarische Produkteinordnung.....	12
Abbildung 2-4: Verständnis eines intelligenten Produkts (entnommen und übersetzt aus ABRAMOVICI 2014, S. 2).....	17
Abbildung 2-5: Verständnis eines intelligenten Produkts (HICKING ET AL. 2018 i. A. a. SCHUH 2017b).....	17
Abbildung 2-6: Modell des Informationsmanagements (eigene Darstellung i. A. a. KRCMAR 2015, S. 107)	20
Abbildung 2-7: DIKW-Hierarchie (i. A. a. ACKHOFF 1989, S. 8; KRCMAR 2015, S. 12)22	
Abbildung 2-8: Differenzierung zwischen Datenbegriffen (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 2-9: Teilprozesse der Produktentstehung je nach Autor (eigene Darstellung)	26
Abbildung 2-10: Maßnahmen zur Verlängerung des Produktlebenszyklus (eigene Darstellung i. A. a. FELDHUSEN ET AL. 2013c, S. 294; BREZING 2006).....	29
Abbildung 2-11: Abgrenzung des Untersuchungsbereichs (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 3-1: Dimensionen der Produktintelligenz (eigene Darstellung)	41
Abbildung 3-2: Klassifikationsmodell intelligenter Produkte (eigene Darstellung i. A. a. MEYER ET AL. 2009, S. 143).....	42
Abbildung 3-3: Intelligenz von Objekten (eigene Darstellung i. A. a. DEINDL 2013, S. 107).....	43
Abbildung 3-4: Vierstufiges <i>Data Analytics Model</i> (eigene Darstellung i. A. a. KART ET AL. 2013, S. 2)	44
Abbildung 3-5: Funktionsstufen intelligenter Produkte (eigene Darstellung i. A. a. PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 8)	45
Abbildung 3-6: Mehrwerte aus Daten zur Produktverbesserung (eigene Darstellung i. A. a. PORTER U. HEPPELMANN 2015, S. 9).....	46

Abbildung 3-7: Auszug aus dem Werkzeugkasten Industrie 4.0 „Produkte“ (ANDERL ET AL. 2015, S. 12).....	46
Abbildung 3-8: Referenzarchitektur intelligenter Produkte (eigene Darstellung i. A. a. WONG ET AL. 2002, S. 2)	48
Abbildung 3-9: Adaptierbare Referenzarchitektur für intelligente Produkte (eigene Darstellung i. A. a. YOO ET AL. 2010, S. 727)	50
Abbildung 3-10: Referenzarchitektur cyber-physischer Systeme (eigene Darstellung i. A. a. BROY 2010, S. 24)	51
Abbildung 3-11: Referenzarchitektur von Systemen intelligenter Objekte (DEINDL 2013, S. 118).....	52
Abbildung 3-12: Architektur intelligenter technischer Systeme (GAUSEMEIER ET AL. 2013b, S. 51).....	53
Abbildung 3-13: Architektur intelligenter Produkte (eigene Darstellung i. A. a. PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 5)	55
Abbildung 3-14: Modell konzeptioneller Elemente intelligenter Produkte nach NOVALES ET AL. (NOVALES ET AL. 2016b, S. 4)	56
Abbildung 3-15: Lösungsmodell intelligenter Produkte (eigene Darstellung i. A. a. KAUFMANN 2015, S. 13).....	57
Abbildung 3-16: Leistungssystemstruktur (i. A. a. BELZ ET AL. 1997, S. 29).....	58
Abbildung 3-17: Architektur von Produkt-Service-Systemen (i. A. a. TUKKER 2004, S. 248).....	59
Abbildung 3-18: Taxonomie intelligenter Objekte (DEINDL 2013, S. 92).....	61
Abbildung 3-19: Inhaltliche Merkmale der Taxonomie von CPS nach (eigene Darstellung i. A. a. WESTERMANN 2017, S. 98).....	63
Abbildung 3-20: Taxonomie von „Smart Things“ (PÜSCHEL ET AL. 2017b, S. 8)	65
Abbildung 3-21: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (eigene Darstellung i. A. a. VDI 2221, S. 9).....	67
Abbildung 3-22: V-Modell als Entwicklungsmethodik in der Mechatronik (eigene Darstellung i. A. a. VDI 2206, S. 29).....	68
Abbildung 3-23: Das Münchener Vorgehensmodell (eigene Darstellung i. A. a. LINDEMANN 2009, S. 47).....	69
Abbildung 3-24: Vorgehensmodell Scrum (eigene Darstellung i. A. a. SCHWABER 2007, S. 7).....	71
Abbildung 3-25: <i>Smart Service Engineering Model</i> (JUSSEN ET AL. 2019, S. 385, übersetzt vom Autor dieser Dissertationsschrift)	72
Abbildung 3-26: Anforderungsschablone (RUPP 2014, S. 220).....	75

Abbildung 4-1: Grundbegriffe der Systemtheorie (i. A. a. PATZAK 1982, S. 19; HABERFELLNER ET AL. 2015, S. 32; BÖHM U. FUCHS 2002, S. 9)	82
Abbildung 4-2: Grundprinzipien des <i>System Engineering</i> (i. A. a. HABERFELLNER ET AL. 2015, S. 83).....	83
Abbildung 4-3: Prozess der Fallstudienforschung (eigene Darstellung i. A. a. EISENHARDT 1989, S. 533)	88
Abbildung 4-4: Iterativer Lernprozess durch Fallstudienforschung (GASSMANN 1999, S. 13).....	91
Abbildung 4-5: Ableitung der Ziel-Mittel-Hierarchie aus Relationen (i. A. a. HABERFELLNER ET AL. 2015, S. 223; SCHEIBLER 1974, S. 117).....	94
Abbildung 4-6: Funktionsstruktur zur hierarchischen Gliederung von Funktionen (i. A. a. FELDHUSEN ET AL. 2013c, S. 346).....	95
Abbildung 4-7: Visualisierung der UML-Elemente (eigene Darstellung)	96
Abbildung 4-8: Abgrenzung der analytischen Forschungsmethoden (i. A. a. WELTER 2006, S. 114)	97
Abbildung 4-9: Generelle Vorgehensweise der Dissertationsschrift (eigene Darstellung)	102
Abbildung 5-1: Übersicht der Inhalte des Kapitels 5 im Zusammenhang des Gesamtmodells (eigene Darstellung)	105
Abbildung 5-2: Verständnis eines intelligenten Produkts (i. A. a. STICH U. HICKING 2019, S. 544).....	106
Abbildung 5-3: Separation digitaler Geschäftsmodelle anhand des Produktivitätsbegriffs (eigene Darstellung)	108
Abbildung 5-4: Auswahl der betrachteten Strategietypen (i. A. a. SCHUH ET AL. 2019, S. 230).....	111
Abbildung 5-5: Exemplarische Darstellung der Weiterentwicklung der Entwicklungsziele im A-priori-Modell (eigene Darstellung)	114
Abbildung 5-6: Sättigung der erfassten Entwicklungsziele intelligenter Produkte (eigene Darstellung)	115
Abbildung 5-7: Sättigung der erfassten Anwendungsfälle intelligenter Produkte (eigene Darstellung).....	115
Abbildung 5-8: Sättigung der erfassten Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)	116
Abbildung 5-9: Analyse der erfassten Entwicklungsziele (eigene Darstellung).....	117
Abbildung 5-10: Darstellung der Wirkungszusammenhänge zwischen strategischen Erfolgsfaktoren und Entwicklungszielen (eigene Darstellung).....	126

