

Fynn Hellweg

Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung mit semantischen Technologien am Beispiel von Getriebekomponenten elektrischer Antriebssysteme

Method for reference-based manufacturing
cost estimation using semantic technologies
on the example of gear components
for electric drive systems

Band 190

Systeme ▪ Methoden ▪ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Fynn Hellweg

Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung mit semantischen Technologien am Beispiel von Getriebekomponenten elektrischer Antriebssysteme

Method for reference-based manufacturing cost estimation using semantic technologies on the example of gear components for electric drive systems

Band 190

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2025
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
 Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

**Methode zur referenzbasierten
Herstellkostenschätzung mit semantischen
Technologien am Beispiel von
Getriebekomponenten elektrischer Antriebssysteme**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Fynn Hellweg

Tag der mündlichen Prüfung: 03.06.2025

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplett Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 190

Die Entwicklung neuer Produkte in der industriellen Praxis ist geprägt durch eine zunehmende Komplexität, einem hohen Innovationsdruck und gleichzeitig stetig steigender Anforderungen an Kosten, Zeit und Ressourceneffizienz. In der Frühen Phase der Produktentstehung, also zu einem Zeitpunkt, an dem die meisten Freiheitsgrade im Hinblick auf die Ausgestaltung des Produktes noch bestehen, werden bereits die zentralen Weichen für spätere Kosten, Herstellbarkeit und Markterfolg gestellt. Gerade deshalb ist die Fähigkeit, frühzeitig belastbare Aussagen auch über die zu erwartenden Herstellkosten zu treffen, von strategischer Bedeutung für Industrien und Unternehmen aller Branchen. Nur wenn diese Herstellkostenangaben bei der Lösungsgestaltung, insbesondere auch in der Konstruktion, zur Verfügung stehen, kann im Gestaltungsprozess und auch im Prozess der Materialauswahl eine optimierte Lösung gefunden werden. In diesem Kontext kommt dem sogenannten *Cost Engineering* eine besondere Rolle zu. Ein zentrales Ziel ist es dabei, kostenrelevante Aspekte bereits in den ersten Phasen des Entwicklungsprozesses systematisch zu erfassen, zu bewerten und als Führungsgröße im Entscheidungsprozess mit zu etablieren. Doch trotz des offensichtlichen Bedarfs an verlässlicher Kostentransparenz fehlt es bis heute in vielen Fällen an durchgängigen, strukturierten und wiederverwendbaren Methoden zur frühen Kostenschätzung. In der industriellen Praxis beruhen noch heute viele Kostenvorhersagen nach wie vor auf Erfahrungswerten, groben Heuristiken oder auch individuellen Einschätzungen – ein Zustand, der der heutigen Produktkomplexität, dem hohen Wettbewerbsdruck und dem an sich vorhandenen Datenangebot nicht mehr gerecht werden kann. Die *Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro* adressiert unter anderem diese Problematik mit einem systematischen, methodischen Verständnis des Produktentstehungsprozesses. Hierbei wird der Produktentstehungsprozess ganzheitlich angesprochen, das heißt, seine Elemente *Produktplanung*, *Produktentwicklung*, *Produktionssystementwicklung* bis hin zur eigentlichen *Produktion* stehen dabei im Fokus der erarbeiteten Modelle. Kern ist dabei die Beschreibung mit dem *ZHO-Modell*, das Meta-Prozessmodell für die Produktentstehungsprozesse *iPeM* sowie das Modell der *Systemgenerationsentwicklung SGE*. Diese Modelle schaffen eine fundierte Grundlage, um Produktentwicklungsaktivitäten ganzheitlich, iterativ und wissensbasiert zu gestalten. Die Verbindung dieser Modelle mit aktuellen Technologien, insbesondere der Semantischen Wissensmodellierung und Ontologiebildung, eröffnet neue Potentiale für die datenbasierte Unterstützung von Entwicklungsentscheidungen.

An dieser Stelle setzt die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Fynn Hellweg an. Er verbindet die Prinzipien des Cost Engineering mit dem methodischen Denken der KaSPro und nutzt moderne, digitale Technologien, um ein strukturiertes Verfahren zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung zu entwickeln und in einem prototypischen Software-Werkzeug zu implementieren. Die Arbeit adressiert damit eine hochrelevante Fragestellung im Spannungsfeld zwischen industrieller Praxis, methodischer Wissenschaft und digitaler Transformation und leistet so einen substanziellen Beitrag zur Weiterentwicklung der Methodenlandschaft in der Produktentwicklung mit dem besonderen Fokus auf die Berücksichtigung der Kosten. Gleichzeitig gelingt durch die prototypische Umsetzung in einem Unternehmen auch der Nachweis der Praxistauglichkeit der erforschten Methoden.

September, 2025

Albert Albers

Kurzfassung

In schwierigen Marktsituationen gestalten Unternehmen zur Sicherung der Profitabilität aktiv ihre Produktkosten. Dabei werden Herstellkostenschätzungen als Grundlage für Design- und Managemententscheidungen verwendet. Herstellkostenschätzungen erfordern fundiertes Wissen an der Schnittstelle zwischen Konstruktion und Fertigung und verursachen einen hohen manuellen Zeitaufwand bei der Erstellung. Daher ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung einer Methode, die die Erstellung von Herstellkostenschätzungen durch die zielgerichtete Identifikation und Verwendung von Referenzsystemelementen unterstützt. Hierzu werden semantische Technologien eingesetzt.

Zunächst wird im Stand der Forschung ein Verständnis für das *Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers*, das *Cost Engineering* und *semantische Technologien* geschaffen. Als nächstes werden Herausforderungen bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen in der Praxis identifiziert. Herauszuhoben sind eine geringe Datenverfügbarkeit und Datenqualität, sowie ein fehlender Zusammenhang von Produkt- und Fertigungsinformationen. Darauf aufbauend wird iterativ die Cost Engineering Ontologie entwickelt, die detaillierte Zusammenhänge zwischen Komponenten und deren Fertigung beschreiben kann. Aufbauend auf der Cost Engineering Ontologie und dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung wird die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung entwickelt. Der Mensch steht dabei im Mittelpunkt. Die Methode umfasst sechs Schritte: *Bauteilinformationen erfassen, Referenz identifizieren, Prozesskette übernehmen und anpassen, Prozesskette in Herstellkosten überführen, Ergebnis prüfen und Ergebnis speichern*. Anschließend wird ein Funktionsdemonstrator mit einem Softwareprototyp realisiert, der die Anwendung der Methode in der Praxis unterstützt. Der Softwareprototyp beinhaltet einen Wissensgraphen, der basierend auf der Cost Engineering Ontologie, am Beispiel von Getriebekomponenten für elektrische Antriebe erstellt wurde und die für die Methode notwendigen Zusammenhänge zwischen Bauteilen und Fertigung enthält. Mit dem Softwareprototyp ist es möglich, basierend auf einer STEP-Datei eines Bauteils, innerhalb einer Minute eine Herstellkostenschätzung zu erstellen.

Einer initialen Evaluation folgend, werden die Methode und der Softwareprototyp in einer Studie validiert. Dazu werden Interviews, Fragebögen und Beobachtungen verwendet. Während eine Reduktion des Zeitaufwandes verifiziert wird, kann eine positive Wirkung der Methode und des Softwareprototyps auf die Transparenz und die Wissensbasis nur eingeschränkt bestätigt werden. Insbesondere die automatisiert ablaufende Identifikation von Referenzsystemelementen und die Herstellkostenschätzung mit prozessspezifischen Kostenmodellen reduziert den manuellen Zeitaufwand bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen.

Abstract

In difficult market situations, companies actively manage their product costs to ensure profitability. Manufacturing cost estimations are used as a basis for design and management decisions. Manufacturing cost estimations require profound knowledge at the interface of design and manufacturing and cause a high manual effort. Therefore, the aim of this work is to develop a method that supports the creation of manufacturing cost estimations by identifying and using reference system elements in a target oriented manner. Semantic technologies are used for this purpose.

First, the state of the art provides an understanding of the model of SGE – System Generation Engineering according to Albers, cost engineering and semantic technologies. Next, challenges in preparing manufacturing cost estimations in practice are identified. Prominent among these are low data availability, data quality, and a lack of correlation between product and manufacturing information. Based on this, the cost engineering ontology is developed iteratively, which can describe detailed relationships between components and their manufacturing.

Based on the cost engineering ontology and the model of SGE – System Generation Engineering, the method for reference-based manufacturing cost estimation is developed. The focus is on the human being to be supported. The method comprises the following six steps: Capture part information, identify reference, transfer and adapt process chain, deduce manufacturing cost, check result and save result. Subsequently, a functional demonstrator and the realization as software prototype is introduced that supports the application of the method in practice. The software prototype contains a knowledge graph, which was created based on the cost engineering ontology, using the example of gear components for electric drives. It contains the necessary correlations between components and manufacturing. With the software prototype it is possible for users to create a manufacturing cost estimation within one minute based on a components STEP file.

Following an initial evaluation, the method and the functional demonstrator are validated in a study. Interviews, questionnaires and observations are used for this purpose. While a reduction of the calculation effort is verified, a positive effect of the method and the software prototype on transparency and the knowledge base are only confirmed to a limited extent. In particular, the automated identification of reference system elements and the estimation of manufacturing costs with process-specific cost models reduces the manual effort in the preparation of manufacturing cost estimations.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Doktorandenprogramms der Robert Bosch GmbH in Zusammenarbeit mit dem IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Die Arbeit wäre ohne das Konzept der kooperativen Promotion nicht möglich gewesen. Die Kombination der Kompetenzen, des Wissens und der Daten aus Unternehmen und Universität bietet eine hervorragende Forschungsumgebung für zahlreiche Forschungsthemen.

Für die Betreuung der Arbeit als Doktorvater möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers bedanken. Das am IPEK geschaffene Ökosystem ist besonders konstruktiv und inspirierend. Der Austausch am Institut war immer wertvoll und motivierend.

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats. Die fachliche Diskussion und die Anmerkungen waren für die Arbeit sehr wertvoll.

Auf Seiten der Robert Bosch GmbH möchte ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen, die herausragende Arbeitsatmosphäre und das innovative Umfeld bedanken. Besonderer Dank gilt Thomas Beul, Jens Bauer, Dr. Martin Giersbeck und dem Eco- und Cost-Team der Forschung und Vorausentwicklung in Renningen.

Der NVH- und ASE-Gruppe am IPEK und insbesondere Constantin Mandel und Monika Klippert danke ich für den produktiven und freudigen Austausch, die abwechslungsreichen Tage und Abende.

Des Weiteren danke ich den Studierenden Harry Brückmann, Simon Haneke und Ardian Cacaj, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und der gemeinsamen Veröffentlichungen einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, die die stabilen Grundsteine für meinen Lebensweg gelegt haben und mich stets unterstützen. Zudem danke ich meinen Freunden für die schönen Stunden, die mir viel Kraft für diese Arbeit gegeben haben.

Von tiefem Herzen danke ich meiner Frau Lea, ohne dich wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Du hast als Einzige alle Hochs und Tiefs miterlebt, die Erfolge gefeiert und mich bei Rückschlägen wieder aufgebaut. Du hast mir immer den wichtigen Ausgleich und die Energie gegeben, weiterzumachen. Zuletzt möchte ich meiner Tochter Klara für die wundervollen Momente und den zusätzlichen Antrieb im Schlussspurt danken.

Nürtingen, September 2025

„Immer soll nach Verbesserung des bestehenden Zustands gestrebt werden,
keiner soll mit dem Erreichten sich zufrieden geben, sondern stets danach trachten,
seine Sache noch besser zu machen.“

Robert Bosch, 1940

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis.....	xix
Abkürzungsverzeichnis.....	xxi
Formelzeichen.....	xxv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Fokus der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung.....	7
2.1 Frühe Phase der SGE: Grundbegriffe und Bedeutung im Produktentstehungsprozess	7
2.1.1 Innovations-, Modell- und Systembegriff.....	8
2.1.2 ZHO-Modell	10
2.1.3 Die Problemlösungsmethodik SPALTEN	11
2.1.4 IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell.....	12
2.1.5 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers.	13
2.1.6 Frühe Phase der SGE	15
2.1.7 Produkt-Produktions-CoDesign	18
2.1.8 Zwischenfazit.....	20
2.2 Cost Engineering basierend auf dem Gestalt-Funktion-Zusammenhang...	20
2.2.1 Der Begriff Cost Engineering	21
2.2.2 Herstellkostenschätzung.....	23
2.2.3 Fallbasierte Methoden	24
2.2.4 Betriebsbezogene Methoden	29
2.2.5 Strategische Planung von Technologieketten	32
2.2.6 Geometrische Produktspezifikation	34
2.2.7 Advanced Systems Engineering (ASE).....	37
2.2.8 Beschreibung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit dem C&C ² -Ansatz	40
2.2.9 Zwischenfazit.....	43
2.3 Semantische Technologien und deren Anwendung im Cost Engineering	44

2.3.1	Grundlagen semantischer Technologien	44
2.3.2	Wissensmanagement.....	48
2.3.3	Ontologien und Wissensgraphen	49
2.3.4	Semantische Technologien im Cost Engineering	51
2.3.5	Zwischenfazit	56
2.4	Fazit als Übergang zum Forschungsbedarf.....	57
3	Zielsetzung	59
3.1	Forschungsbedarf.....	59
3.2	Ziel der Arbeit und Forschungsthese	61
3.3	Forschungsfragen.....	61
4	Forschungsmethodik.....	63
4.1	Forschungsvorgehen	63
4.2	Intended Impact Model	65
4.3	Überblick Forschungsmethoden	66
4.4	Forschungsumgebung	67
4.5	Fazit	69
5	Analyse der Herstellkostenschätzung in der Praxis	71
5.1	Durchführung einer Interviewstudie und einer teilnehmenden Beobachtung.....	72
5.1.1	Studiendesign	72
5.1.2	Ergebnisse der Studie	74
5.1.3	Zwischenfazit	76
5.2	Entwicklung einer Ontologie für die Beschreibung der Zusammenhänge in der Herstellkostenschätzung	77
5.2.1	Vorgehen	77
5.2.2	Elemente und Struktur	80
5.2.3	Zwischenfazit	82
5.3	Fazit zur Herstellkostenschätzung in der Praxis.....	83
6	Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung.....	85
6.1	Vorgehen	86
6.2	Methodenbeschreibung	88
6.2.1	Bauteilinformationen erfassen.....	89
6.2.2	Referenzsystemelemente identifizieren.....	90
6.2.3	Prozesskette übernehmen und anpassen	90
6.2.4	Prozesskette in Herstellkosten überführen	90
6.2.5	Ergebnis prüfen.....	91
6.2.6	Ergebnis speichern	91
6.3	Fazit zur Methode	91