Abbildung 5-11: Analyse der erfassten Anwendungsfälle (eigene Darstellung)	128
Abbildung 5-12: Anwendungsfall "Produktzustände überwachen" (eigene Darstellung)	130
Abbildung 5-13: Anwendungsfall "Nutzungsverhalten verfolgen" (eigene Darstellung)	132
Abbildung 5-14: Anwendungsfall "Dezentral zugreifen" (eigene Darstellung).....	133
Abbildung 5-15: Anwendungsfall „Energieeffizienz steigern“ (eigene Darstellung).	135
Abbildung 5-16: Anwendungsfall "Produktverfügbarkeit steigern" (eigene Darstellung)	137
Abbildung 5-17: Anwendungsfall: "Produktbestand managen" (eigene Darstellung)	139
Abbildung 5-18: Anwendungsfall "Produkt updaten" (eigene Darstellung)	142
Abbildung 5-19: Anwendungsfall "Produkt benchmarken" (eigene Darstellung).....	144
Abbildung 5-20: Anwendungsfall "Produktleistung verbessern" (eigene Darstellung)	145
Abbildung 5-21: Anwendungsfall "Mehrwertdienste anbieten" (eigene Darstellung)	147
Abbildung 5-22: Anwendungsfall "Verfügbarkeit anbieten" (eigene Darstellung)....	149
Abbildung 5-23: Anwendungsfall "Abonnement anbieten" (eigene Darstellung).....	151
Abbildung 5-24: Darstellung der Wirkungszusammenhänge zwischen strategischen Erfolgsfaktoren, Entwicklungszielen und Anwendungsfällen (eigene Darstellung) .	157
Abbildung 5-25: Analyse der erfassten Rahmenbedingungen	159
Abbildung 5-26: Produktbezogenes Merkmal Mobilität (eigene Darstellung)	160
Abbildung 5-27: Produktbezogenes Merkmal Bauraumverfügbarkeit (eigene Darstellung)	160
Abbildung 5-28: Produktbezogenes Merkmal Abschirmung (eigene Darstellung)..	161
Abbildung 5-29: Kundenbezogenes Merkmal Fernzugriff (eigene Darstellung).....	161
Abbildung 5-30: Kundenbezogenes Merkmal Netznutzung (eigene Darstellung)...	162
Abbildung 5-31: Morphologie der erfassten Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)	162
Abbildung 6-1: Morphologie der Digitalisierungsanforderungen im Zusammenhang des Gesamtmodells (eigene Darstellung)	165
Abbildung 6-2: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Art der Datenerfassung“	169
Abbildung 6-3: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals "Art der Interaktion"....	171

Abbildung 6-4: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals "Grad der Produktintelligenz"	173
Abbildung 6-5: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals "Grad der Eigenständigkeit"	176
Abbildung 6-6: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Ort der Produktintelligenz“	177
Abbildung 6-7: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Ort der Datenhaltung“	179
Abbildung 6-8: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Art der Vernetzung“ ..	182
Abbildung 6-9: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Art der Konnektivität“	183
Abbildung 6-10: Ausprägungen des Anforderungsmerkmals „Art des Zugriffs“	184
Abbildung 6-11: Morphologischer Kasten für abgeleitete Digitalisierungsanforderungen an intelligente Produkte (eigene Darstellung)	185
Abbildung 7-1: Erklärungsmodell im Zusammenhang des Gesamtmodells (eigene Darstellung)	187
Abbildung 7-2: Ausschnitt des Aufbaus des Kapitels (eigene Darstellung)	188
Abbildung 7-3: Illustration des Vorgehens zur Erklärung der Wirkungszusammenhänge (eigene Darstellung)	192
Abbildung 7-4: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Datenerfassung</i> (eigene Darstellung)	195
Abbildung 7-5: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Interaktion</i> (eigene Darstellung)	199
Abbildung 7-6: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Grad der Produktintelligenz</i> (eigene Darstellung)	204
Abbildung 7-7: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Grad der Eigenständigkeit</i> (eigene Darstellung)	207
Abbildung 7-8: Schematische Darstellung des Programmiermodells "Map-Reducing" (eigene Darstellung)	209
Abbildung 7-9: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Ort der Produktintelligenz</i> (eigene Darstellung)	212
Abbildung 7-10: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Ort der Datenhaltung</i> (eigene Darstellung)	215
Abbildung 7-11: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Vernetzung</i> (eigene Darstellung)	219
Abbildung 7-12: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Konnektivität</i> (eigene Darstellung)	221

Abbildung 7-13: Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art des Zugriffs</i> (eigene Darstellung)	225
Abbildung 7-14: Illustration des Vorgehens zur Durchführung der Vorselektion.....	227
Abbildung 7-15: Illustration des Vorgehens zur Erklärung der Wirkungszusammenhänge	228
Abbildung 7-16: Illustration der Vorselektion	229
Abbildung 7-17: Restriktions-Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Ort der Produktintelligenz</i> (eigene Darstellung).....	230
Abbildung 7-18: Restriktions-Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Ort der Datenhaltung</i> (eigene Darstellung)	231
Abbildung 7-19: Restriktions-Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Vernetzung</i> (eigene Darstellung)	232
Abbildung 7-20: Restriktions-Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art der Konnektivität</i> (eigene Darstellung)	233
Abbildung 7-21: Restriktions-Wirkungsmatrix für das Merkmal <i>Art des Zugriffs</i> (eigene Darstellung)	234
Abbildung 8-1: Gestaltungsmodell im Zusammenhang des Gesamtmodells (eigene Darstellung).....	237
Abbildung 8-2: Methode zur Spezifikation intelligenter Produkte im Maschinenbau (eigene Darstellung)	238
Abbildung 8-3: Auswahl eines Entwicklungsziels (Schritt 1) (eigene Darstellung)..	239
Abbildung 8-4: Bestimmung von Rahmenbedingungen (Schritt 1) (eigene Darstellung)	240
Abbildung 8-5: Auswahl eines Anwendungsfalls (Schritt 2) (eigene Darstellung)...	241
Abbildung 8-6: Analyse der Digitalisierungsanforderungen (Schritt 2) (eigene Darstellung).....	241
Abbildung 8-7: Priorisierung der Anforderungen (Schritt 3) (eigene Darstellung) ...	242
Abbildung 8-8: Sprintinitiiierung (Schritt 3) (eigene Darstellung)	243
Abbildung 9-1: Dammbaumaschinen „toporobo“ (l.) und „topomover“ (r.) im Einsatz	247
Abbildung 9-2: Auswahl des Entwicklungsziels der topocare GmbH.....	249
Abbildung 9-3: Bestimmung von Rahmenbedingungen der topocare GmbH	249
Abbildung 9-4: Auswahl eines Anwendungsfalls der topocare GmbH	250
Abbildung 9-5: Analyse der Digitalisierungsanforderungen der topocare GmbH....	251
Abbildung 9-6: Priorisierte Anforderung von topocare	253

Abbildung 9-7: Industrie-4.0-Lösung von Lattuada (Bild entnommen von http://cyberal.adeliolattuada.com/#industry)	254
Abbildung 9-8: Auswahl des Entwicklungsziels von Földner Machines & Services	256
Abbildung 9-9: Bestimmung von Rahmenbedingungen von Földner Machines & Services.....	257
Abbildung 9-10: Auswahl eines Anwendungsfalls von Földner Machines & Services	258
Abbildung 9-11: Analyse der Digitalisierungsanforderungen von Földner Machines & Services.....	259
Abbildung 9-12: Messkonzept einer smarten Glasschleifmaschine	260
Abbildung A2-1: Leistungsportfolio von „Digital in NRW“	313
Abbildung A2-2: Problemstellung und Prämissen der Ph-MECHANIK GmbH &Co. KG	315
Abbildung A2-3: Lösungskonzept für den smarten Evakuierungsstuhl.....	315
Abbildung A2-4: Ergebnis des smarten Evakuierungsstuhls	316
Abbildung A3-1: Technologiekonzept "TrackMyTools" (Bild von Bosch bereitgestellt).....	346
Abbildung A3-2: Management-Summary "TrackMyTools" (Bild von Bosch bereitgestellt).....	347
Abbildung A3-3: Anwendungsfelder "TrackMyTools" (Bild von Bosch bereitgestellt).....	347

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bezeichnungsübersicht im Kontext intelligenter Produkte	14
Tabelle 3-1 Untersuchung von Quellen zu intelligenten Produkten	36
Tabelle 3-2: Zuordnung untersuchter Quellen zu Zielen und Anwendungsfällen.....	40
Tabelle 3-3: Bewertungsübersicht untersuchter Quellen	77
Tabelle 4-1: Einsatz von Methoden in der generellen Vorgehensweise	103
Tabelle 5-1: Strukturierte Darstellung der untersuchten Fallstudien	113
Tabelle 5-2: Auflistung der verwendeten Quellen zur Datenerhebung	113
Tabelle 5-3: Darstellung eines Ausschnitts untersuchter Quellen zu Entwicklungszielen intelligenter Produkte.....	124
Tabelle 5-4: Wirkungszusammenhänge zwischen strategischen Erfolgsfaktoren und Entwicklungszielen	125
Tabelle 5-5: Wirkungszusammenhänge zwischen Entwicklungszielen und Anwendungsfällen	153
Tabelle 7-1: Erläuterung der Intensitätsstufen A (eigene Tabelle).....	189
Tabelle 7-2: Erläuterung der Intensitätsstufen B (eigene Tabelle).....	226

Abkürzungsverzeichnis

App.	<u>A</u> pplikation
AWS	<u>A</u> ma <u>z</u> on <u>W</u> eb <u>S</u> ervices
B.V.	<u>B</u> esloten <u>v</u> ennootschap
B2B	<u>B</u> usiness-to- <u>B</u> usiness
B2C	<u>B</u> usiness-to- <u>C</u> ustomer
CAQ	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>Q</u> uality
CIRP	<u>C</u> ollege <u>I</u> nternational pour la <u>R</u> echerche en <u>P</u> roductique (Internationale Akademie für Produktionstechnik)
CPS	<u>c</u> yber- <u>p</u> hysisches <u>S</u> ystem
CRM	<u>C</u> ustomer <u>R</u> elationship <u>M</u> anagement
DIN	<u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung e.V.
DLRG	Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft
ECM	<u>E</u> ngineering <u>C</u> hange <u>M</u> anagement
EN	<u>E</u> uropäische <u>N</u> orm
EOS	keine Abkürzung, sondern Eigenname
ERP	<u>E</u> nterprise <u>R</u> esource <u>P</u> lanning
FG	<u>F</u> allstudiengespräch
FIR	<u>F</u> orschungsinstitut für <u>R</u> ationalisierung
FP	<u>F</u> allstudienprotokoll
GB	<u>G</u> iga <u>B</u> yte
Ge.-Bez.	Geschäftsbeziehung
GmbH	<u>G</u> esellschaft <u>m</u> it <u>b</u> egrenzter <u>H</u> aftung
HMI	<u>H</u> uman- <u>M</u> achine- <u>I</u> nteraction
I/O	<u>I</u> nput- <u>O</u> utput
ID	<u>I</u> dentifikation
IEM	Fraunhofer-Institut für <u>E</u> ntwurfstechnik <u>M</u> echatronik
IM	<u>I</u> nformations <u>m</u> anagement
IML	Fraunhofer-Institut für <u>M</u> aterialfluss und <u>L</u> ogistik
IOSB	Fraunhofer-Institut für <u>O</u> ptronik, <u>S</u> ystemtechnik und <u>B</u> ildauswertung
IoT	<u>I</u> nternet <u>o</u> f <u>T</u> hings
IOTA	keine Abkürzung, sondern Eigenname
IPS	<u>I</u> nstandhaltungs <u>p</u> lanung <u>s</u> ystem

ISO	<u>I</u> nternational <u>O</u> rganization for <u>S</u> tandardization
IV	<u>I</u> nformations <u>v</u> erarbeitung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LTE	<u>L</u> ong <u>T</u> erm <u>E</u> volution
MBSE	<u>M</u> odel- <u>b</u> ased <u>S</u> ystems <u>E</u> ngineering
MES	<u>M</u> anufacturing <u>E</u> xecution <u>S</u> ystem
MKM	<u>M</u> ünchener <u>K</u> onkretisierungs <u>m</u> odell
MQTT	<u>M</u> essage <u>Q</u> ueuing <u>T</u> elemetry <u>T</u> ransport
OEE	<u>O</u> verall <u>E</u> quipment <u>E</u> ffectiveness
OEM	<u>O</u> riginal <u>E</u> quipment <u>M</u> anufacturer
OPC-UA	Open <u>P</u> latform <u>C</u> ommunications <u>U</u> nified <u>A</u> rchitecture
OWL	<u>O</u> st <u>w</u> estfalen- <u>L</u> ippe
PAEP	<u>P</u> rodukt <u>a</u> rchitektur- <u>E</u> ntwicklungs <u>p</u> rozess
PB	<u>P</u> rodukt <u>b</u> eschreibung
PDM	<u>P</u> roduct <u>D</u> ata <u>M</u> anagement
PLM	<u>P</u> rodukt <u>l</u> ebenszyklus <u>m</u> anagement
PSS	<u>P</u> rodukt- <u>S</u> ervice- <u>S</u> ystem
PT	<u>P</u> rodukt <u>t</u> est
PTC	<u>P</u> arametric <u>T</u> echnology <u>C</u> orporation
RGB	<u>R</u> ot- <u>G</u> rün- <u>B</u> lau-Farbraum
S.r.l.	<u>S</u> ocietà a <u>r</u> esponsabilità <u>l</u> imitata
SE	<u>S</u> ystems <u>E</u> ngineering
THW	Technisches Hilfswerk
U.-Größe	<u>U</u> nternehmens <u>g</u> röße
UML	<u>U</u> nified- <u>M</u> odeling- <u>L</u> anguage
V	<u>V</u> eröffentlichung
VDI	<u>V</u> erein <u>D</u> eutscher <u>I</u> ngenieure
WZL	<u>W</u> erkzeug <u>m</u> aschinen <u>l</u> abor der Rheinisch-Westfälischen Technischen Aachen
ZIM	<u>Z</u> entrales <u>I</u> nnovationsprogramm <u>M</u> ittelstand

1 Einleitung

„Alles [...] was vernetzt werden kann, wird auch vernetzt. Das betrifft Menschen, Maschinen und Produkte gleichermaßen.“