7 Funktionsdemonstrator der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung	95
7.1 Softwareprototyp	96
7.1.1 Bauteilinformationen erfassen	99
7.1.2 Referenzsystemelemente identifizieren	102
7.1.3 Prozesskette übernehmen und anpassen.....	104
7.1.4 Prozesskette in Herstellkosten überführen	105
7.1.5 Ergebnis prüfen	109
7.1.6 Ergebnis speichern.....	110
7.2 Defizite des Softwareprototyps	110
7.3 Initiale Evaluation des Softwareprototyps	112
7.4 Fazit zum Funktionsdemonstrator	115
8 Evaluation.....	117
8.1 Studiendesign.....	118
8.2 Ergebnisse der Evaluation.....	122
8.3 Diskussion der Evaluationsergebnisse	129
8.4 Fazit zur Evaluation	132
9 Zusammenfassung und Ausblick	135
9.1 Zusammenfassung	135
9.2 Ausblick.....	141
9.2.1 Frühe Phase der SGE	141
9.2.2 Cost Engineering	142
9.2.3 Semantische Technologien	143
Literaturverzeichnis.....	I
Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:.....	XXIII
Anhang A.....	XXV
DS-I: Interviewleitfaden	XXV
Anhang B.....	XXIX
PS: Bewertete Defizite aus 2-stufiger Delphi Studie.....	XXIX
Anhang C.....	XXXIII
DS-II: Interview Leitfaden aus Cacaj (2022, S. 86).....	XXXIII
DS-II: Fragebogen aus Cacaj (2022, S. 80–83)	XXXIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Thema der Arbeit und Forschungsfelder, die relevant sind, hilfreich sind, oder zu denen beigetragen werden soll. Modelliert in einem ARC-Diagramm (Areas of Relevance and Contribution) in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009).	3
Abbildung 1.2:	Aufbau und Struktur der vorliegenden Arbeit.....	4
Abbildung 2.1:	Verständnis von Innovation als Ergebnis aus Produktprofil, Invention und Markteinführung aus Reinemann (2021, S. 9) nach Albers et al. (2018, S. 2).	8
Abbildung 2.2:	Konzepte der Systemtheorie aus Ropohl (2009, S. 76).	9
Abbildung 2.3:	Erweitertes ZHO-Modell in Anlehnung an Albers, Behrendt, Schroeter, Ott und Klingler (2013, S. 393) übersetzt nach Lohmeyer (2013, S. 122).	11
Abbildung 2.4:	Aktivitäten der Problemlösungsmethodik SPALTEN nach Albers et al. (2002).	12
Abbildung 2.5:	IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell, adaptiert nach Albers et al. (2016, S. 104).	13
Abbildung 2.6:	Referenzprodukte, Referenzsystemelemente und das Referenzsystem. Angepasste und übersetzte Abbildung aus Albers et al. (2019, S. 1700).	14
Abbildung 2.7:	Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und Kostenbeurteilung im Produktentwicklungsprozess aus Reinemann (2021, S. 59) nach Ehrlenspiel und Meerkamm (2013, S. 668).	17
Abbildung 2.8:	Kostenfestlegung und Realisierung in unterschiedlichen Unternehmensbereichen nach (VDI-Richtlinie 2235) aus Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann und Mörtl (2014, S. 15).	18
Abbildung 2.9:	Grundlegende Aspekte des Produkt-Produktions-CoDesigns nach Albers und Lanza et al. (2022). Aus Albers und Rapp et al. (2022, S. 3).	20
Abbildung 2.10:	Klassifizierung von Methoden zur Kostenschätzung. Übersetzte Darstellung aus Niazi et al. (2006, S. 569).	23
Abbildung 2.11:	Ablaufdiagramm eines fallbasierten Ansatzes zur Kostenschätzung. Übersetzte Abbildung aus Niazi et al. (2006, S. 565).	25

Abbildung 2.12:	Verwendete rotationssymmetrische Features aus Qian und Ben-Arieh (2008, S. 814).	27
Abbildung 2.13:	Generisches Framework zur Beschreibung der Produktstruktur und Verknüpfung mit Kosteninformationen. Übersetzte Darstellung aus Weustink et al. (2000, S. 143).	28
Abbildung 2.14:	Beispielhafte Anwendung einer Implantat Miniplatte bei Knochenbruch aus Stryker GmbH (2020, S. 22).	30
Abbildung 2.15:	Vergleich der drei quantitativen Methoden zur Kostenschätzung: featurebasiert (Feature Based), aktivitätenbasiert (Operation Based) und Break-Down (Breakdown) am Beispiel der Außenprofilformung von Implantat Miniplatten aus Budiono und Lassandy (2018, S. 3)	31
Abbildung 2.16:	Technologiekette (links), Prozesskette (mitte) und Fertigungsfolge (rechts) in Anlehnung an Fallböhmer (2000) und Jacob (2021).	33
Abbildung 2.17:	Darstellung der Funktionsstruktur und der Produktstruktur in der Produktarchitektur und daraus folgende Ableitung des Komponentenbegriffs aus Krause et al. (2021, S. 337).	35
Abbildung 2.18:	Kollaboration auf interdisziplinärer Vernetzungsebene durch Menschorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools. Darstellung aus Mandel (2024, S. 6) angelehnt an Albers (2023).	38
Abbildung 2.19:	Handlungsfelder des Advanced Systems Engineering aus Dumitrescu, Albers, Riedel, Stark und Gausemeier (S. 28)	39
Abbildung 2.20:	Übersicht über den C&C ² -Ansatz und seine Elemente aus Tröster et al. (2021, S. 4) nach Matthiesen et al. (2018).	43
Abbildung 2.21:	Begriffshierarchie von Zeichen, Daten, Informationen und Wissen nach Freimut Bodendorf (2006, S. 1)	45
Abbildung 2.22:	Kontinuierliche Darstellung von <i>Daten</i> , <i>Informationen</i> und <i>Wissen</i> mit Deskriptoren als Differenzierungsmerkmale nach Freimut Bodendorf (2006, S. 2)	46
Abbildung 2.23:	Beziehungen zwischen Zeichen, Konzept und Objekt im Semiotischen Dreieck nach Ogden und Richards (1923, S. 11), übersetzt nach Haneke (2022, S. 16)	46
Abbildung 2.24:	Semantic Web Technology Stack mit verwendeten Konzepten und Abstraktionen (linke Seite) und deren Umsetzungsmöglichkeiten (rechte Seite) aus Gängler (2011, S. 24)	47

Abbildung 2.25:	Struktur eines wissensbasierten Systems aus Brandmeier (2020, S. 52) in Anlehnung an Ertel (2013).	48
Abbildung 2.26:	Beziehungen zwischen Ontologie und Wissensgraph am Beispiel einer Getriebewelle in Anlehnung an Haneke (2022, S. 22).	51
Abbildung 2.27:	Überblick über die wichtigsten Klassen und Objekteigenschaften der Ontologie aus Lemaignan et al. (2006, S. 99).	52
Abbildung 2.28:	Ganzheitliches Prozess-Metamodell aus Gröger et al. (2014, S. 43).	53
Abbildung 2.29:	Überblick über die Hauptbestandteile der Methodik für die Überführung eines Konzeptes in ein detailliertes Design und eine passende Prozesskette für hybride Fertigungsplattformen aus Gleadall et al. (2016, S. 557).	54
Abbildung 2.30:	Workflow für die Festlegung der Prozesskette aus Mandolini und Campi et al. (2020, S. 1139).	56
Abbildung 4.1:	Sieben Typen von Forschungsarbeiten der Methodenforschung in der Produktentwicklung aus Reinemann (2021, S. 124) nach Blessing und Chakrabarti (2009, S. 18) und Einordnung der vorliegenden Arbeit als Typ 5	64
Abbildung 4.2:	Forschungsvorgehen dieser Arbeit nach den Stadien der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009).	64
Abbildung 4.3:	Intended Impact Model nach Blessing und Chakrabarti (2009). Übersetzte Darstellung aus Hellweg, Haneke, Cacaj, Rapp und Albers (2023, S. 382)	66
Abbildung 4.4:	Im Rahmen der Arbeit untersuchte Getriebekomponenten von eAchsen (K0-K8).	69
Abbildung 5.1:	Überblick über das Forschungsvorgehen mit in Kapitel 5 zu bearbeitenden Fragestellungen.	71
Abbildung 5.2:	Nützliche Informationen zur Herstellung nach Hellweg und Behrendt (2021, S. 7).	75
Abbildung 5.3:	Einfluss auf Arbeitsergebnisse durch die Bereitstellung verschiedener Informationen nach Hellweg und Behrendt (2021, S. 9).	76
Abbildung 5.4:	Zusammenhang zwischen der Rotorwelle $K0$ und einer möglichen Fertigung verknüpft über Wirkflächen.	79

Abbildung 5.5:	Übersicht über die wichtigsten Konzepte der Ontologie für die Beschreibung der für die Herstellkostenschätzung benötigten Zusammenhänge zwischen Komponenten und deren Fertigung. Aktualisierter und übersetzter Stand aus Hellweg und Haneke et al. (2023, S. 6).....	80
Abbildung 5.6:	Lagersitz der Rotorwelle <i>K0</i> als Elementgruppe mit Wirkflächen in Anlehnung an Hellweg et al. (2022, S. 248).....	81
Abbildung 5.7:	Das Konzept der Prozesskette am Beispiel eines Ausschnitts einer Prozesskette der Rotorwelle <i>K0</i> mit Fokus auf dem Prozessschritt Drehen und dazugehörigen Prozessdetails. Angepasste, übersetzte Darstellung aus Hellweg et al. (2022, S. 248).....	82
Abbildung 6.1:	Überblick über das Forschungsvorgehen mit der in Kapitel 6 zu bearbeitenden Fragestellung.	85
Abbildung 6.2:	Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung nach Hellweg und Haneke et al. (2023, S. 6)	89
Abbildung 6.3:	Schritte eins bis drei der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung. Detailabbildung nach Cacaj (2022, S. 38).....	92
Abbildung 6.4:	Schritte drei bis sechs der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung. Detailabbildung nach Cacaj (2022, S. 38).....	93
Abbildung 7.1:	Überblick über das Forschungsvorgehen mit der in Kapitel 7 zu bearbeitenden Fragestellung.	95
Abbildung 7.2:	Aktivitätsdiagramm des Softwareprototyps in Anlehnung an Haneke (2022, S. 34).....	97
Abbildung 7.3:	Vier Bereiche der graphischen Nutzeroberfläche (GUI) des Softwareprototyps aus Haneke (2022, S. 35).	98
Abbildung 7.4:	Darstellung der Wirkfläche Axialer Lagersitz der Rotorwelle <i>K0</i> als Modellansicht im STEP-Format nach ISO 10303-242:2022-12 dargestellt über das Programm Teamcenter Visualization. 99	
Abbildung 7.5:	Einlesen einer STEP-Datei in den Softwareprototyp: Aufrufen des Dateidialogfensters aus dem Softwareprototyp (oben) und auswählen der STEP-Datei im Dateidialogfenster (unten). ... 100	
Abbildung 7.6:	Darstellung der Wirkflächen der Rotorwelle <i>K0</i> als Modellansichten im STEP-Format nach ISO 10303-242:2022-12 dargestellt über das Programm Teamcenter Visualization in Anlehnung an Haneke (2022, S. 42). 101	

Abbildung 7.7:	Detailmenü zur Konfiguration der Elementgruppen mit Wirkflächen am Beispiel des axialen Lagersitzes der Rotorwelle K0 in Anlehnung an Haneke (2022, S. 41).	102
Abbildung 7.8:	Einbettung der Wissensgraph-Abfrage in den Ablauf des Softwareprototyps.	103
Abbildung 7.9:	SPARQL-Abfrage zur Identifikation geeigneter Referenzsystemelemente.....	104
Abbildung 7.10:	Teilmenge von Wirkflächen und verknüpften Prozessschritten der Rotorwelle K0. Hervorgehoben ist die Wirkfläche Verzahnung (Gearing), die mit den Prozessschritten Wälzfräsen (Hobbing), Härteln (Hardening) und Verzahnungshonen (Honing) verknüpft ist.	105
Abbildung 7.11:	Modularer zweistufiger Ansatz bei dem die prozessspezifischen Herstellkosten aufbauend auf der Prozesskette in unterschiedlichem Detailgrad berechnet werden können.	106
Abbildung 7.12:	Modul für die Berechnung der Taktzeit für den Prozess Wälzfräsen mit Verzahnungsparametern und Erfahrungswerten. Die Taktzeit und Werkzeugkosten werden im Softwareprototyp für die Berechnung der Herstellkosten weiterverwendet (Abbildung 7.13).	108
Abbildung 7.13:	Logik für die Abschätzung von Fertigungskosten des Prozessschrittes Wälzfräsen. Dabei werden die Taktzeit und die Werkzeugkosten aus dem Modul für die Berechnung der Taktzeit für den Prozess Wälzfräsen (Abbildung 7.12) übernommen.	109
Abbildung 8.1:	Überblick über das Forschungsvorgehen mit in Kapitel 8 zu bearbeitenden Fragestellungen.	118
Abbildung 8.2:	Auswertung der Fragebogenergebnisse zu Erfolgs- und Anwendungskriterien. Übersetzte Abbildung aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 6) nach Cacaj (2022, S. 63).	123
Abbildung 8.3:	In den Interviews geäußerte Stärken (oben) und Schwächen (unten) der Unterstützung aus Cacaj (2022, S. 59).	124
Abbildung 8.4:	Automatisierungspotenzial als Verhältnis von geschätztem Aufwand und Nutzen der Automatisierung der sechs Methodenschritte. In Anlehnung an Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 7).	128

Abbildung 8.5:	Actual Impact Model nach Blessing und Chakrabarti (2009). Übersetzte Darstellung aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 8).....	130
Abbildung 9.1:	Forschungsvorgehen dieser Arbeit nach den Stadien der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009).	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Auswahl beispielhafter Exponenten xi zur Berücksichtigung geometrischer Ähnlichkeit in Formel 2.5 nach Ehrlenspiel et al. (2014, S. 482).	26
Tabelle 2.2:	Normen für Allgemeintoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren. In Anlehnung an Jorden und Schütte (2020, S. 193)	37
Tabelle 4.1:	In dieser Arbeit verwendete Forschungsmethoden nach Kapiteln.	67
Tabelle 5.1:	Übersicht über Interviewte im Rahmen der Studie inkl. Vorabinterviews in Anlehnung an Hellweg und Behrendt (2021, S. 4).	73
Tabelle 5.2:	Übersicht über beteiligte Personen mit Erfahrung im Cost Engineering.	78
Tabelle 7.1:	Als Probleme (grau) und Aufgaben (weiß) identifizierte Defizite des Softwareprototyps. Ausführliche Beschreibung in Anhang B.	111
Tabelle 7.2:	Zuordnung der Komponenten durch die Ähnlichkeitsabfrage Zeile: Auszulegende Komponenten, Spalte identifiziertes Referenzsystemelement in Anlehnung an Haneke (2022, S. 54)	113
Tabelle 7.3:	Anzahl der Prozessschritte in originaler Auslegung, abgeschätzt durch den Softwareprototyp und die Abweichung bezüglich der Anzahl und der exakten Prozesse.	114
Tabelle 7.4:	Abweichung der Herstellkostenschätzung des Softwareprototyps mit generierter Prozesskette von jener mit der ursprünglichen und der ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzung in %.	115
Tabelle 8.1:	Erfolgs-, Anwendungs- und Unterstützungsmerkmale der Deskriptiven Studie 2 (DS-II). Übersetzte Tabelle aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 4)....	119
Tabelle 8.2:	Question-Method-Matrix: nach Blessing und Chakrabarti (2009) effiziente und effektive Methoden für Forschungsaspekte.	