- HÖTTGES 2015

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Entwicklung intelligenter Produkte stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen (s. TOMIYAMA ET AL. 2019, S. 8; ABRAMOVICI ET AL. 2018, S. 2; ISSA ET AL. 2017, S. 640). Dies ist einerseits auf **limitierte Ressourcen** und **mangelndes Fachwissen** zurückzuführen (s. KÖNIG ET AL. 2019, S. 1236; ALBAYRAK U. GADATSCH 2018, S. 1690f.). Andererseits ist das **Verständnis**, Produkte aus Sicht des Kunden zu denken und **Nutzen** mit erweiterten **Mehrwertdiensten** zu **schaffen**, **nicht** vollständig **vorhanden** (s. STROBEL ET AL. 2019, S. 508; WUEST ET AL. 2018, S. 172; URBACH U. RÖGLINGER 2019b, S. 6f.). Produzierende Unternehmen begegnen neuen Marktbegleitern und sich verändernden Wettbewerbsverhältnissen mit dem Aufbau engerer Kundenbindung und müssen daher mit neuen, unbekanntenen Anforderungen umgehen (s. SCHUH U. RIESENER 2017, S. 3f.; SCHUH ET AL. 2017b, S. 31). Ergänzend kommt zum einen hinzu, dass sie weitere unvorhersehbare Kundenerwartungen aufgrund gesellschaftlicher Trends bewältigen müssen, in denen Kunden dem Nutzungspotential eine größere Bedeutung als dem Besitz eines Produkts attestieren (s. SCHUH 2018, o.S.; STOKAR ET AL. 2018, S. 57ff.; SMIRNOV ET AL. 2017, S. 148; LAUENROTH ET AL. 2016, S. 8f.). Denn Kunden akzeptieren immer seltener die **Ressourcenverschwendung** als Ergebnis des produktzentrierten Geschäftsmodells, bei dem der Erfolg eines Unternehmens ausschließlich von der Anzahl abgesetzter Produkte abhängt (TZUO U. WEISERT 2018, S. 14ff.; PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 27). **Nutzerzentrierte Geschäftsmodelle** sind ressourceneffizienter, da Maßnahmen ergriffen werden, die Lebensdauer der Produkte zu verlängern (s. RIESENER ET AL. 2019, S. 732; TOMIYAMA ET AL. 2019, S. 6; LAUENROTH ET AL. 2016, S. 6ff.; PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 24f.). Zum anderen kommen weitere Anforderungen hinzu, da Kunden intelligente Produkte im industriellen Umfeld erwarten, da diese im privaten Bereich durch *Smart Phones*, intelligente Beleuchtung und Assistenzsysteme etabliert sind (s. KÖNIG ET AL. 2019, S. 1233; KRUSE BRANDÃO U. WOLFRAM 2018, S. 429; ABRAMOVICI 2014, S. 4). Daher erwarten Nutzer von Maschinen einerseits einen höheren digitalen Leistungsumfang (s. BRAUCKMANN 2015, S. 2ff.; BLEIDER ET AL. 2016, S. 13) und andererseits **datenbasierte Mehrwertdienste** (s. WUEST ET AL. 2018, S. 156; ZELLER 2018a, S. 5; ABRAMOVICI 2014, S. 4). Während produzierende Unternehmen in den letzten Jahren Erfahrungen mit der Digitalisierung interner Prozesse sammelten (s. BRAUCKMANN 2015, S. 10; SCHALLMO U. RUSNJAK 2017, S. 4), ruht jetzt der Digitalisierungsfokus durch das Angebot **intelligenter Produkte** zunehmend auf dem Kunden (s. HOISL 2019, S. 62; LAUENROTH ET AL. 2016, S. 6; SCHUH U.

RIESENER 2017, S. 6f.). Technologische Fortschritte wie Miniaturisierung und deutliche Kostenreduktionen von Prozessoren und Sensoren beflügeln diese Entwicklung (s. RIESENER ET AL. 2019, S. 729; PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 6; JANKOWSKI ET AL. 2014, S. 4). Das größte Nutzenpotential intelligenter Produkte manifestiert sich darin, den Nutzer besser kennenzulernen, seine Bedürfnisse nachzuvollziehen und das Produkt kontinuierlich daran anzupassen (s. SCHUH ET AL. 2017b, S. 46; SCHUH 2018, o.S.; KREUTZER 2018, S. 3; SCHMITT ET AL. 2017b, S. 9ff.; TOMIYAMA ET AL. 2019, S. 19). Intelligente Produkte lösen das **Paradoxon der Produktentwicklung** auf, Anpassungspotentiale erst dann zu erkennen, wenn die Produkteigenschaften nicht mehr verändert werden können (s. EHRENSPIEL 2009, S. 193; Abbildung 1-1, S. 2). Um dies umzusetzen, müssen bestehende Produkte um digitale Technologien (s. ABRAMOVICI 2014, S. 2; LINDEMANN 2016b, S. 874; KRAUSE ET AL. 2017, S. 12; PORTER U. HEPPELMANN 2014, S. 4f.) und Mehrwertdienste erweitert werden (s. ABRAMOVICI 2014, S. 2; SENDLER 2016a, S. 27).

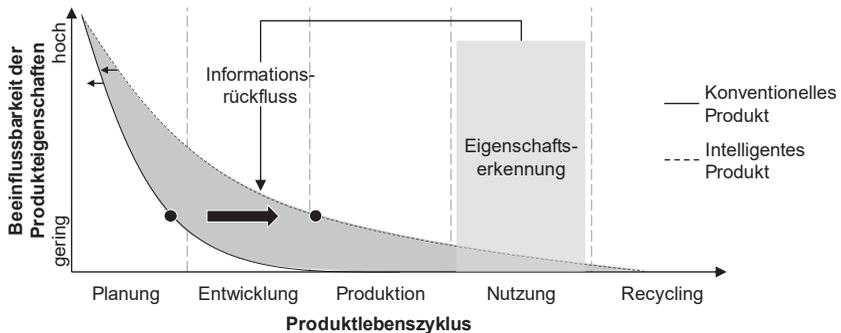


Abbildung 1-1: Beeinflussbarkeit von Eigenschaften intelligenter Produkte (eigene Darstellung)

Die dabei entstehenden **intelligenten Produkte** stellen einen wesentlichen Baustein zur Befriedigung der oben genannten Kundenbedürfnisse dar (s. MICHEL 2017b, S. 1; KAGERMANN 2017, S. 235; BELLERSHEIM 2016, S. 18; RÖGLINGER U. URBACH 2016, S. 2; WILDBIHLER ET AL. 2017, S. 322; BARBIAN ET AL. 2016b, S. 7; LAUENROTH ET AL. 2016, S. 6f.). Die zuvor genannten Herausforderungen werden anhand der folgenden methodischen Defizite verstärkt.

Es ist festzustellen, dass **existierende Methoden** und Werkzeuge die **Entwicklung** intelligenter Produkte **unzureichend unterstützen** (s. ABRAMOVICI ET AL. 2018, S. 23). Während eine hohe Anzahl unterschiedlicher Vorgehensmodelle in der Produktentwicklung existiert, wird die Implementierung von digitalen Technologien in bestehende Produkte zur Gestaltung und **Spezifikation intelligenter Produkte eingeschränkt adressiert** (s. GONZALES ET AL. 2016, S. 8; s. ISSA ET AL. 2017, S. 670ff; ABRAMOVICI ET AL. 2018, S. 23; BERKOVICH ET AL. 2011, S. 365f.). Erkennbar wird dies, wenn die Auf-

gabe des **Smartifizierens** in den Fokus gerückt wird, bestehende Produkte zu intelligenten Produkten zu entwickeln (s. Kapitel 2.3). Existierende Vorgehensmodelle adressieren primär die **Neuentwicklung** von Produkten und **unterstützen Unternehmen nicht** bei der **Verbesserung bestehender Produkte** (s. FELDHUSEN U. GROTE 2013c, S. 293). Diese **Art der Entwicklungsaufgabe** mit unbekanntenen Anforderungen auch in Bezug auf den Einsatz digitaler Technologien wird von existierenden Vorgehensmodelle nicht unterstützt. Insbesondere werden der Trend der Digitalisierung und die Anforderung, die dieser hervorbringt, nicht einbezogen. Erschwerend kommt hinzu, dass den Vorgehensmodellen grundsätzlich ein Ansatz der **Problemlösung** zugrunde liegt und der Fokus auf den wirtschaftlichen **Nutzen eingeschränkt** in den Prozess eingebettet ist. Da ein Selbstzweck der **Smartifizierung** nicht das Ziel darstellen darf, muss der konkrete Nutzen eines intelligenten Produkts das Vorgehen im Produktentwicklungsprozess stützen und definieren (s. LAUENROTH ET AL. 2016, S. 13).

Vergleichbare Defizite lassen sich für die Methoden des Anforderungsmanagements konstatieren. Die **Ermittlung und Klärung von Anforderungen** werden ausschließlich von generischen Methoden unterstützend begleitet (s. ABRAMOVICI ET AL. 2018, S. 23). Um sowohl den **Nutzen** in den Prozess zu integrieren als auch die richtigen Anforderungen innerhalb dieser **Art der Entwicklungsaufgabe** zu klären, muss sich im Kontext der **Smartifizierung** an **Zielen** orientiert werden. Ergänzend ist festzustellen, dass Methoden zur Ableitung **konkreter Anforderungen** im Kontext der Digitalisierung nicht vorhanden sind. Dabei ist besonders die Schnittstelle vom Übergang planerischer Aktivitäten, z. B. der Festlegung von Entwicklungszielen, und der konzipierenden Aktivitäten, z. B. der Ableitung von Lösungsbausteinen anhand funktionaler Anforderungen, also der Übergang vom Anforderungs- in den Lösungsraum, schwierig zu beherrschen (s. PONN U. LINDEMANN 2011, S. 27f.; s. Abbildung 1-2). Die Zusammenstellung konkreter Anforderungen, die sog. Spezifikation, kann ausschließlich auf den wenigen und in Bezug auf die Digitalisierung unzureichenden Checklisten erfolgen (s. FELDHUSEN U. GROTE 2013c, S. 326ff.; WESTERMANN 2017, S. 85ff.). Unternehmen erhalten in Bezug auf die Ableitung konkreter Anforderungen bei der Entwicklung intelligenter Produkte keine Unterstützung durch bestehende Vorgehensmodelle zur Produktentwicklung und Werkzeuge des Anforderungsmanagements.

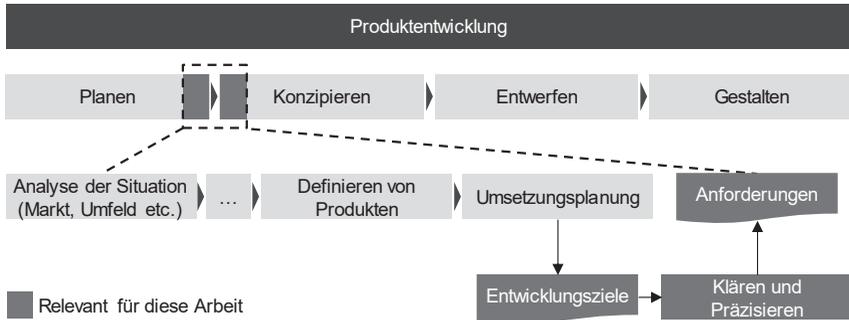


Abbildung 1-2: Fokus der vorliegenden Dissertationsschrift (eigene Darstellung)

Es ist festzuhalten, dass Unternehmen in unterschiedlichen Phasen der Produktentwicklung unterstützt werden müssen. Insbesondere, wenn sich der Fokus auf die Entwicklung von intelligenten Produkten verlagert, fehlt es an adaptierbaren Vorgehensmodellen, die diese besondere Entwicklungsaufgabe betrachten. Um die Entwicklung eines intelligenten Produkts nicht dem Selbstzweck zu überlassen, bedarf es einer **zielorientierten Betrachtung** und **Klärung der Anforderungen**. Abschließend ist es von besonderer Relevanz, produzierenden Unternehmen nicht nur Referenzstruktur und -werkzeuge bereitzustellen, sondern **konkrete Anforderungen** in Bezug auf **intelligente Produkte abzuleiten**.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die vorliegende Dissertationsschrift behandelt die Lösung der zuvor beschriebenen Problemstellung. Das Vorhaben dient dem Ziel, das Anforderungsmanagement durch eine **Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau** zu unterstützen. Das Ergebnis des Dissertationsvorhabens wird aus einer Systematik bestehen, die es ermöglichen wird, aus generischen Zielen und Anwendungsfällen intelligenter Produkte die relevanten Anforderungen in Bezug auf die notwendige Integration von digitalen Technologien abzuleiten. Die Systematik wird ein **zielorientiertes Ableiten von konkreten Anforderungen** gewährleisten. Die Zielgruppe dieser Methode sind Produktmanager und -entwickler, die insbesondere in der Initiierung einer Produktentwicklung, die ein intelligentes Produkt zum Ziel hat, durch Expertise unterstützt werden müssen. Der Ausgangspunkt stellt dabei stets das zugrundeliegende Produkt der Unternehmen dar, auf dessen Basis die **Smartifizierung** durch Zuhilfenahme der Methode stattfindet.

Auf Basis der identifizierten Problemstellung sowie der Zielsetzung des Dissertationsvorhabens erfolgt die Definition der Forschungsfrage:

Wie kann die Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau gestaltet sein?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage sollen in dem Dissertationsvorhaben die folgenden Unterfragen beantwortet werden:

- Wie können Ziele und Anwendungsfälle für intelligente Produkte beschrieben und einander zugeordnet werden?
- Wie können Rahmenbedingungen für Produkte im Maschinenbau systematisch beschrieben werden?
- Wie können Digitalisierungsanforderungen für intelligente Produkte systematisch beschrieben werden?
- Wie können aus den Anwendungsfällen und Rahmenbedingungen Wirkungsbeziehungen zu den Digitalisierungsanforderungen hergestellt werden?
- Wie kann eine Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau gestaltet sein?