Ausgewählte Methoden sind hervorgehoben. In Anlehnung an Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 5).....	120
Tabelle 8.3: Teilnehmende der Validierungsstudie in Anlehnung an Cacaj (2022, S. 50).....	122
Tabelle 8.4: Tabelle zum Verständnis des Transparenzbegriffs im Cost Engineering aus Cacaj (2022, S. 61).	126

Abkürzungsverzeichnis

A1-A4	Anwendungskriterien (Als Bewertungskriterium der Evaluation Kapitel 8)
ASE	Advanced Systems Engineering
C	Connector (Als Teil des C&C ² -Ansatz)
C&C ² -A	Contact and Channel Ansatz
CAD	Computer-aided Design
CAE	Computer-aided Engineering
CAM	Computer-aided Manufacturing
CAPP	Computer-aided Process Planning
CBR	Case Based Reasoning
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	Design Research Methodology
DS-I	Deskriptive Studie 1
DS-II	Deskriptive Studie 2
E1-E3	Erfolgskriterien (Als Bewertungskriterium der Evaluation Kapitel 8)
EN	Europäische Norm
ESA	European Space Agency
FAS	Functional Architecture for Systems
FAS4M	Functional Architectures of Systems for Mechanical Engineers
FF	Forschungsfrage
FK	Fertigungskosten
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
HK	Herstellkosten
IPEK	Institut für Produktentwicklung

IPeM	Integriertes Produktentstehungsmodell
ISO	International Organisation for Standardization
IT	ISO-Toleranz
JT	Jupiter Tesselation als ISO-Standard-Grafikformat für 3D-Daten
K0-K8	Beispielkomponenten in dieser Arbeit (Abschnitt 4.4)
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LSS	Leitstützstruktur (Als Teil des C&C ² -Ansatz)
MASON	Manufacturing's Semantics Ontology
MBSE	Model-based Systems Engineering
MK	Materialkosten
OMG	Object Management Group
OWL	Web Ontology Language
PGE	Produktgenerationsentwicklung nach Albers
PMI	Produkt- und Fertigungsinformationen
PPCD	Produkt-Produktions-CoDesign
PS	Präskriptive Studie
RDF	Resource Description Framework
RDFS	Resource Description Framework Schema
RSE	Referenssystemelemente
S1-S6	Unterstützungskriterien (Als Bewertungskriterium der Evaluation Kapitel 8)
SGE	Systemgenerationsentwicklung
SPALTEN	Akronym für eine Problemlösungsmethode: Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen, Nachbereiten und Lernen
SPARQL	SPARQL Protocol And RDF Query Language
STEP	Standard for the exchange of product model data

SWRL	Semantic Web Rule Language
SysML	Systems Modeling Language
Turtle	Terse RDF Triple Language
URI	Uniform Resource Identifier
URL	Uniform Resource Locator

Formelzeichen

G_n	Aktuell in Entwicklung befindliche Systemgeneration
$\ddot{U}S_n$	Durch Übernahmevariation entwickelte Menge der Teilsysteme
AS_n	Durch Ausprägungsvariation entwickelte Menge der Teilsysteme
PS_n	Durch Prinzipvariation entwickelte Menge der Teilsysteme
δ_{UV}	Übernahmeveriationsanteil
φ_{HK}	Stufensprung der Herstellkosten
HK_q	Gesuchte Herstellkosten in €
HK_0	Bekannte Herstellkosten in €
MK_q	Gesuchte Materialkosten in €
MK_0	Bekannte Materialkosten in €
FK_q	Gesuchte Fertigungskosten in €
FK_0	Bekannte Fertigungskosten in €
a_m	Gewichtungsfaktor für Materialanteile
φ_{MK}	Materialspezifischer Kostensprung
k	Prozessschritt
a_k	Gewichtungsfaktor für Prozessschritte
$\varphi_{FK,k}$	Technologiespezifischer Kostensprung
i	Geometrische Abhängigkeit
a_i	Geometriespezifischer Gewichtungsfaktor
φ_L	Geometriespezifischer Kostensprung
x_i	Exponent zur Berücksichtigung geometrischer Ähnlichkeit
L_q	Gesuchte Länge in m
L_0	Bekannte Länge in m

HK	Herstellkosten in €
R_o	Personalstundensatz in €/h
R_m	Maschinenstundensatz in €/h
T_{su}	Rüstzeit in h
T_{ot}	Betriebszeit in h
T_{no}	Stillstandszeit in h
MK	Materialkosten in €
WVK	Werkverwaltungskosten in €

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Beginn der 2020er Jahre war mit Corona-Pandemie und Ukraine Krieg sowie daraus resultierenden Energiepreissteigerungen, Lieferengpässen und Inflation von schwierigen Marktsituationen geprägt. Insbesondere sprunghaft steigende oder fallende Energie- und Rohstoffpreise wirken sich kritisch auf die Profitabilität von Unternehmen aus. Zusätzlich steigt in Märkten mit internationaler Konkurrenz der Kostendruck. Um Marktanteile zu gewinnen und gleichzeitig profitabel zu wirtschaften, werden bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung Kosten analysiert (Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Mörtl, 2020). Ein wichtiger Kostenbestandteil für produzierende Unternehmen sind Herstellkosten. Diese können analysiert werden, um Kostentreiber zu identifizieren und Herstellkosten von Produkten zu optimieren (VDI-Richtlinie 2235).

Die Frühe Phase der SGE beginnt mit der „Initiierung eines Projektes“ und endet mit einer „bewerteten technischen Lösung“ (Albers, Rapp, Birk & Bursac, 2017, S. 4). Teil dieser ist die ökonomische Bewertung beispielsweise in Form einer Herstellkostenschätzung, welche die später in der Produktion verursachten Kosten schätzt. Das Arbeiten in dieser Frühen Phase der SGE besitzt Besonderheiten. So besteht in der Frühen Phase der SGE eine hohe Unsicherheit, zeitgleich aber auch ein hoher Grad der Beeinflussbarkeit (Bursac, 2016). Auch auf Kosten bezogen bietet sich ein großer Gestaltungsspielraum, während die Vorhersage resultierender Kosten mit großer Unsicherheit versehen ist (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2013).

Die KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung beschreibt den Produktentstehungsprozess als für jedes Produkt einzigartig und individuell. Zusätzlich steht der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung (Albers, 2010). Eine Schätzung der Herstellkosten muss somit individuell für jedes Produkt geschehen. Zugleich basieren neue Produktinnovationen nach dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers immer auch auf vorhandenen Referenzen. Ziel der KaSPro und der vorliegenden Arbeit ist es die Menschen in bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen bestmöglich zu unterstützen.

Herausforderungen bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen bestehen in einer eingeschränkten Verfügbarkeit von Produkt- und Fertigungsinformationen und geringer Datenqualität, einem hohen manuellen Zeitaufwand für Datenakquise und

Kalkulation, sowie einer disziplinübergreifenden Arbeit. Die Herausforderungen besitzen dabei Wechselwirkungen und lassen sich nicht klar voneinander trennen. Die notwendigen Informationen existieren häufig nur in den Köpfen von erfahrenen Personen als implizites Wissen oder liegen unstrukturiert in verschiedenen Dateiformaten ab. Der manuelle Zeitaufwand entsteht zu einem großen Teil durch die Suche, z. B. nach Informationen oder vergleichbaren, bereits betrachteten Komponenten. Diese Suche wird derzeit häufig im persönlichen Austausch durchgeführt. Die Beschaffung dieser Informationen, die im Folgenden als Referenzen dienen können, wird weiter erschwert durch Disziplingrenzen, an denen zahlreiche Informationssysteme und Organisationsstrukturen enden. So werden für die Herstellkostenschätzung sowohl Produktinformationen von Konstruierenden benötigt als auch detaillierte Fertigungsinformationen aus der Produktion oder Prozessknowhow aus speziellen Bereichen. Insbesondere in großen Unternehmen mit mehreren Hierarchiestufen ist somit ein effizienter Austausch über Organisationsgrenzen und Standorte hinweg erschwert.

Um die beschriebenen Herausforderungen zu überwinden, wird eine methodische Unterstützung benötigt, welche an den Bedarfen und Randbedingungen der Menschen orientiert ist. Für eine verbesserte Informationsverfügbarkeit und Datenstruktur werden in der vorliegenden Arbeit semantische Technologien eingeführt. Gleichzeitig wird eine Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung entwickelt, die dabei unterstützt geeignete Referenzsystemelemente als Grundlage für neue Herstellkostenschätzungen zu identifizieren und zu nutzen. Ein Funktionsdemonstrator realisiert als Softwareprototyp zeigt zudem auf, wie beispielhaft für das Produktfeld der Getriebekomponenten für die Elektromobilität die Anwendung der Methode unterstützt und durch Automatisierung der manuelle Zeitaufwand reduziert werden kann. So wird das übergeordnete Ziel, die Steigerung der Profitabilität angestrebt.

1.2 Fokus der Arbeit

Der Fokus der Arbeit liegt auf der Entwicklung einer Methode zur referenzbasierten Unterstützung von Personen bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen in der Frühen Phase der SGE. Der hohe manuelle Zeitaufwand bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen soll durch die Identifizierung und Analyse von Referenzsystemelementen und Automatisierung der dafür notwendigen Schritte erfolgen. Für eine Verbesserung der maschinenlesbaren Datenverfügbarkeit werden semantische Technologien betrachtet und für eine Herstellkostenschätzung benötigte Informationen analysiert. Die vorliegende Arbeit betrachtet dabei Informationen bezüglich des Produktes, der Produktion und der Kosten und

überwindet damit existierende Disziplingrenzen zwischen Produktentwicklung und Produktion im Sinne des Produkt-Produktions-CoDesigns (PPCD). Dabei stehen die Anwendenden der Methode im Mittelpunkt. Bereits existierende Ansätze für die Anwendung von semantischen Technologien im Cost Engineering werden hierzu analysiert.

Abbildung 1.1 stellt das Thema der Arbeit mit den angrenzenden Forschungsfeldern dar. Es werden sowohl die Forschungsfelder gezeigt, in denen ein Beitrag geleistet werden soll, als auch essenziell relevante, sowie ausgewählte hilfreiche Forschungsfelder.

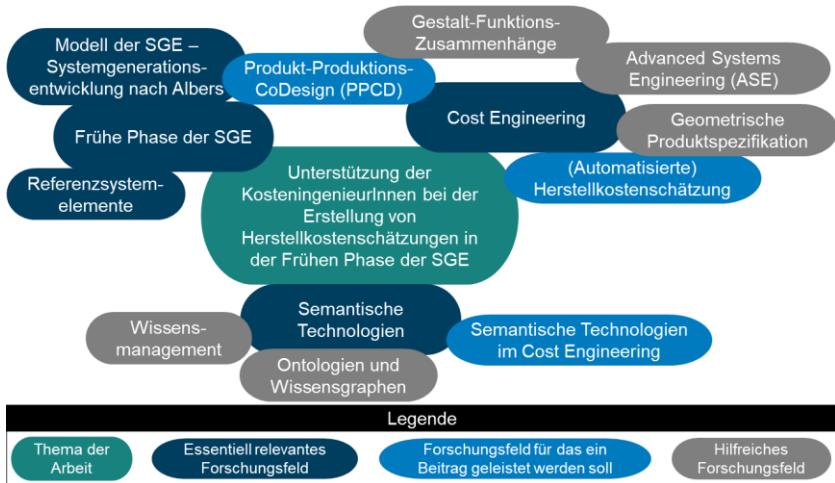


Abbildung 1.1: Thema der Arbeit und Forschungsfelder, die relevant sind, hilfreich sind, oder zu denen beigetragen werden soll. Modelliert in einem ARC-Diagramm (Areas of Relevance and Contribution) in Anlehnung an Blessing und Chakrabarti (2009).

Um den Einfluss der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung auf das übergeordnete Ziel der Profitabilität zu bewerten, werden Maßnahmen in der Forschungsumgebung ergriffen. Anhand beispielhafter Getriebekomponenten von elektrischen Achsen (Abschnitt 4.4) wird ein Softwareprototyp als Funktionsdemonstrator entwickelt. Dieser unterstützt Anwendende durch automatisierte Abläufe. Der Funktionsdemonstrator dient dabei der Veranschaulichung, wie eine auf der Methode aufbauende Unterstützung aussehen und wirken kann. Bei dem Funktionsdemonstrator bestehen Defizite, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysiert werden. So ist z. B. die Anwendbarkeit

eingeschränkt und der manuelle Betreuungsaufwand des Funktionsdemonstrators hoch. Die Methode und der Softwareprototyp werden abschließend hinsichtlich ihres Einflusses auf die Profitabilität durch Zeitaufwand, Transparenz und Wissensverfügbarkeit validiert.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit besteht aus neun Kapiteln, über die im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben wird (vgl. Abbildung 1.2).



Abbildung 1.2: Aufbau und Struktur der vorliegenden Arbeit.

In **Kapitel 2** wird der Stand der Forschung beschrieben. Dafür werden die in Abbildung 1.1 beschriebenen Forschungsfelder erläutert. Zuerst werden Besonderheiten der Frühen Phase der SGE und in Zusammenhang stehende Themen beschrieben. Die Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung und Produktion im Sinne des Produkt-Produktions-CoDesigns bildet den Übergang zum zweiten Forschungsfeld des Cost Engineering, welches ebenfalls mit nahestehenden Themen erläutert wird. Herauszustellen sind Herstellkostenschätzungen als Bestandteil des Cost Engineering und für deren Automatisierung notwendige Themenfelder wie Advanced Systems Engineering, Geometrische Produktspezifikation und Gestalt-Funktion-Zusammenhänge. Als drittes und letztes übergeordnetes Forschungsfeld werden semantische Technologien als Möglichkeit der formalen und maschinenlesbaren Beschreibung betrachtet und bereits vorhandene semantische Ansätze im Cost Engineering erläutert. Es folgt ein Fazit, welches die Forschungslücke aufzeigt.

In **Kapitel 3** wird, abgeleitet von der Forschungslücke, der Forschungsbedarf beschrieben. Es folgen die Zielsetzung und die Forschungsthese, die die Arbeit leitet. Abschließend werden sechs Forschungsfragen (FF) für eine zusätzliche Struktur eingeführt.

In **Kapitel 4** wird die Forschungsmethodik vorgestellt. Begonnen wird mit dem Forschungsvorgehen, welches die vier Stadien Klärung des Forschungsgegenstands, Deskriptive Studie 1, Präskriptive Studie und Deskriptive Studie 2 beinhaltet. Danach wird die geplante Wirkung der entwickelten Unterstützung beschrieben. Es folgt eine kurze Abhandlung der verwendeten Methoden und eine Beschreibung der Forschungsumgebung, in der die Forschung stattgefunden hat.

In **Kapitel 5** wird zunächst durch eine Interviewstudie analysiert, welche Informationen in der Herstellkostenschätzung benötigt werden und welche Herausforderungen bei der Bereitstellung bestehen. Es folgt ein semantischer Ansatz in Form einer Ontologie für das Cost Engineering, die für Herstellkostenschätzungen benötigte detaillierten Zusammenhänge zwischen Komponenten und deren Fertigung maschinenlesbar beschreiben kann.

In **Kapitel 6** wird die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung aufbauend auf den Ergebnissen der vorigen Kapitel entwickelt und beschrieben. Die Methode benötigt als Voraussetzung einen Wissensgraphen, der die im vorherigen Kapitel beschriebenen Zusammenhänge modellieren kann. Sechs Methodenschritte werden für eine Herstellkostenschätzung durchlaufen, wobei der Mensch im Mittelpunkt steht.

In **Kapitel 7** wird ein Softwareprototyp für die teilautomatisierte Ableitung von Herstellkosten als Realisierung des Funktionsdemonstrators zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung entwickelt. Der Softwareprototyp ist dabei auf den Anwendungsbereich der Forschungsumgebung, Getriebekomponenten für die Elektromobilität, begrenzt.

In **Kapitel 8** wird durch eine Deskriptive Studie mit Interviews, Fragebogen und Beobachtung die erwartete Wirkung der entwickelten Methode und des Softwareprototyps auf die Profitabilität anhand eines Impact Models mit der erwünschten Wirkung abgeglichen. Die Ergebnisse werden abschließend diskutiert.

In **Kapitel 9** wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und Schnittstellen zu anderen laufenden Arbeiten beschrieben. Die vorliegende Arbeit endet mit einem Ausblick auf offene Themen und Fragestellungen.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Aufbauend auf den in Abschnitt 1.2 identifizierten Forschungsfeldern, werden in diesem Kapitel die Grundlagen und der relevante Stand der Forschung vorgestellt und diskutiert. Es werden drei übergeordnete Forschungsfelder näher beschrieben:

- Frühe Phase der SGE: Grundbegriffe und Bedeutung im Produktentstehungsprozess (Abschnitt 2.1)
- Cost Engineering basierend auf dem Gestalt-Funktion-Zusammenhang (Abschnitt 2.2)
- Semantische Technologien und deren Anwendung im Cost Engineering (Abschnitt 2.3)

Zu den drei Forschungsfeldern werden jeweils Fazits gezogen, welche in ein Gesamtfazit (Abschnitt 2.4) münden. Dieses zeigt gleichzeitig die Forschungslücke auf, welche als Grundlage für die Identifikation des Forschungsbedarfs (Abschnitt 3.1) dient.

2.1 Frühe Phase der SGE: Grundbegriffe und Bedeutung im Produktentstehungsprozess

Dieser Abschnitt beginnt mit Ausführungen zum Innovations-, Modell- und Systembegriff (Abschnitt 2.1.1). Es folgt Abschnitt 2.1.2 zum ZHO-Modell und Abschnitt 2.1.3 zur SPALTEN Methode. Nach einer Beschreibung des IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell in Abschnitt 2.1.4 wird in Abschnitt 2.1.5 das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers erläutert. Die Frühe Phase der SGE, in der die Unsicherheit aber auch die Beeinflussbarkeit z. B. von Kosten hoch ist, wird in Abschnitt 2.1.6 beschrieben. Anschließend folgt das Produkt-Produktions-CoDesigns (PPCD) in Abschnitt 2.1.7, welches eine Brücke zwischen der Produktentwicklung und der Produktion darstellt. Ein Zwischenfazit (Abschnitt 2.1.8) schließt diesen Abschnitt ab und führt in das Cost Engineering, welches die hier genannten Aspekte mit der frühzeitigen Betrachtung von Fertigungsaspekten und daraus resultierenden Herstellkosten in der Praxis aufgreift (Abschnitt 2.2).

2.1.1 Innovations-, Modell- und Systembegriff

Ein entscheidendes Ziel von Unternehmen ist wirtschaftlicher Erfolg. Dieser wird maßgeblich durch den Markterfolg von Produkten beeinflusst. Das Innovationsverständnis von Albers et al. (2018) beinhaltet drei Bestandteile. Als erstes das Produktprofil, welches den Kundennutzen, den Anwendernutzen und den Anbieternutzen beschreibt. Als zweites die Invention als technische Lösung oder Idee. Als drittes die erfolgreiche Markteinführung. Nur bei Erfüllung aller drei Bestandteile kommt es zum Erfolg am Markt. Nach Albers et al. (2018) gibt es somit bei Produkten keine Innovation ohne wirtschaftlichen Erfolg.

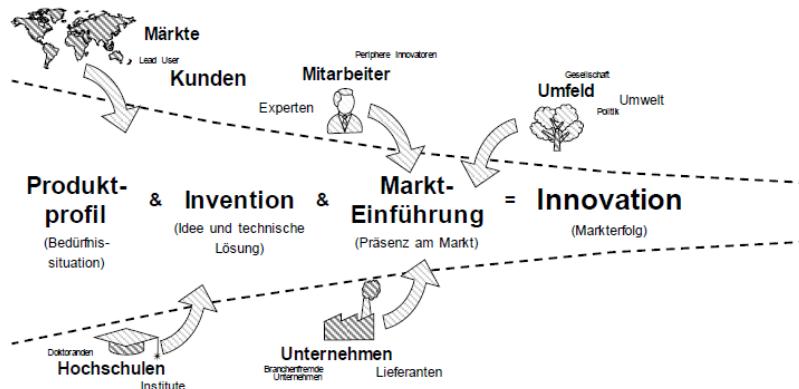


Abbildung 2.1: Verständnis von Innovation als Ergebnis aus Produktprofil, Invention und Markteinführung aus Reinemann (2021, S. 9) nach Albers et al. (2018, S. 2).

In dieser Arbeit werden verschiedene Modelle wie das ZHO-Modell (Abschnitt 2.1.2), das IPeM (Abschnitt 2.1.4) und das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (Abschnitt 2.1.5) verwendet. Dafür wird hier der Modellbegriff eingeführt. Stachowiak (1973, S. 131–133) beschreibt Modelle durch drei Merkmale.

- **Abbildungsmerkmal:** Modelle sind stets Abbildungen von etwas.
- **Verkürzungsmerkmal:** Modelle beinhalten nur einen Auszug des Originals. Sie stellen somit nicht alle, sondern nur ausgewählte Informationen bereit.

- **Pragmatisches Merkmal:** Modelle werden stets für einen Zweck erstellt und dieser bestimmt, wo das Modell verkürzt wird. Durch die Verkürzung kann ein Modell als Abbild mehrerer Originale gesehen werden.

Neben dem Modellbegriff wird in dieser Arbeit der Systembegriff verwendet. Bereits in der Antike gab es den Gedanken, dass ein System mehr als die Summe der Einzelteile ist (Ludwig von Bertalanffy, 1972; Ropohl, 2009). Ropohl (1975) hat dieses Systemverständnis in „Einleitung in die Systemtechnik“ auf technische Systeme übertragen. Und unter anderem in „Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik“ weiter ausgebaut. Drei Konzepte bilden dabei den Kern (Ropohl, 2009):

- Das funktionale Konzept bezeichnet die Möglichkeit Systeme durch Ein- und Ausgangsgrößen sowie Zustände beschreiben zu können. Der eigentliche Aufbau des Systems wird dabei nicht betrachtet. Dies wird auch als *Blackbox-Charakter* bezeichnet. (Ropohl, 2009; Bursac, 2016; Gausemeier, Czaja & Dülme, 2015)
- Das strukturelle Konzept bezeichnet die Möglichkeit, Systeme durch ihre Elemente (Bestandteile) und deren Relationen untereinander beschreiben zu können. (Ropohl, 2009)
- Das hierarchische Konzept bezeichnet die Möglichkeit, Elemente eines Systems wiederum als System zu betrachten. Dies ist auch in die andere Richtung möglich, sodass ein System stets auch als Element eines Supersystems betrachtet werden kann (Ropohl, 2009). Albers, Braun und Muschik (2010) beschreiben analog dem hierarchischen Konzept, die Möglichkeit systemtheoretische Ansätze auf Elemente (Subsysteme) zu übertragen. Dies wird auch als fraktaler Charakter bezeichnet.

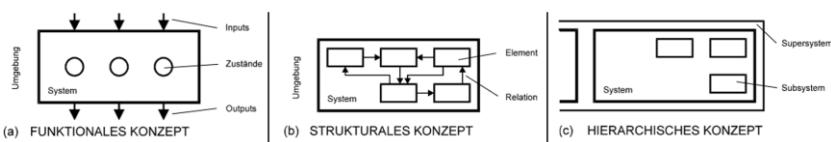


Abbildung 2.2: Konzepte der Systemtheorie aus Ropohl (2009, S. 76).

Aufbauend auf den drei Konzepten wird die Systemtheorie von Ropohl (2009) definiert.

Definition System

„Ein System ist das Modell einer Ganzheit, die (a) Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist, die (b) aus miteinander

verknüpften Teilen bzw. Subsystemen besteht, und die (c) von ihrer Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird.“
(Ropohl, 2009, S. 77)

2.1.2 ZHO-Modell

„Der Kernerfolgsfaktor in der Produktentwicklung ist nicht die Methodik, das Management oder die Informationstechnik, sondern der Mensch als Individuum und als Team.“ (Albers, 2003, S. 3) Damit steht der Mensch im Mittelpunkt der Produktentwicklung. Auch Lohmeyer (2013, S. 114) stellt den Menschen in den Mittelpunkt. So überführt der Mensch als Teil des Handlungssystems ein zunächst ungenaues Zielsystem in ein konkretes Objektsystem. Der Produktentstehungsprozess kann allgemeiner als Überführung vom Zielsystem in das Objektsystem durch das Handlungssystem verstanden werden.

Dieser Zusammenhang wird ebenso im erweiterten ZHO-Modell abgebildet (engl. Advanced System Triple, Abbildung 2.3). Das erweiterte ZHO-Modell baut auf den systemtheoretischen Überlegungen von Ropohl (2009) bezüglich Zielsystem und Handlungssystem auf und ergänzt es unter anderem durch das Objektsystem (Albers & Braun, 2011b).

- Das **Zielsystem** umfasst dabei alle Ziele, Anforderungen und deren Zusammenhänge, die für die Produktentwicklung notwendig sind (Ebel, 2015).
- Das **Handlungssystem** umfasst Aktivitäten, Methoden, Prozesse und Ressourcen wie Personen und Ausstattung, die für die Überführung des Zielsystems in das Objektsystem notwendig sind (Albers & Braun, 2011b; Muschik, 2011).
- Das **Objektsystem** umfasst alle Objekte, die als (Teil-)Ergebnisse und Dokumentationen im Entwicklungsprozess entstehen (Albers & Braun, 2011a; Albers & Braun, 2011b).

Das Handlungssystem wird von Albers und Braun (2011b) um die Wissensbasis und den Lösungsraum ergänzt, welche Teil eines iterativen Prozesses aus Analyse und Synthese sind. Die Wissensbasis enthält domänen- und fallspezifisches Wissen, welches häufig personenbezogen ist. Als Domäne (engl. Domain) wird ein Gebiet bezeichnet, auf dem sich jemand besonders betätigt, z. B. die Konstruktion, das Cost Engineering oder die Fertigungsplanung (Cornelsen Verlag, 2023). Die Wissensbasis kann erweitert werden durch das Einbinden weiterer Ressourcen oder durch die Analyse des Objektsystems. Schlüssel für die Analyse des Objektsystems ist die Validierung, welche, basierend auf Albers' dritter Hypothese

zur Produktentstehung eine zentrale Rolle zufällt (Albers, Behrendt & Ott, 2010). Die Wissensbasis kann durch Synthese zur Präzisierung des Zielsystems genutzt werden. Durch die Analyse des Zielsystems wird wiederum der Lösungsraum konkretisiert. Der Lösungsraum bildet dabei eine Repräsentation aller Lösungsmöglichkeiten für eine spezifische Problemstellung. Zusätzlich ist er Ausgangsort für die Synthese des Objektsystems. Das erweiterte ZHO-Modell ist damit in sich geschlossen und kann iterativ durchlaufen werden. Das Ziel- und das Objektsystem werden dabei immer weiter konkretisiert, was damit zur Realisierung eines Produktes führt. (Albers, Lohmeyer & Ebel, 2011; Lohmeyer, 2013; Albers et al. 2013)

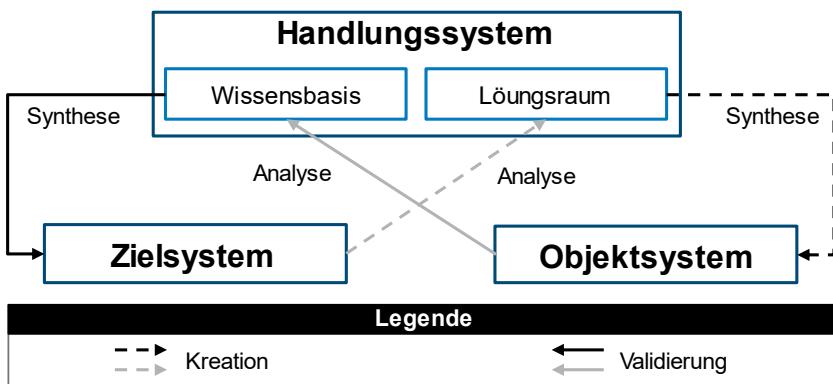


Abbildung 2.3: Erweitertes ZHO-Modell in Anlehnung an Albers, Behrendt, Schroeter, Ott und Klingler (2013, S. 393) übersetzt nach Lohmeyer (2013, S. 122).

2.1.3 Die Problemlösungsmethodik SPALTEN

Die Produktentwicklung wird von Albers, Burkhardt, Meboldt und Saak (2005) als eine Abfolge von Problemsituationen verstanden. Problemsituationen bezeichnen dabei das Abweichen eines (unerwünschten) Ist-Zustands von einem (angestrebten) Soll-Zustand (Ehrlienspiel & Meerkamm, 2013). Dabei sind der genaue Ist- und Soll-Zustand, der Weg von Ist- zu Soll-Zustand, sowie die zur Verfügung stehenden Ressourcen häufig nicht im Detail bekannt.