1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung und Aufbau der Arbeit

Das vorliegende Dissertationsvorhaben behandelt ingenieurwissenschaftliche, betriebswissenschaftliche und wirtschaftsinformatische Gegenstände, die eine wissenschaftstheoretische Einordnung erfordern. Die **wissenschaftstheoretische Einordnung** erfolgt grundsätzlich in Anlehnung an die von ULRICH U. HILL skizzierte Differenzierung von Formal- und Realwissenschaften. Dabei erlaubt erst die Einordnung eine konkrete Untersuchung eines spezifischen, einer Wissenschaftskategorie zuzuordnenden Problems (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 305). Die **Formalwissenschaften** haben die Konstruktion von Sprachen zum primären Betrachtungsgegenstand. Sie handeln von Zeichensystemen und den zugrundeliegenden Regeln zur Verwendung von Zeichen. Den Formalwissenschaften sind die Philosophie, Mathematik und Logik zuzuordnen. Die **Realwissenschaften** haben die Beschreibung, Erklärung und die Gestaltung von Objekten, Ereignissen und Systemen, die in der Realität vorkommen, zum primären Betrachtungsgegenstand (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 305). In Abhängigkeit des zu verfolgenden Ziels innerhalb der Realwissenschaft ist diese in die Grundlagenwissenschaft und die Handlungswissenschaft zu separieren. Der Grundlagenwissenschaft als reiner Wissenschaft ist ein theoretisches Ziel gesetzt. Sie bemüht sich um die Erklärung von Zusammenhängen zwischen Betrachtungsgegenständen der Realität (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 305). Davon zu differenzieren sind praktische Ziele, die in der Handlungswissenschaft verfolgt werden. Die angewandte Wissenschaft bemüht sich im Kontext der Ingenieurwissenschaften um die Gestaltung von technischen Systemen. Der Wirklichkeitsanspruch der angewandten Wissenschaft ist im Ergebnis in der praktischen Anwendbarkeit begründet. Handlungsempfehlungen, Entscheidungsunterstützungen und Anleitungen sind Ergebnisse, die die Gestaltung der Wirklichkeit unterstützen (s. DEINDL 2013, S. 5; LEHNER ET AL. 1995, S. 20). Während sich die For-

malwissenschaft mit der logischen Wahrheit eines Konstrukts befasst und keinen Realitätsbezug aufweist, sind die Ergebnisse der Realwissenschaft zusätzlich faktisch zu begründen (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 305f.). Der Realwissenschaft und insbesondere der angewandten Wissenschaft sind die Disziplinen der Ingenieurwissenschaften und der Betriebswissenschaft zuzuordnen. Die Wirtschaftsinformatik gilt ebenfalls als anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin (s. LEHNER ET AL. 1995, V; ABTS U. MÜLDER 2017, S. 5ff.). In Anlehnung an die in Kapitel 1.2 genannte Zielstellung ist ein konkretes Praxisproblem im Kontext der Entwicklung intelligenter Produkte zu erkennen. Die vorliegende Dissertationsschrift ist folglich dem Feld der angewandten Handlungswissenschaften zuzuordnen.

Mit dieser Einordnung sind die Herausforderungen der **Subjektivität** und der **Kommunikation** zu beherrschen. Ersteres beschreibt, wie Erfahrungen und Kenntnisse einen Wahrnehmungsfiter bilden, der Individuen Ausschnitte der Wirklichkeit selektiv wahrnehmen lässt (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 306). Zweiteres beschreibt, dass gewonnene Erkenntnisse, welche nicht mit präzisen Begriffen formuliert werden können, gegenstandslos und folglich nicht zu betrachten sind. Der Abstraktionsgrad ist derart zu wählen, dass die Erkenntnisse an Unschärfe verlieren und gleichzeitig in einer **präzisen Sprache** formuliert sind. Die beiden Probleme sind unter Berücksichtigung des Forschungsaspekts des **Entdeckungszusammenhangs** zu lösen. Dieser Zusammenhang stellt den gedanklichen Bezugsrahmen, also die konzeptionelle Basis eines wissenschaftlichen Forschungsprozesses dar. Als heuristisches Problem unterliegt er nicht dem Zwang, durch ein analytisches Verfahren die optimale und damit zweifelsfrei ideale Lösung, sondern durch Reduktion der Untersuchungsdauer eine **Problemlösung** zu präsentieren, sodass diesem Zusammenhang das Zweckmäßigkeitskriterium zugrunde liegt (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 305f.).

Um heuristische Probleme zu lösen, ist der **systemtheoretische Ansatz** nach ULRICH zu wählen. Als interdisziplinärer Ansatz wird nicht nur die reine Theorie, sondern auch das Anzuwendende betrachtet. Der Bezug zu ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen ist im Kontext dieses Ansatzes hinreichend groß, da dieser auf die Geschlossenheit und die Mathematisierung verzichtet. Durch die terminologische Funktion, welcher ein interdisziplinäres Begriffssystem zugrunde liegt, ist das Kommunikationsproblem zu lösen. Die heuristische Funktion stellt die notwendigen Strukturmodelle zur Beantwortung der Fragestellungen zur Verfügung. Weiterhin erlaubt die Integrationsfunktion im Kontext der interdisziplinären Betrachtung der Fragestellung das Einbeziehen unterschiedlicher Einflussfaktoren und Variablen (s. ULRICH U. HILL 1976a, S. 308). Aufgrund der Interdisziplinarität, der Offenheit und Praxisnähe wird der **systemtheoretische Ansatz** in diesem Dissertationsvorhaben angewendet.

Da das skizzierte Problem, welches dem Dissertationsvorhaben zugrunde liegt, den angewandten Wissenschaften zuzuordnen ist, wird dem von ULRICH U. HILL skizzierten Forschungsprozess gefolgt. Dieser umfasst **terminologisch-deskriptive** (Definition und Verwendung eines einheitlichen Begriffssystems für Beschreibungsobjekte), **em-**

pirisch-induktive (Erkenntnisgewinn durch Schlussfolgerung aufgrund des Aufdeckens von Korrelationen) und **analytisch-deduktive** (logische Konstruktion von Modellen) Forschungsaktivitäten (s. ULRICH U. HILL 1976b, S. 347f.). Um die Herausforderung, aus Einzelbeobachtungen generelle Aussagen induktiv abzuleiten, zu beherrschen, folgt das Dissertationsvorhaben dem Ansatz des **kritischen Rationalismus** nach POPPER. Der kritische Rationalismus verfolgt das Ziel, den durch Induktion entstandenen Erkenntnisgewinn zu begründen (s. POPPER 2010, S. 17). Dabei ist nicht nur die logische, sondern auch faktische bzw. empirische Wahrheit zu prüfen. Die Überprüfung einer Hypothese durch Zuhilfenahme von weiteren Einzelbeobachtungen ist nicht möglich, da eine vollständige Induktion vom Einzelfall zum Generellen nicht möglich ist. Eine Hypothese gilt folglich solange als wahr, bis diese durch Einzelbeobachtungen falsifiziert wird (s. ULRICH U. HILL 1976b, S. 345f.).

Der Forschungsprozess wird als **iterativer Lernprozess** durchgeführt. Kontinuierlich werden Fragen an die Realität adressiert und zu beantworten versucht. Gewonnene Erkenntnisse werden kritisch hinterfragt, was zu angepassten Fragestellungen führt und den Prozess wieder initiiert (s. KUBICEK 1977, S. 13ff.). Der Lernprozess fußt dabei auf Vorwissen und Erfahrung (s. KUBICEK 1977, S. 19ff.). Das den Forschungsprozess anstoßende Praxisproblem wird mit einem gemischten Kreis aus Wissenschaft und Praxis im Sinne der **partizipativen Aktionsforschung** gelöst werden (s. WILDE U. HESS 2007, S. 282). Erstens sollen die Ansprechpartner in den Beratungsprojekten zur Smartifizierung von Maschinenbauprodukten in den Forschungsprozess einbezogen werden. Zweitens wird die Expertise von Partnern im Forschungsprojekt „Digital in NRW“ einbezogen werden (s. Anhang A.2). Drittens wird Expertenwissen aus Workshops, wie z. B. den Vorbereitungstreffen des „Aachener Werkzeugmaschinenkolloquiums“ 2020, in die Ergebnisse einfließen.