Albers, Saak und Burkhardt (2002) stellen als Unterstützung der Problemlösung die Methodik SPALTEN vor. Dabei ist SPALTEN ein Akronym für die vom Problemlösungsteam durchlaufenen Aktivitäten (Abbildung 2.4). Die

Zusammensetzung des Problemlösungsteams kann sich während des Durchlaufens der Aktivitäten ändern. Zudem besitzt SPALTEN einen fraktalen Charakter (Albers et al., 2010), was es ermöglicht SPALTEN auch auf eine Aktivität der Problemlösungsmethodik anzuwenden. (Albers, Reiß, Bursac & Breitschuh, 2016)



Abbildung 2.4: Aktivitäten der Problemlösungsmethodik SPALTEN nach Albers et al. (2002).

2.1.4 IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell

Basierend auf dem erweiterten ZHO-Modell und der Problemlösemethode SPALTEN stellen Albers und Meboldt (2007) das IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell vor. Das IPeM ist ein übergeordnetes Modell zur Modellierung von Produktentstehungsprozessen. Es kann sowohl die Zusammenhänge von Produktgenerationen untereinander als auch Verbindungen zu dem Validierungssystem, dem Produktionssystem und der Strategie darstellen. Das Phasenmodell im IPeM (Abbildung 2.5, rechts) erlaubt auch die Darstellung iterativer Prozesse und damit die Modellierung agiler Produktentstehungsprozesse. (Albers, Reiß, Bursac & Richter, 2016)

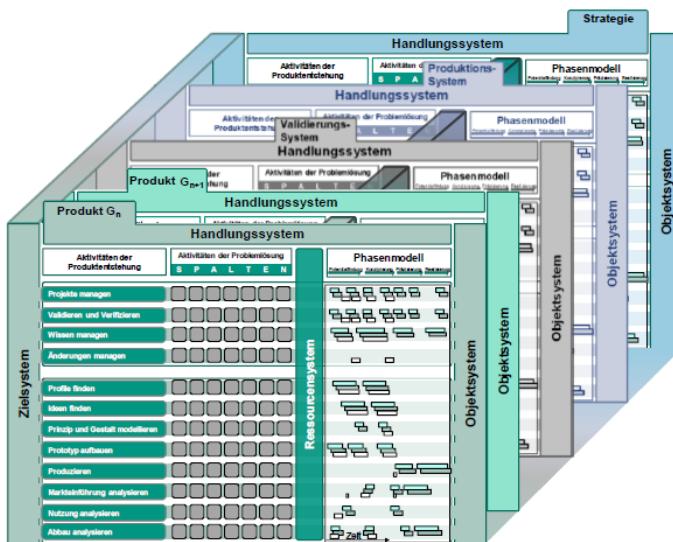


Abbildung 2.5: IPeM – integriertes Produktentstehungsmodell, adaptiert nach Albers et al. (2016, S. 104).

2.1.5 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers

Nach Albers, Bursac und Wintergerst (2015) werden Produkte in Generationen entwickelt. Dies begründet das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers, in dem Produktgenerationen durch Variationen entwickelt werden. Neben Produkten gelten die generalisierten Konzepte analog auch für Cyberphysische-Systeme. Dies begründet das aus dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung hervorgegangene Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (Albers & Rapp, 2022; Albers, Kürten et al., 2022).

Neben Systemgenerationen mit eindeutigen Vorgängern, gilt das Modell der SGE auch für Systemgenerationen ohne direkte Vorgängergenerationen. Für diese Systemgenerationen existieren Konzepte und Lösungen für Subsysteme (Albers et al., 2015). Diese Konzepte und Lösungen sind nicht nur Bestandteile von Referenzprodukten, sondern bilden nach Albers et al. (2019) basierend auf dem Systemverständnis von Ropohl (2009) das Referenzsystem:

Definition Referenzsystem

„Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente aus bereits bestehenden oder bereits geplanten soziotechnischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation stammen und die Grundlage und Ausgangsbasis für die Entwicklung der neuen Produktgeneration sind.“ (übersetzt)
(Albers et al., 2019, S. 1699)

Die einzelnen Elemente des Referenzsystems werden dabei als Referenzsystemelemente bezeichnet. Diese können etwa aus Patenten, gesetzlichen Vorgaben, Produktprofilen, Technologien, Wettbewerbsprodukten, Vorgängergenerationen, Forschungsprojekten oder der Universitätsforschung stammen (Richter, Rapp, Kurtz, Romanov & Albers, 2019; Albers et al., 2019). Am Beispiel des Tesla Roadsters sind der Laptop und der Lotus Elise Referenzprodukte. Die Laptop Akkus und das Chassis des Lotus Elise sind Referenzsystemelemente (Albers et al., 2019).

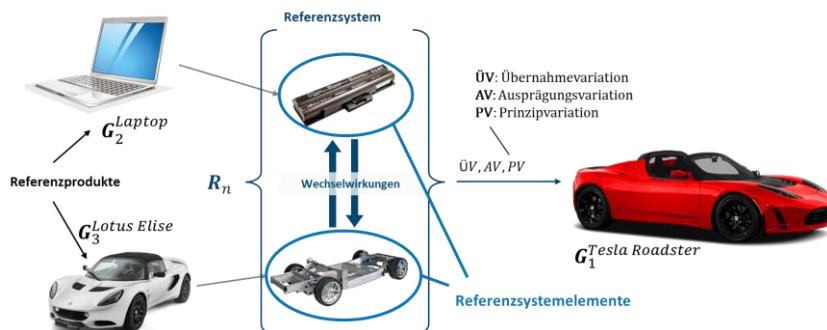


Abbildung 2.6: Referenzprodukte, Referenzsystemelemente und das Referenzsystem. Angepasste und übersetzte Abbildung aus Albers et al. (2019, S. 1700).

Eine Systemgeneration wie die $G_{i=1}$ des Tesla Roadsters lässt sich durch Formel 2.1 über die Variationsanteile beschreiben (Albers et al., 2015, S. 5; Albers et al., 2020; Albers & Rapp, 2022).

$$G_{i=n} = \ddot{U}S_n \cup AS_n \cup PS_n$$

2.1

Mit

$G_{i=n}$: Aktuell in Entwicklung befindliche Systemgeneration, welche als nächstes in

den Markt eintritt. Dabei bezeichnet i die Nummer der Entwicklungsgeneration. Somit ist $G_{i=1}$ die erste Systemgeneration, welche keine direkte Vorgängergeneration besitzt und $G_{i=n+1}$ die übernächste Systemgeneration. $\dot{U}S_n \cup AS_n \cup PS_n$: Menge der Teilsysteme, die durch Übernahmeveränderung ($\dot{U}S_n$), Ausprägungsvariation (AS_n), Prinzipvariation (PS_n) entwickelt werden.

Ausgehend von Formel 2.1 können Variationsanteile berechnet werden. Diese beschreiben den Anteil der Teilsysteme einer bestimmten Variationsart an der Gesamtheit der in Entwicklung befindlichen Teilsysteme der Systemgeneration. So gilt beispielhaft für den Übernahmeveränderungsanteil $\delta_{\dot{U}V}$ (Albers et al., 2015):

$$\delta_{\dot{U}V} = \frac{|\dot{U}S_n|}{|G_n|} \quad 2.2$$

2.1.6 Frühe Phase der SGE

Zu Beginn von Produktentwicklungsprozessen gibt es eine Phase, die durch besondere Herausforderungen und Eigenschaften gekennzeichnet ist. Während sich Details verschiedener Ansätze unterscheiden (Bursac 2016, S. 44), lassen sich eine hohe Unsicherheit und ein hoher Grad der Beeinflussbarkeit als Gemeinsamkeiten festhalten. Albers et al. (2017) definieren die Frühe Phase der PGE wie folgt:

Definition Frühe Phase der PGE

„Die Frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elemente abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen sowie des technischen und ökonomischen Risikos.“
(Albers et al., 2017, S. 4)

Herauszustellen ist, dass die Bewertung der technischen Lösung hinsichtlich Produzierbarkeit und notwendiger Ressourcen damit nach Albers Teil der Frühen

Phase der PGE ist. Solch eine Bewertung kann durch verschiedene Cost Engineering Aktivitäten (Abschnitt 2.2) wie z. B. Herstellkostenschätzungen erfolgen. Das Verständnis der Frühen Phase der PGE wird analog zu dem Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers (Abschnitt 2.1.5) auf Systemgenerationen und damit die Frühe Phase der PGE auf die Frühe Phase der SGE übertragen.

In dieser Arbeit wird für eine präzise Analyse zwischen der *Frühen Phase der SGE nach Albers et al.* (2017) und den allgemeinen *frühen Phasen der Produktentwicklung* unterschieden. Die *Frühe Phase der SGE* wird in der Karlsruher Schule der Produktentwicklung (KaSPro) einheitlich nach präziser Definition (siehe oben) verwendet. Außerhalb der KaSPro existieren verschiedene, zum Teil nicht eindeutig definierte und voneinander abweichende Auffassungen. Diese werden in dieser Arbeit als *frühe Phasen der Produktentwicklung* beschrieben, um die Intention der zitierten Autoren und gleichzeitig die potenzielle Abweichung von der *Frühen Phase der SGE* herauszustellen.

Ehrlenspiel und Meerkamm (2013, S. 668) beschreiben einen qualitativen Zusammenhang zwischen der Möglichkeit Kosten beeinflussen zu können und Kosten beurteilen zu können. So werden in den frühen Phasen der Produktentwicklung Entscheidungen getroffen, die die Kosten maßgeblich beeinflussen, während die Vorhersage der resultierenden Kosten mit großer Unsicherheit behaftet ist (Abbildung 2.7).

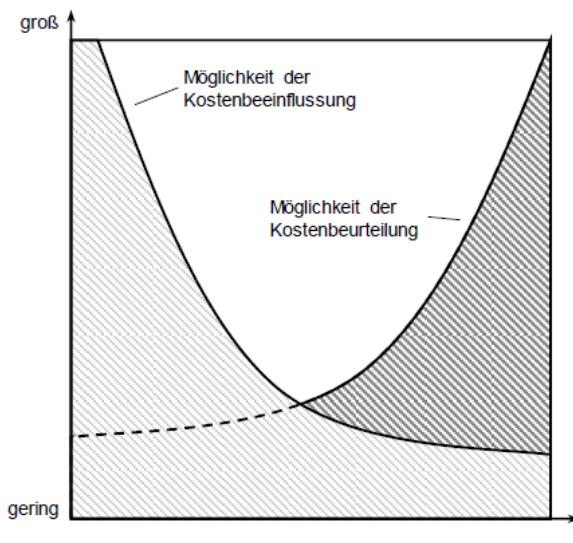


Abbildung 2.7: Möglichkeit der Kostenbeeinflussung und Kostenbeurteilung im Produktentwicklungsprozess aus Reinemann (2021, S. 59) nach Ehrlenspiel und Meerkamm (2013, S. 668).

Zu einem ähnlichen Schluss kommt die VDI-Richtlinie 2235, welche 70 % der Kosten als in der Designphase festgelegt sieht, während diese erst später in der Produktion oder als Materialkosten anfallen. Auch hier wird eine große Verantwortung bei der Produktentwicklung gesehen, da in den frühen Phasen der Produktentwicklung die späteren Produktkosten maßgeblich beeinflusst werden (Abbildung 2.8). Die in Abbildung 2.8 verwendete Formulierung „Entwicklung [und] Konstruktion“ umfasst in der Praxis mehr Arbeitsumfänge, als die Frühe Phase der SGE (siehe Definition unten), welche bereits mit der bewerteten technischen Lösung endet.

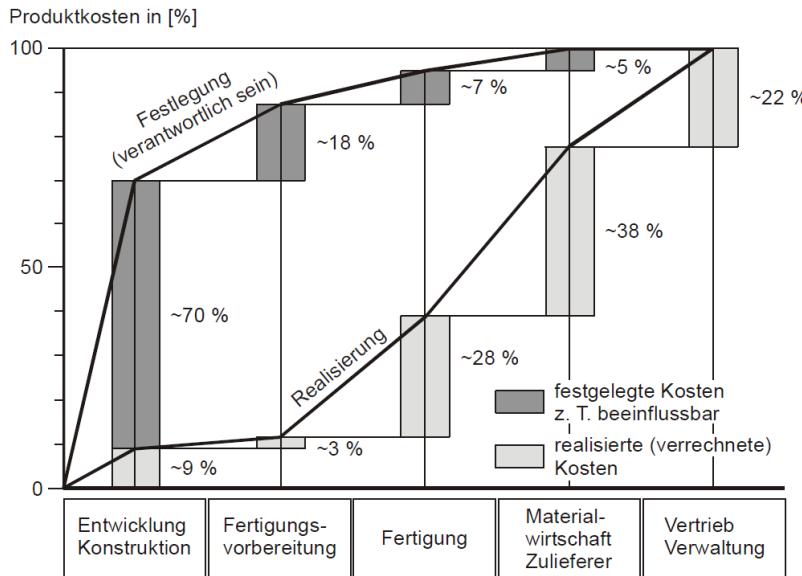


Abbildung 2.8: Kostenfestlegung und Realisierung in unterschiedlichen Unternehmensbereichen nach (VDI-Richtlinie 2235) aus Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann und Mörtl (2014, S. 15).

Ein verbreiteter, praxisnäherer Ansatz ist die *Rule of Ten*, welche eine Verzehnfachung von Änderungskosten für jeden Phasenfortschritt voraussagt: Z. B. eine technische Änderung, die 1 € in der Aufgabenklärung, 10 € in der Design Phase, 100 € in der Fertigungsvorbereitung, 1.000 € in der Fertigung und 10.000 € nach Auslieferung kostet. Auch wenn die *Rule of Ten* eine starke Vereinfachung darstellt, wird die Grundaussage des exponentiellen Wachstums der Änderungskosten über den Produktlebenszyklus deutlich. Bestärkt wird der Ansatz durch die Verbreitung in der Praxis. (Ehrlenspiel, Kiewert, Lindemann & Hundal, 2007)

2.1.7 Produkt-Produktions-CoDesign

Bereits in der Entwicklung von Produkten und Systemen ist die Gestaltung des Produktionssystems notwendig. Nachhaltigkeit, Remanufacturing, Losgröße 1 und Individualisierung sind Beispiele von Potenzialen an der Schnittstelle zwischen Produkt und Produktionssystem (Albers, Rapp, Klippert, Lanza & Schäfer, 2022). Die dafür notwendige Zusammenarbeit der Personen aus Produktentwicklung und

Produktion wird durch den Ansatz des Produkt-Produktions-CoDesigns unterstützt. Albers, Lanza et al. (2022) definieren das Produkt-Produktions-CoDesign wie folgt:

Definition Produkt-Produktions-CoDesign (PPCD)

„Produkt-Produktions-CoDesign ist die hoch vernetzte und parallelisierte Entstehung, d.h. Planung, Entwicklung und Realisierung von Produkten und dem zugehörigen Produktionssystem bis hin zum effizienten und effektiven Betrieb der Produktion und der Gestaltung zugehöriger Geschäftsmodelle sowie der strukturierten Außerbetriebnahme der Produkte und Produktionssysteme [1]. Die Planung erfolgt dabei zwingend über mehrere Produktgenerationen und die zugehörige Produktionssystemevolution hinweg.“

(Albers, Lanza et al., 2022, S. 169)

Ein wichtiger Aspekt im Produkt-Produktions-CoDesign ist der domänenübergreifende Wissenstransfer (Klippert, Preißner, Rust & Albers, 2022). Der Transfer von Wissen, Informationen und Daten aus der Produktion und Produktionssystementwicklung in die Produktgenerationsentwicklung und die effiziente Kommunikation von Entscheidungen und Informationen aus der Produktentwicklung zurück sind von großer Bedeutung. Dieser Austausch ist nicht nur innerhalb einer Produktgeneration, sondern auch über Produktgenerationen hinweg erstrebenswert (Abbildung 2.9). Für einen effizienten Austausch und konsequente Wiederverwendung ist das Formalisieren und Explizieren von Wissen notwendig. Aktuell befinden sich Wissen und Informationen häufig nur in der Produktentwicklung oder in der Produktion. Unstrukturierte, nicht maschinenlesbare Daten, erschweren den Austausch (Hellweg & Behrendt, 2021). Zusätzlich muss die Entwicklung an den Marktbedürfnissen orientiert sein (Abbildung 2.9). Ebenso zu beachten ist das Zusammenspiel zwischen Produktgenerationen und Produktionssystemevolutionen, die sich unter gegenseitiger Abhängigkeit weiterentwickeln. Bei beiden ist zudem ein Ausrichten nicht nur auf aktuelle, sondern auch auf zukünftige Kundenbedürfnisse notwendig (Albers, Lanza et al., 2022).

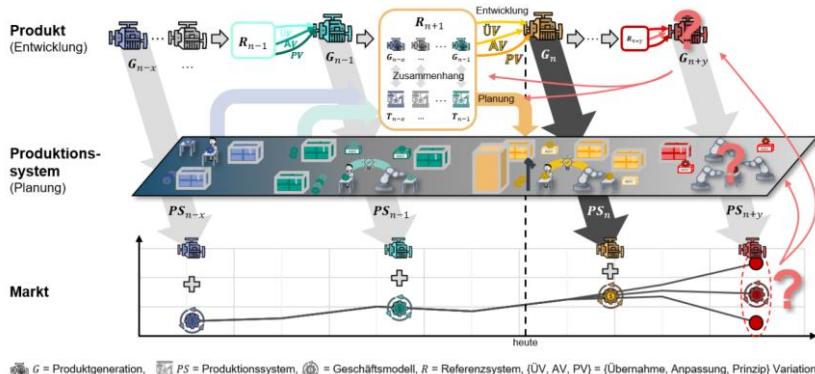


Abbildung 2.9: Grundlegende Aspekte des Produkt-Produktions-CoDesigns nach Albers und Lanza et al. (2022). Aus Albers und Rapp et al. (2022, S. 3).

2.1.8 Zwischenfazit

Produkte und Produktionssysteme werden in Generationen entwickelt. Dabei dienen nicht nur Vorgängergenerationen, sondern auch Forschungsprojekte oder Wettbewerbsprodukte als Referenzsystemelemente. Die (Wieder-)Verwendung von Referenzsystemelementen kann die Effizienz in der Produktentwicklung, z. B. durch eingesparte, bereits für eine ähnliche Komponente durchgeführte Arbeitsschritte, steigern. Unstrukturierte Daten und nicht expliziertes Wissen erschweren jedoch den Wissenstransfer und ein effizientes Identifizieren und Nutzen von Referenzsystemelementen. Insbesondere in der Frühen Phase der SGE ist die Unsicherheit und die Beeinflussbarkeit z. B. von Kosten hoch. Eine wichtige Rolle bei der fertigungs- und kostenspezifischen Bewertung spielt das Cost Engineering, welches im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

2.2 Cost Engineering basierend auf dem Gestalt-Funktion-Zusammenhang

Als Antwort auf steigenden Kostendruck und schwierige Marktsituationen (Abschnitt 1.1) gestalten Unternehmen und Organisationen aktiv ihre Kosten. Hieraus ist die Disziplin des Cost Engineering hervorgegangen. In diesem Abschnitt werden zunächst kostenbezogene Begriffe wie Cost Engineering (Abschnitt 2.2.1) und Herstellkostenschätzung (Abschnitt 2.2.2) eingeführt. Es folgt eine Beschreibung

von fallbasierten (Abschnitt 2.2.3) und betriebsbezogenen Methoden (Abschnitt 2.2.4) zur Herstellkostenschätzung, sowie ein Abschnitt zur Planung von Prozessketten (Abschnitt 0) als fertigungstechnische Grundlage dazu. Die geometrische Produktspezifikation (Abschnitt 2.2.6) leitet über zur Produktmodellbeschreibung, welche durch das Advanced Systems Engineering (Abschnitt 2.2.7) und die Beschreibung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit dem C&C²-Ansatz (Abschnitt 2.2.8) fortgeführt wird. Ein Zwischenfazit (Abschnitt 2.2.9) schließt den Abschnitt ab.

2.2.1 Der Begriff Cost Engineering

Der Begriff Cost Engineering kann nach Greves und Jourmier (2003) von der European Space Agency (ESA) wie folgt definiert werden:

Definition Cost Engineering

„Die Disziplin des 'Cost Engineering' kann als ein breites Spektrum kostenbezogener Aspekte des Ingenieurwesens und des Programmanagements betrachtet werden, insbesondere aber Kostenschätzung, Kostenanalyse/Kostenbewertung, Design-to-Cost, Terminanalyse/Planung und Risikobewertung. Dies sind grundlegende Aufgaben, die von verschiedenen Gruppen in verschiedenen Organisationen durchgeführt werden können, aber der Begriff Cost Engineering impliziert, dass sie während des gesamten Projektlebenszyklus von geschulten Fachleuten durchgeführt werden, die geeignete Techniken, Kostenmodelle, Werkzeuge und Datenbanken auf rigorose Art und Weise verwenden und ein Expertenurteil unter Berücksichtigung der spezifischen Umstände der Aktivität und der verfügbaren Informationen anwenden. In den meisten Fällen ist das Ergebnis einer Kostenanalyse kein Selbstzweck, sondern ein Beitrag zu einem Entscheidungsfindungsprozess.“
(Übersetzt)
(Greves & Jourmier, 2003, S. 71)

Eine Beschreibung der historischen Entwicklung des Cost Engineerings mit Beginn im 19. Jahrhundert geben Mörtl und Schmied (2015). Mehr als zwei Drittel der Veröffentlichungen mit dem Term *Cost Engineering* sind in der Domäne *Maschinenbau* (engl. *mechanical engineering*) publiziert worden, was auf die große Korrelation der beiden Themen hinweist (Mörtl & Schmied, 2015). Von großer Bedeutung im Maschinenbau ist die Kostenschätzung als Grundlage für weitere kostenbezogene Maßnahmen. Mörtl und Schmied (2015) definieren Kostenschätzung (engl. *cost estimation*) kurz als:

Definition Kostenschätzung

„[Kostenschätzung ist die] Vorausschau von Kosten“ (Übersetzt)
(Mörtl & Schmied, 2015, S. 383)

Der Begriff Kostenschätzung wird häufig bedeutungsgleich mit Kostenkalkulation verwendet. In dieser Arbeit wird aufgrund der bestehenden Unsicherheit auch eine Kalkulation von zukünftigen Herstellkosten als Herstellkostenschätzung und nicht als Herstellkostenkalkulation bezeichnet. Dies erfolgt analog mit initialer Differenzierung oder implizit unter anderem auch bei Niazi, Dai, Balabani und Seneviratne (2006), Mörtl und Schmied (2015) und Y. Xu et al. (2012).

Kosten besitzen nach Horsch (2018) vier Eigenschaften:

1. Kosten haben eine Währung als Einheit, z. B. Euro (€) und stellen eine Wertgröße dar.
2. Kosten entstehen durch einen betrieblichen Verbrauch von Produktionsfaktoren, wozu eine Verbrauchsmenge erhoben werden muss.
3. Kosten als Wertgröße entstehen durch die Bewertung einer Verbrauchsmenge mit einem Preis.
4. Kosten beziehen sich auf eine bestimmte Periode.

Herstellkosten sind spezifische Kosten, die Ehrlenspiel et al. (2014) wie folgt definiert:

Definition Herstellkosten

„Die Herstellkosten sind die Summe aus Material- und Fertigungskosten.“
(Ehrlenspiel et al., 2014, S. 431)

Die Materialkosten beinhalten dabei sowohl Materialeinzelkosten, die sich direkt auf verbrauchte Materialmengen für ein Produkt zurückführen lassen, als auch Materialgemeinkosten, die verbrauchte Materialmengen auf verschiedene Produkte umlegen. Die für eine Welle gekaufte Stahlstange ist ein Beispiel für Materialeinzelkosten, während die Kosten für die Wareneingangskontrolle den Materialgemeinkosten zugeordnet werden. Die Fertigungskosten sind dabei die in der Fertigung anfallenden Kosten. In der Praxis werden Herstellkosten oft auch als *HK1* bezeichnet. *HK2* werden dann durch die Summe aus *HK1* und Entwicklungs- und Konstruktionskosten berechnet. (Ehrlenspiel et al., 2014)

2.2.2 Herstellkostenschätzung

Die Herstellkostenschätzung benötigt ein tiefgreifendes Verständnis von Gestalt-Fertigung-Zusammenhängen. Dieses Wissen ist aktuell in der Regel personengebundenes Erfahrungswissen (Lundgren, Hedlind & Kjellberg, 2014). Kosteningenieurinnen und Kosteningenieure sind Personen, die im Cost Engineering arbeiten und häufig das oben genannte personengebundene Erfahrungswissen besitzen. Dieses ist als implizites Wissen zu klassifizieren, welches mit Austreten der Erfahrungsträger aus Unternehmen nicht erhalten bleibt (Dienes & Perner, 1999). Darüber hinaus ist die Herstellkostenschätzung eine zeitaufwändige Tätigkeit. Mit zunehmendem Angebot an Fertigungstechnologien wird es zudem schwieriger als Individuum einen Überblick z. B. über Fertigbarkeitszusammenhänge zu behalten (Leo Kumar, 2019).

Niazi et al. (2006) geben eine Übersicht über Methoden der Kostenschätzung (Abbildung 2.10), von denen viele auch für die Herstellkostenschätzung eingesetzt werden.

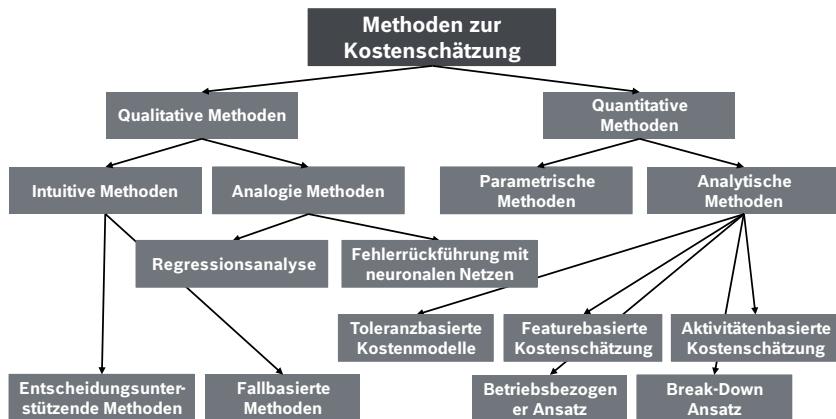


Abbildung 2.10: Klassifizierung von Methoden zur Kostenschätzung. Übersetzte Darstellung aus Niazi et al. (2006, S. 569).

Aufgrund der großen Bedeutung in der unternehmensinternen Kostenschätzung wird in dieser Arbeit auf die fallbasierte (engl. case-based) und die betriebsbezogene (engl. operation-based) Herstellkostenschätzung von Komponenten fokussiert. Die Methoden lassen sich aufgrund von Überschneidungen und Kombinationen jedoch nicht immer klar voneinander abgrenzen.

Da große Teile der Kosten bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung festgelegt werden (Abschnitt 2.1.6), sollten auch Herstellkostenschätzungen bereits in diesen Phasen durchgeführt werden (VDI-Richtlinie 2235). In der frühzeitigen Kostenschätzung liegt eine Stärke der fallbasierten, qualitativen Kostenschätzungsmethoden, bei denen, über einen Vergleich zu vorherigen Komponenten und deren Kosten abgeschätzt wird (Niazi et al., 2006). Im Sinne des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (Abschnitt 2.1.2) können bei der fallbasierten Herstellkostenschätzung Kosteninformationen der Referenzsystemelemente oder auch früherer Produktgenerationen gezielt genutzt werden. So können z. B. die Elemente variiert werden, bei denen Kostenpotentiale identifiziert wurden. Eine Schwäche der fallbasierten Herstellkostenschätzung ist jedoch die oftmals geringe Kalkulationstiefe, die zu geringer Transparenz und zu hohen Abweichungen führt (Niazi et al., 2006).