Dem Aufbau von ULRICH U. HILL folgend, orientiert sich die Kapitelstruktur nach den Forschungsaktivitäten (s. Abbildung 1-3).

Zunächst werden in Kapitel 1 die Ausgangssituation, die Problemstellung und die Zielsetzung beschrieben. Anschließend erfolgt in Kapitel 2 die Beschreibung der verwendeten **Terminologie, Begriffsdefinitionen** und die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs. In Kapitel 3 wird der aktuelle **Stand der Erkenntnisse** in Form der Beschreibung von Modellen zur Intelligenz von Produkten, Referenzarchitekturen intelligenter Produkte und Vorgehensmodellen zur Produktentwicklung sowie Methoden des Anforderungsmanagements dargelegt. Abschließend wird die Forschungslücke anhand der bewerteten Erkenntnisse aufgezeigt. In Kapitel 4 werden eine **detaillierte Vorgehensweise** und deren methodische Bestandteile beschrieben. Die Ergebnisse des Fallstudienforschungsprozesses in Kapitel 5 führen zur Identifikation von **Entwicklungszielen** und **Anwendungsfällen intelligenter Produkte** sowie von **Rahmenbedingungen** von Produkten des Maschinenbaus. Kapitel 6 beschreibt in strukturierter Form **Digitalisierungsanforderungen** an intelligente Produkte. Die Ergebnisse der Beschreibungsmodelle werden in Kapitel 7 zusammengeführt, um **Wirkungszusammenhänge** zwischen den einzelnen Bestandteilen zu identifizieren. In Kapitel 8 wird

die **Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten** konkret ausgestaltet. Kapitel 9 beinhaltet die eingeschränkt empirisch-induktive **Evaluation** der Ergebnisse durch Anwendung in zwei Fallstudien. Abgeschlossen wird die vorliegende Untersuchung durch eine Zusammenfassung und einen **Ausblick** in Kapitel 10.

	Kapitel der Dissertation	Forschungsaktivitäten
Grundlagen	1. Einleitung	
	2. Grundlagen <ul style="list-style-type: none"> Terminologische Grundlagen Abgrenzung des Untersuchungsraums 	Terminologisch-deskriptive Untersuchung
	3. Stand der Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> Bewertung bestehender Ansätze in der Wissenschaft und Praxis 	
Modellentwicklung	4. Herleitung des Konzeptansatzes <ul style="list-style-type: none"> Festlegung der Anforderungen an die Modelle Bildung der methodischen Grundlage und Konkretisierung der Vorgehensweise 	
	5. Elemente zur Spezifikation int. Produkte (Beschreibungsmodell) <ul style="list-style-type: none"> Festlegung der Anforderungen an die Modelle Bildung der methodischen Grundlage und Konkretisierung der Vorgehensweise 	
	6. Beschreibungsmodell der Digitalisierungsanforderungen <ul style="list-style-type: none"> Festlegung der Anforderungen an die Modelle Bildung der methodischen Grundlage und Konkretisierung der Vorgehensweise 	Empirisch-induktive Beschreibung von Anwendungsfällen und Rahmenbedingungen
	7. Erklärungsmodell <ul style="list-style-type: none"> Erklärung der Wirkungen von Anwendungsfällen und Rahmenbedingungen auf Digitalisierungsanforderungen 	
	8. Gestaltungsmodell <ul style="list-style-type: none"> Gestaltung der Methode zur Spezifikation von intelligenten Produkten im Maschinenbau 	
Anwendung	9. Evaluation <ul style="list-style-type: none"> Evaluation der Modelle im Anwendungszusammenhang 	Analytisch-deduktive Entwicklung des Gestaltungsmodells
	10. Zusammenfassung und Fazit	

Abbildung 1-3: Gliederung der Arbeit und angewendete Forschungsaktivitäten

2 Grundlagen und Abgrenzung der Untersuchung

In diesem Kapitel werden die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Begriffe, die auch im allgemeinen Sprachgebrauch Anwendung finden, definiert, um Missverständnissen vorzubeugen. Diese einheitliche terminologische Basis dient dem Zweck der wissenschaftlichen und nachvollziehbaren Erörterung und gewährleistet die Eingrenzung des Untersuchungsraums (s. ZELEWSKI 2008, S. 25). Zunächst wird der Untersuchungsraum des intelligenten Produkts aufgespannt, indem der Produktbegriff, das intelligente Produkt, die Intelligenz und der Mehrwertdienst definiert werden (s. Kapitel 2.1). Anschließend wird die Rolle des Informationsmanagements im Kontext intelligenter Produkte erläutert (s. Kapitel 2.2). Weiterhin werden Begriffe im Bereich der Produktentwicklung herausgearbeitet und definiert (s. Kapitel 2.3). Abschließend wird das vorliegende Kapitel mit der Abgrenzung und Präzisierung des Untersuchungsbereichs abgeschlossen (s. Kapitel 2.4).

2.1 Betrachtung intelligenter Produkte

Zunächst wird der Untersuchungsraum des Produkts aufgespannt, indem der Produktbegriff im Kontext des Maschinenbaus definiert wird (s. Kapitel 2.1.1). Darauf aufbauend wird der Begriff des intelligenten Produkts von weiteren Bezeichnungen differenziert und definiert (s. Kapitel 2.1.2). Einen Exkurs bildet die Abgrenzung des menschlichen Intelligenzbegriffs (s. Kapitel 2.1.3). Abschließend wird der im Zusammenhang mit intelligenten Produkten stehende Begriff des Mehrwertdienstes beleuchtet (s. Kapitel 2.1.4).

2.1.1 Bestimmung des Begriffs „Produkt“

Der Begriff „Produkt“ leitet sich aus dem Lateinischen "producere" ab und bedeutet ein Nachvornebringen des Menschen. Es handelt sich um Objekte, die der Mensch zu jedem gegebenen Zeitpunkt herstellen kann (s. ERLHOFF U. MARSHALL 2008, S. 321f.). ZELEWSKI führt an, dass Produkte Güter sind, „[...] *die Ergebnisse von Produktionsprozessen darstellen und in der Absicht hergestellt wurden, zur Befriedigung eigener oder fremder Bedürfnisse beizutragen*“ (ZELEWSKI 2008, S. 58). Nach MATTMANN sind Produkte als künstlich erzeugte Systeme, welche zweckerfüllende Funktionen beinhalten und Nutzen stiften und vollständig über die Angabe von Eigenschaften beschrieben (s. MATTMANN 2017, S. 33). Dem DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. folgend definiert sich ein Produkt als „*Gegenstand oder Substanz, produziert von einem natürlichen oder künstlichen Prozess*“ (ISO 15226, S. 6). Ein **Wirtschaftsgut** ist ein materielles oder immaterielles Objekt, welches abzählbar ist, sich spezifizieren lässt, für mindestens zwei Parteien von Wert ist und dessen Eigentum übertragen werden kann (s. GUDEHUS 2007, S. 17; THOMMEN ET AL. 2017, S. 4ff.). Innerhalb der materiellen Wirtschaftsgüter wird zwischen Verbrauchs- und Gebrauchsgütern differenziert (s. GUDEHUS 2007, S. 19). Materielle Gebrauchsgüter für den wirtschaftlichen Betrieb ei-