2.2.3 Fallbasierte Methoden

Fallbasierte Methoden (Case-Based Methods, Case Based Reasoning, CBR) werden von Niazi et al. (2006) den intuitiven Kostenschätzungsmethoden zugeordnet. Bei den intuitiven Methoden werden Erfahrungen aus der Vergangenheit zusammen mit Expertenwissen genutzt, um Kosten von Bauteilen oder Baugruppen abzuleiten. Fallbasierte Methoden nutzen dabei Referenzsystemelemente im Sinne des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers. So z. B. Informationen existierender Produkte oder Produktdokumentationen, die im Rahmen der Variation an das in Entwicklung befindliche Produkt angepasst und mit weiteren Informationen angereichert werden. Abbildung 2.11 zeigt den Ablauf eines fallbasierten Ansatzes. Das Ähnlichkeitsmaß kann bei fallbasierten Methoden auf verschiedenen Wegen ermittelt werden. Vorteil der fallbasierten Methode ist die Reduzierung des Zeitaufwandes durch Übernahmeanteile aus vorherigen Kostenkalkulationen. Eine Herausforderung ist das große notwendige Expertenwissen, welches für die manuelle Auswahl geeigneter Referenzsystemelemente im Sinne des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung und die Anpassung an das aktuelle Produkt notwendig ist. Zusätzlich müssen Informationen zu ähnlichen Produkten verfügbar sein. (Niazi et al., 2006)

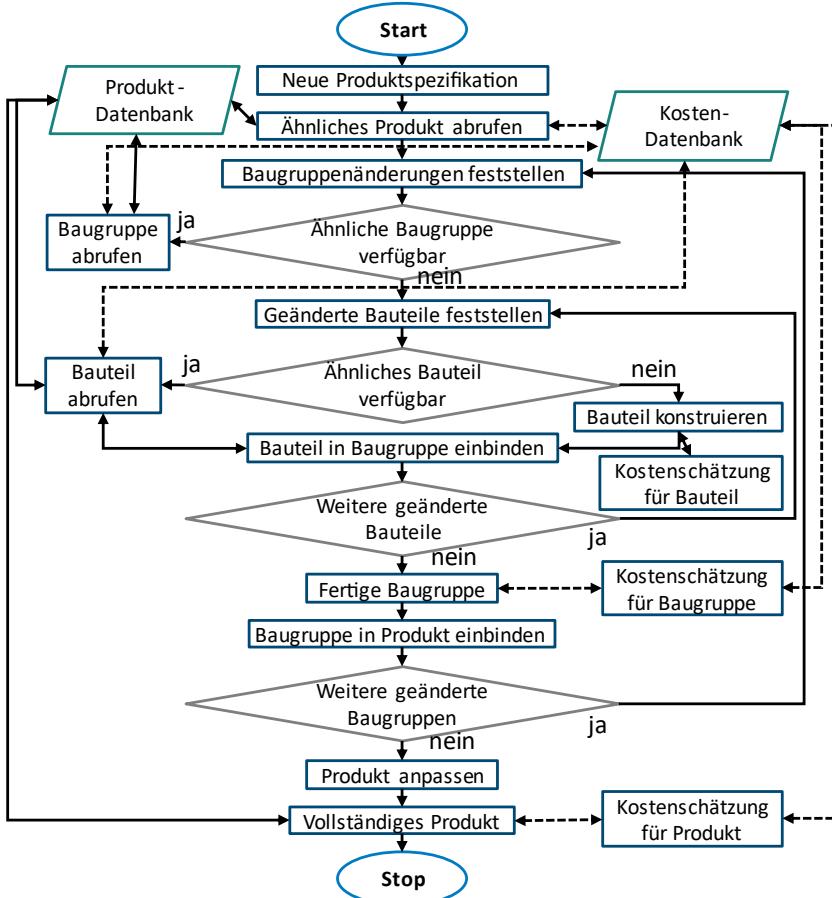


Abbildung 2.11: Ablaufdiagramm eines fallbasierten Ansatzes zur Kostenschätzung. Übersetzte Abbildung aus Niazi et al. (2006, S. 565).

Bender et al. (2020, S. 10) stellen Mathematische Ähnlichkeitsbeziehungen als Grundlage vor. Der Stufensprung φ_{HK} stellt das Verhältnis der gesuchten Herstellkosten HK_q zu den bekannten Herstellkosten HK_0 dar (Formel 2.3). Die Herstellkosten ergeben sich jeweils aus den Materialkosten MK addiert mit der Summe der Fertigungskosten FK .

$$\varphi_{HK} = \frac{HK_q}{HK_0} = \frac{MK_q + \sum FK_q}{MK_0 + \sum FK_0} \quad 2.3$$

Dabei können Einflüsse technologiespezifischer Kostensprünge $\varphi_{FK,k}$ über die Gewichtung einzelner Prozessschritte a_k und materialspezifischer Kostensprünge φ_{MK} über die Gewichtung einzelner Materialanteile a_m auf den Stufensprung φ_{HK} anhand der bekannten Komponente ermittelt werden (Formel 2.4).

$$\varphi_{HK} = a_m * \varphi_{MK} + \sum_k a_k * \varphi_{FK,k} \quad 2.4$$

Einfache geometrische Abhängigkeiten, wie charakteristische Längenänderungen lassen sich über das Verhältnis einer charakteristischen Größe φ_L berechnen (Formel 2.5). Diese werden abhängig von Technologien mit verschiedenen Exponenten x_i versehen, um die geometrische Abhängigkeit besser abbilden zu können. Dafür werden Tabellenwerte z. B. Tabelle 2.1 verwendet.

$$\varphi_{HK} = \sum_i a_i * \varphi_L^{x_i}; \varphi_L = \frac{L_q}{L_0} \quad 2.5$$

Tabelle 2.1: Auswahl beispielhafter Exponenten x_i zur Berücksichtigung geometrischer Ähnlichkeit in Formel 2.5 nach Ehrlenspiel et al. (2014, S. 482).

Maschinentyp	Verfahren	Exponent gerundet	Treffsicherheit
Universaldrehmaschine	Außendrehen Gewinde drehen	2 1	gut mittel
Kreissäge	Profile sägen	2	gering
Glühen	Glühen	3	gut

Qian und Ben-Arieh (2008) stellen eine Methode vor, die parametrische Kostenmodelle und aktivitätenbasierte Kostenschätzung kombiniert. Der Unterschied zwischen betriebsbezogener und aktivitätenbasierter Kostenschätzung ist dabei sehr gering. Es wird sowohl die Entwicklungsphase als auch die Herstellung bewertet.

Die Entwicklungsphase wird dabei mit IDEF0-Diagrammen modelliert. IDEF0 ist eine Modellierungsmethodik für funktionale Modellierung (Buede, 2016). Aufbauend auf Analysen der Entwicklungsaktivitäten werden parametrische Kostenmodelle gebildet. Dabei wird festgestellt, dass Kostenmodelle mit großer Genauigkeit mehr Informationen, die zum Teil erst in späteren Entwicklungsphasen festgelegt werden, benötigen. Für die Kostenmodelle werden unter anderem die Art von Features, die Länge, der Durchmesser und die Anzahl verschiedener Features verwendet (Abbildung 2.12). Als Feature verstehen Qian und Ben-Arieh (2008) den Zusammenhang zwischen einer einfachen geometrischen Abbildung und der technischen Anwendung, wie z. B. einem Rundloch und dessen Kosten. Die Kostenmodelle beeinhalten aktivitätenbasierte Kostentreiber, die über Kostenfaktoren und spezifische kostentreibende Eigenschaften, wie Bearbeitungszeit oder die Bauteillänge berechnet werden. Die Kostenmodelle werden für Kostenschätzungen und als Entscheidungsunterstützung, z. B. bei der Lieferantenauswahl verwendet (Ben-Arieh & Qian, 2003). In der Studie werden lediglich rotationssymmetrische Drehteile verwendet, es wird jedoch eine Übertragbarkeit auf andere Bauteile gesehen.

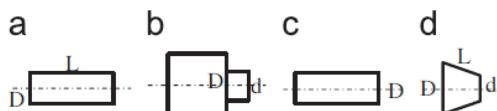


Abbildung 2.12: Verwendete rotationssymmetrische Features aus Qian und Ben-Arieh (2008, S. 814).

Weustink, Brinke, Streppel und Kals (2000) schlagen vor, Kostenschätzungen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung durchzuführen. Dafür stellen sie ein generisches Framework vor, welches die Produktstruktur als Kombination von Elementen und deren Beziehungen untereinander beschreibt. Auf dieser Ebene werden vorhandene Kosteninformationen mit den entsprechenden Elementen verknüpft. Abbildung 2.13 zeigt, wie Kosteninformationen in eine Produktstruktur integriert werden können. Die Kosten von Elementen werden aus der Summe der Kostenattribute berechnet und die Produktkosten durch die Aufsummierung der Kosten aller benötigter Elemente.

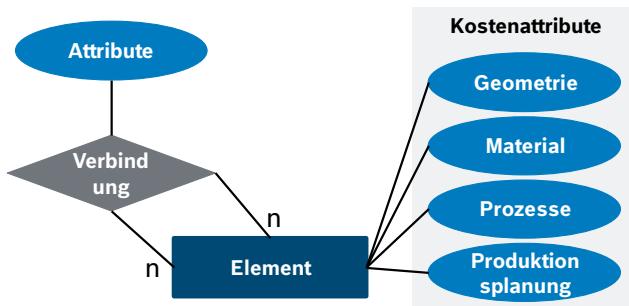


Abbildung 2.13: Generisches Framework zur Beschreibung der Produktstruktur und Verknüpfung mit Kosteninformationen. Übersetzte Darstellung aus Weustink et al. (2000, S. 143).

Ficko, Drstvenšek, Brezočnik, Balič und Vaupotic (2005) stellen ein fallbasiertes Konzept zur Herstellkostenschätzung von Stanzwerkzeugen vor. Es unterstützt bei der Erstellung von Angeboten für Werkzeuge, basierend auf dem CAD-Modell des eigentlichen Produktes. Ein System wurde entwickelt und im Unternehmen getestet. Erstellte Kostenschätzungen besitzen eine Ungenauigkeit, die ähnlich der von Expertenschätzungen ist. Erwähnt wird, dass das Produktionssystem und die eigentliche Herstellung Zufälle hervorrufen, welche nicht vorhergesagt werden können. Eine Abweichung ist somit auch bei einer optimalen Kostenschätzung zu erwarten. Notwendig für eine akzeptable Kostenschätzung ist grundsätzlich die Verfügbarkeit von ausreichenden und passenden Datensätzen.

Khosravani und Nasiri (2020) beschreiben eine Unterstützung für Personen, die mit Spritzgussmaschinen arbeiten. Sie wenden fallbasiertes Schließen (engl. case-based reasoning) an, um basierend auf ähnlichen Bauteilen aus der Vergangenheit die Fertigung zu verbessern. Fallbasiertes Schließen ist ein maschinelles Lernverfahren, welches Wissen über bereits gelöste Probleme speichert und darauf aufbauend versucht Probleme zu lösen. Der Fokus von Khosravani und Nasiri (2020) liegt dabei auf der Identifikation geeigneter ähnlicher Bauteile im Spritzguss. Es werden ausführlich Ähnlichkeitsmaße von Anwendungen des fallbasierten Schließens im Spritzguss beschrieben. Eine Herausforderung für fertigende Unternehmen ist dabei das notwendige tiefgreifende Verständnis des betrachteten Prozesses. Ein Vorteil des fallbasierten Schließens ist, dass Wissen aus verschiedenen Phasen der Produktentstehung, wie Fertigung und Fehleranalyse, in den Entwicklungsprozess einfließen kann. Kostenschätzungen werden von den Autoren nicht durchgeführt, jedoch als zukünftiges Anwendungsfeld mit großem Potential genannt.

2.2.4 Betriebsbezogene Methoden

Die betriebsbezogenen Methoden (Operation-based Methods) gehören zu den analytischen Kostenschätzungsmethoden, die Produkte in Bestandteile zerlegen und notwendige Aktivitäten und Operationen in der Herstellung aufstellen. Am Ende wird in der Regel eine Summe der Elemente gebildet. (Niazi et al., 2006)

Betriebsbezogene Herstellkostenschätzungen basieren in der Regel auf Zeitabschätzungen aus der Fertigung und damit verbundenen Kostenfaktoren. So schlägt Jung (2002) eine Berechnung der Herstellkosten basierend auf Rüstzeit T_{su} , Betriebszeit T_{ot} und Stillstandszeit T_{no} kombiniert mit Maschinenstundensätzen R_m und Personalstundensätzen R_o vor (Formel 2.6 aus Niazi et al. (2006, S. 568)). Die Materialkosten MK und die Werkverwaltungskosten WVK werden zusätzlich addiert. Der hohe Detailgrad macht die Anwendung jedoch aufwändig und benötigt detaillierte Produkt-, Fertigungs- und Kosteninformationen (Horsch, 2018). Deshalb werden betriebsbezogene Herstellkostenschätzungen meist in späten Entwicklungsphasen eingesetzt. Sie haben dafür Stärken bei der Kalkulationstiefe, Genauigkeit und Transparenz.

$$HK = (R_o + R_m) \left[\frac{T_{su}}{\text{Losgröße}} * T_{ot} + T_{no} \right] + MK + WVK \quad 2.6$$

Feng, Kusiak und Huang (1996) präsentieren ein diagrammbasiertes mathematisches Modell, das Geometrieelemente wie Zylinder, Blöcke, Fasen, Flächen und Bohrungen sowie deren Beziehung zueinander verwendet. Ein Algorithmus schätzt dann die minimalen Kosten unter Verwendung der Bearbeitungszeiten und des Bearbeitungsaufwands. Es wurden Kostenmodelle für vier typische Bauteilarten entwickelt. Toleranzen und die Reihenfolge der Bearbeitung werden nicht betrachtet.

Gupta, Nau, Regli und Zhang (1994) beschreiben eine Methode für die Analyse von Herstellbarkeitsaspekten von Bauteilen in der Produktentwicklung. Ausgehend vom CAD werden verschiedene Arbeitspläne generiert. Dabei dienen Features als Basis für die Analyse von Prozessfähigkeiten. Am Ende wird eine Taktzeit resultierend aus Schnittzeit und Passivzeit berechnet und ein Vorgehen für das Ableiten von Bearbeitungskosten vorgeschlagen.

Kiritsis, Neuendorf und Xirouchakis (1999) stellen zwei Petri-Netz-basierte Ansätze für die Planung von Technologieketten vor. Petri Netze sind diskrete Ereignissystemmodelle (Cabasino, Giua & Seatzu, 2013, S. 191). Im ersten Ansatz

wird ein Technologieketten Planungstool entwickelt, welches Maschinen und Werkzeuge abbilden kann. Damit wird dann unter mehreren möglichen Pfaden nach dem minimal gewichteten Pfad gesucht. Der zweite Ansatz modelliert Arbeitsschritte, Maschinen, Rüsten und Werkzeugwechsel als Übergänge im Petri Netz. Durch einen Algorithmus ist es ad-hoc möglich optimale Technologieketten zu berechnen, ohne vorher verschiedene Pfade aufzustellen. Während der erste Ansatz einfacher anzuwenden ist, zeigt der zweite Ansatz einen Vorteil in der Zeiteffizienz.

Budiono und Lassandy (2018) vergleichen die featurebasierte Kostenschätzung (Featured Based) mit der aktivitätenbasierten Kostenschätzung (Operation Based Approach) und dem Break-Down Ansatz (Breakdown Approach). Dies wird am Beispiel von Implantat Miniplatten (Abbildung 2.14) durchgeführt.



Abbildung 2.14: Beispielhafte Anwendung einer Implantat Miniplatte bei Knochenbruch aus Stryker GmbH (2020, S. 22).

In Abbildung 2.15 werden die Kosten des Fertigungsschrittes Außenprofilformung (Outside profile forming) einer Implantat Miniplatte im Detailgrad der unterschiedlichen Kostenschätzungsmethoden dargestellt. Dabei nimmt der Detailgrad und damit die Nachvollziehbarkeit von Feature Based (ein Kostenelement), über Operation Based (drei Kostenelemente) zu Breakdown Approach (neun Kostenelemente) zu.