nes Unternehmens gelten als **Investitionsgüter** (s. GUDEHUS 2007, S. 21). Immaterielle Wirtschaftsgüter werden ebenfalls in Verbrauchs- und Gebrauchsgüter differenziert. Immaterielle Verbrauchsgüter gelten als Dienstleistungen. Immaterielle Gebrauchsgüter lassen sich unter den Begriffen „Informationen“ und „Rechte“ zusammenfassen (s. GUDEHUS 2007, S. 21f.). Der Produktbegriff lässt sich „nach HERRMANN U. HUBER anhand der Geschäftsbeziehung des Unternehmens und der Art des Kunden, ob Unternehmen oder Konsument (B2C), differenzieren. Im Bereich des *Business to Business* (B2B) handelt es sich vor allem um Investitionsgüter und Dienstleistungen (s. HERRMANN U. HUBER 2009, S. 4ff.). Weitere Geschäftsbeziehungen werden nicht betrachtet (vgl. MEIER U. STORMER 2005, S. 3). KOPPELMANN differenziert zwischen Konsum- und Industriegütern sowie Dienstleistungen (s. KOPPELMANN 1997, S. 3). BACKHAUS U. WIESEL differenzieren Produkte nach substantiellen Produkten, Investitionsgütern und Produktionsgütern sowie Dienstleistungen (vgl. BACKHAUS U. WIESEL 2015, S. 264). **Investitionsgüter** oder **Industriegüter** werden als Produkte definiert, die Organisationen dazu befähigen, Leistungen zu erbringen, die nicht den Endkunden adressieren (s. ENGELHARDT U. GÜNTER 1981, S. 24, zit. n. BACKHAUS U. VOETH 2004, S. 5f.). Investitionsgüter werden auch als Potentialfaktoren bezeichnet, die ein fest definiertes Leistungspotential darbieten (s. THOMMEN ET AL. 2017, S. 5). Im Folgenden wird die Einteilung der Wirtschaftsgüter nach THOMMEN ET AL. verwendet. Produkte lassen sich zusätzlich anhand des Grades der Verarbeitung nach Halb- und Fertigfabrikaten differenzieren, wobei zu beachten ist, dass ein Produkt für das eine Unternehmen ein Fertig- und für ein anderes Unternehmen ein Halbfabrikat darstellen kann (s. THOMMEN ET AL. 2017, S. 5).

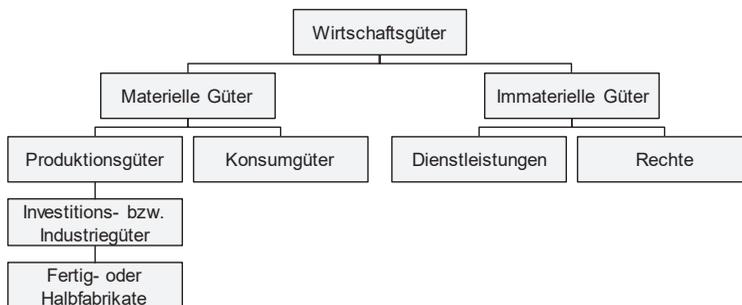


Abbildung 2-1: Einteilung von Wirtschaftsgütern (eigene Darstellung i. A. a. THOMMEN ET AL. 2017, S. 6)

Der bisher verwendete Produktbegriff ist nicht hinreichend spezifiziert, um die darunter verstandenen Produkte voneinander zu unterscheiden. Daher wird der Produktbegriff im Folgenden aus der Perspektive des **Maschinenwesens** weiter konkretisiert.

Es existiert keine verbindlich regelnde Festlegung von Benennungen und Bezeichnungen von Maschinenbauprodukten, da jeder Wirtschaftszweig sowie jede darin agierende Fachperson eigene Fachtermini verwendet (s. BÖGE ET AL. 2014, S. 561). BÖGE ET AL. differenzieren zwischen den Begriffen „Apparat“, „Gerät“ und „Maschine“.

- Apparate sind technische Produkte, die ausschließlich den Stoffumsatz fokussieren. Beispiele sind Mischer und Trichter.
- Geräte sind technische Produkte, die primär den Signalumsatz fokussieren. Beispiele sind Fax- oder Diktiergeräte.
- Maschinen sind technische Produkte, die primär den Energieumsatz fokussieren. Beispiele sind Verbrennungsmotoren und Generatoren.

Diesen Definitionen folgend, kann ein technisches Produkt gleichzeitig Apparat, Gerät und Maschine sein. Ebenfalls ist ein solches Element als Baugruppe in einem komplexen technischen Produkt vorstellbar. Exemplarisch ist ein Verbrennungsmotor in einem Kraftfahrzeug anzuführen. (s. BÖGE ET AL. 2014, S. 561f.; s. KOLLER 1979, S. 4) Die Differenzierung nach stoff-, signal- und energieumsetzenden technischen Produkten wird ebenfalls von FELDHUSEN ET AL. aufgegriffen, die diese rigide Einteilung kritisch beleuchten. Sie führen an, dass eine exakte und überschneidungsfreie Taxonomie von Maschinenbauprodukten nicht möglich ist (s. FELDHUSEN ET AL. 2013a, S. 238). Vielmehr wird empfohlen, die bereits angeführten Begriffe als rudimentäre Abstufungen für den **Grad der Produktkomplexität** zu nutzen (s. FELDHUSEN ET AL. 2013a, S. 238; s. PONN U. LINDEMANN 2011, S. 11). So lassen sich die genannten Begriffe erweitern und in Abhängigkeit der Produktkomplexität kaskadiert darstellen (s. Abbildung 2-2).

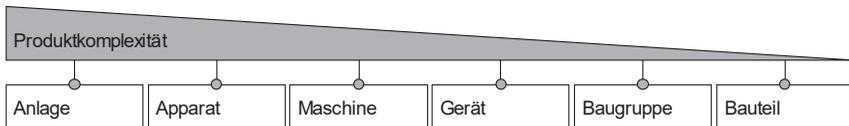


Abbildung 2-2: Produktbegriffe in Abhängigkeit von Produktkomplexität (eigene Darstellung)

Übereinstimmend sind die Ansätze der allgemeinen Systemtheorie heranzuziehen, um Abstufungen dieser Begriffe zu explizieren (s. Kapitel 4.2.1).

Als **Maschinenelement** werden Bauteile des allgemeinen Maschinenbaus verstanden, die in Maschinen und Geräten Funktionen ausführen, die identisch oder ähnlich sind und daher immer wieder vorkommen. Exemplarisch sind Wellen, Bolzen und Federn zu nennen (s. HABERHAUER 2018, S. 1). Bauteile sind folglich die elementarsten Einheiten in einer systemischen Betrachtung, welche sich nicht weiter zerlegen lassen (s. LIENIG U. BRÜMMER 2014, S. 33f.). Eine **Baugruppe** besteht mindestens aus zwei Bauteilen, die nach dem Zusammenfügen mindestens eine Funktion als Einheit ausführen. Exemplarisch sind Kupplungen, Bremsen und Getriebe zu nennen (s. HABERHAUER 2018, S. 1). Eine Baugruppe ist demnach eine abgeschlossene komplexe Einheit, die eine Funktionsunabhängigkeit zu weiteren Teilsystemen oder dem