Featured Based		Operation Based Approach		Breakdown Approach	
Process	Cost (IDR)	Process	Cost (IDR)	Item	Cost (IDR)
Outside profile forming	19278,36	Set Up	7304,17	Set Tool	1666,67
				Set Workpiece	4766,67
				Programming	870,83
		Operational	8290,85	Operator	2050
				Material	1277,84
				Overhead	1355,01
				Energy	943
				Tool	2665
		Unloading	3683,3	Release Workpiece	3683,33

Abbildung 2.15: Vergleich der drei quantitativen Methoden zur Kostenschätzung: featurebasiert (Feature Based), aktivitätenbasiert (Operation Based) und Break-Down (Breakdown) am Beispiel der Außenprofilformung von Implantat Miniplatten aus Budiono und Lassandy (2018, S. 3)

Stockton, Khalil und Mukhongo (2013b) stellen einen Prozess für die Erzeugung von Daten für die Kostenmodellentwicklung vor. Die Daten werden dabei mit virtuellen Prozessmodellen erzeugt. Historische Daten haben gegenüber erzeugten Daten Nachteile. So können historische Daten ein Bias haben und sind häufig nicht in ausreichender Menge verfügbar. Trotz künstlich erzeugter Daten ist ein großer manueller Aufwand notwendig, um iterativ mit Identifikation, Sammlung und Analyse geeignete Kostenmodelle zu entwickeln. Allgemein wird festgehalten, dass der Data Mining Prozess unberechenbar und unvorhersehbar ist. Die Schätzgenauigkeit hängt unter anderem von der Modellarchitektur ab. Es werden gute, aber auch schlechte Schätzgenauigkeiten in einer Studie erreicht. Gleichzeitig wird ein großes Maß an Fertigungswissen und Erfahrung für die Erstellung von Kostenmodellen benötigt, um einen Modellierungserfolg zu erreichen. (Stockton et al., 2013b; Stockton, Khalil & Mukhongo, 2013a)

Frank Bodendorf, Merkl und Franke (2021) und Frank Bodendorf, Dehmel und Franke (2022) geben einen Überblick über datenbasierte Ansätze der Kostenschätzung. Künstliche Neuronale Netze werden am häufigsten verwendet, vor Regressionsalgorithmen und Support Vektor Maschinen. Eine große Herausforderung bei der Verwendung von datenbasierten Ansätzen ist der

potenzielle *Blackbox-Charakter*. So sind mit Algorithmen des Maschinellen Lernens erzeugte Kostenschätzungen in der Regel nicht nachvollziehbar und die dahinterstehenden Modelle nicht interpretierbar (Y. F. Zhang, Fuh & Chan, 1996; SMITH & MASON, 1997; Verlinden, Duflou, Collin & Cattrysse, 2008). Insbesondere bei Preisverhandlungen schwächt dies die Verhandlungsposition (Frank Bodendorf et al., 2021). Eine andere Herausforderung ist die Verfügbarkeit von geeigneten Trainingsdaten. Sowohl die Quantität als auch die Qualität verfügbarer Daten ist gering. Dies macht die Verbesserung der Datenverfügbarkeit in der Zukunft zu einer wichtigen Aufgabe (Lutz, Bodendorf, Stepanek & Franke, 2021).

2.2.5 Strategische Planung von Technologieketten

Analog zu Computer-aided Design (CAD) und Computer-aided Engineering (CAE) existiert die Anwendung von Informationstechnik im Feld der Prozesskettenplanung. Über dieses Feld des Computer-aided Process Planning (CAPP) gibt Leo Kumar (2019) einen Überblick.

In der Frühen Phase der SGE stehen die später verwendeten Fertigungstechnologien nur selten fest. Vielmehr gibt es verschiedene mögliche Kombinationen. So lässt sich ein Loch z. B. bohren, erodieren oder direkt im umformenden oder einem umformenden Prozess herstellen.

Die Fertigungstechnologien sind jedoch eine wichtige Grundlage für Herstellkostenschätzungen (Boothroyd, 1994). Meistens geschieht das Ableiten von Fertigungstechnologien erfahrungsbasiert (Lundgren et al., 2014). Bei qualitativen Methoden wie der fallbasierten Methode, kann eine Abschätzung der Prozesskette relevant für die Wahl eines passenden ähnlichen Bauteils sein. Zwei Hülsen mit der gleichen Geometrie können bei unterschiedlichen Stückzahlen entweder fließ gepresst oder gedreht werden. Dies hat einen großen Einfluss auf die Herstellkosten und sollte bei der Wahl einer passenden Referenz beachtet werden. Auch bei quantitativen Methoden wie der betriebsbezogenen Methode ist die Prozesskette relevant, da sich je nach Fertigungstechnologie unterschiedliche Maschinenstundensätze und Mitarbeiterallokationen ergeben.

Eine Reihe von Arbeiten versucht Technologieketten, Prozessketten und Fertigungsfolgen strategisch vom Bauteil und dessen Geometrie abzuleiten. Eine Auswahl relevanter Arbeiten wird im Folgenden vorgestellt. Technologieketten sind dabei der Ausgangspunkt für das Ableiten von Prozessketten und Fertigungsfolgen. Sie sind betriebsmittelunabhängig, berücksichtigen jedoch Abhängigkeiten der Technologien untereinander. *Prozessketten* (auch *Prozessfolgen*) stellen eine fertigungsmittelbezogene Betrachtungsweise dar, bei der Fertigungsanlagen im

Mittelpunkt stehen. Fertigungsfolgen ordnen den Fertigungsprozessen nicht-wertschöpfende Schritte, wie Transport und Lagerung zu. (Fallböhmer, 2000)

Dieses mehrstufige Vorgehen wird in Abbildung 2.16 dargestellt. Die Verkettung der einzelnen Fertigungsprozesse und die prozessspezifischen Betriebsmittel, wie direkt allokiertes Personal und Maschinen, stehen bei der Herstellkostenschätzung und damit auch in dieser Arbeit im Fokus. Nicht-wertschöpfende Schritte werden in den frühen Phasen der Produktentwicklung meist durch Zuschläge oder Grobschätzungen abgebildet. Damit sind die ersten beiden Stufen des Prozesses von besonderer Bedeutung für die Herstellkostenschätzung.

Technologiekette	Prozesskette	Fertigungsfolge
▪ Technologiebetrachtung	▪ Prozessbetrachtung	▪ Fertigungsbetrachtung
▪ Betriebsmittelunabhängig	▪ Fertigungsmittelbezogen	▪ Betriebsmittelbezogen

Abbildung 2.16: Technologiekette (links), Prozesskette (mitte) und Fertigungsfolge (rechts) in Anlehnung an Fallböhmer (2000) und Jacob (2021).

Fallböhmer (2000) beschreibt eine Methode, die bereits bei der Gestaltung der Produkte die Technologieplanung berücksichtigt. Dafür stellt er Produktdatenmodelle, Technologiedatenmodelle und eine Zuordnungsmatrix vor. Dabei werden auch Wechselwirkungen zwischen Technologien betrachtet. Alternative Technologieketten werden zusätzlich anhand der Machbarkeit und technischer Eignung bewertet.

Trommer (2001) überträgt die Vorgehensweise von Fallböhmer (2000) auf die Erstellung und Auswahl von Fertigungsfolgen. Die Methode beinhaltet drei Analyseschritte. Die Grobanalyse (Betrachtung der Datenmodelle), die Feinanalyse (technologische und geometrische Machbarkeit) und eine Eignungsanalyse (Produktionsmittel, Handhabungs- und Transportschritte). Abschließend folgt eine qualitative und quantitative Multi-Kriterien Bewertung.

Knoche (2005) baut inhaltlich auf Fallböhmer (2000) und Trommer (2001) auf. Sie leitet ein generisches Modell zur Fertigungstechnologiebeschreibung her. Das Modell klassifiziert Technologien nach möglichen Zustandsänderungen eines Bauteils. Zusätzlich werden komplexe Wechselwirkungen zwischen Technologien betrachtet.

Schindler (2015) erweitert die Arbeiten von Fallböhmer (2000) und Trommer (2001) um die Betrachtung von Technologiestrategien, sowie Reifegradbewertungen von Technologien und Technologieketten. Dafür entwickelte Methoden und Modelle helfen bei der Identifizierung relevanter Bewertungskriterien für Technologien und Technologieketten.

Jacob (2021) erweitert die vorangegangenen Ansätze um Produkt- und Fertigungsmodelle, die eine Interaktion miteinander zulassen. Zudem stellt er ein Konzept zur digitalen Technologiekettengenerierung und Bewertung vor. Dabei ist eine rekursive Optimierung vorgesehen. Produktanforderungen und Fähigkeiten von Fertigungstechnologien werden iterativ aufeinander abgestimmt, sodass sich Vorschläge für geeignete Technologieketten ergeben. Dabei liegt der Fokus auf der additiven Fertigung.

2.2.6 Geometrische Produktspezifikation

Die Prozesskette ist abhängig von der Funktion und Gestalt der betrachteten Komponente. Um die Funktion zu gewährleisten, wird die Gestalt definiert. Eine Komponente kann dabei sowohl aus einem einzelnen Bauteil, aus mehreren Bauteilen oder einer Baugruppe bestehen (Abbildung 2.17). Bezeichnend für eine Komponente ist dabei die Zuordnung von Bauteilen oder Baugruppen zu einer Teilfunktion (Krause et al., 2021).

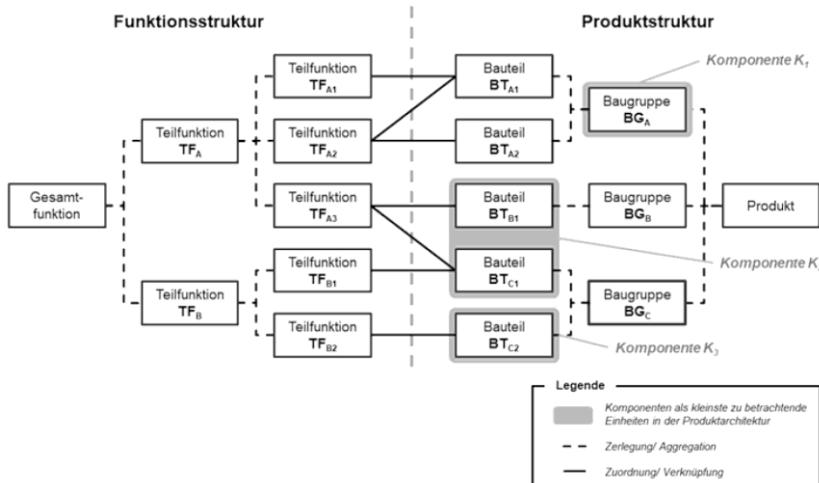


Abbildung 2.17: Darstellung der Funktionsstruktur und der Produktstruktur in der Produktarchitektur und daraus folgende Ableitung des Komponentenbegriffs aus Krause et al. (2021, S. 337).

Der Bauteilbegriff wird von Ropohl (1975) wie folgt definiert:

Definition Bauteil

„Rangniedrigste Sachsysteme sind im allgemeinen die elementaren technischen Bauteile; würde man diese wiederum in Subsysteme zerlegen, hätte man es nicht mehr mit technischen, sondern mit mikrophysikalischen bzw. chemischen Sachverhalten zu tun.“
(Ropohl, 1975, S. 35)

Getriebekomponenten wie Zahnräder und Wellen folgen häufig der Komponentenklassifikation K_3 (Abbildung 2.17) und entsprechen damit auch der Bauteildefinition. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Getriebekomponenten (Abschnitt 4.4) sind somit alle Bauteile im Sinne der obengenannten Definition. Für die Spezifizierung der Gestalt von Komponenten kann die Geometrische Produktspezifikation verwendet werden.

Definition Geometrische Produktspezifikation (GPS)

„Geometrische Produktspezifikation (ISO GPS) ist das System, das zur Spezifizierung und Verifizierung der geometrischen Anforderungen an Werkstücke in technischen Spezifikationen verwendet wird.“

(Brabec, Reißler & Stenzel, 2021, S. 12)

Ziel der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) ist es, die Form (Geometrie), Maße und Oberflächenmerkmale, sowie deren zulässige Abweichungen, zur Funktionserfüllung eines Werkstücks festzulegen. Dafür muss die Verbindung zwischen dem imaginären Werkstück der Konstruktion, dem hergestellten Werkstück und dem gemessenen Werkstück geschaffen werden. (Charpentier, 2014)

Im Spezifikationsprozess, der für gewöhnlich in der Frühen Phase der SGE stattfindet, werden nach DIN EN ISO 17450-2:2013-04 die folgenden Elemente festgelegt:

- Funktion des Bauteils
- GPS-Spezifikation
- GPS-Spezifikationselemente
- Spezifikationsoperationen
- Spezifikationsoperator

Es gibt in der geometrischen Produktspezifikation drei grundlegende Prinzipien (Charpentier, 2014; DIN EN ISO 8015:2011-09):

- Das Unabhängigkeitsprinzip besagt, dass jede GPS-Anforderung an ein Geometrieelement oder eine Beziehung zwischen Geometrieelementen unabhängig von anderen GPS-Anforderungen erfüllt werden muss.
- Das Aufrufprinzip besagt, dass auf makro- und mikrogeometrischer Spezifikationsebene alle ISO-GPS Normen aufgerufen werden können. Dies bedeutet, dass auf Inhalte anderer ISO-GPS Normen direkt verwiesen werden kann.
- Das Geometrieelementprinzip besagt, dass ein Werkstück aus Geometrieelementen besteht, die durch Begrenzungen wie z. B. Kanten begrenzt werden. Dabei gibt es verschiedene Arten von Geometrieelementen, die in verschiedenen Normen beschrieben werden (DIN EN ISO 22432:2012-03; DIN EN ISO 17450-1:2012-04).

Ein wichtiger Bestandteil der Beschreibung der zulässigen Geometrie, sind Form- und Lagetoleranzen. Diese werden in verschiedenen Quellen ausführlich behandelt (Charpentier, 2014, S. 92–98; Jorden & Schütte, 2020, S. 86–178).

Für verschiedene Fertigungsverfahren gibt es verschiedene Normen die Allgemeintoleranzen definieren (Tabelle 2.2). Allgemeintoleranzen vereinfachen dabei die technische Dokumentation, da nicht alle notwendigen Toleranzen explizit

angegeben werden müssen. Vielmehr definieren die Allgemeintoleranzen zulässige Abweichungen für übliche Fertigungsbedingungen. Daneben gibt es mit der DIN EN ISO 22081:2022-10 eine Norm, die Allgemeintolerierung unabhängig vom Fertigungsverfahren definiert. (Jorden & Schütte, 2020)

Tabelle 2.2: Normen für Allgemeintoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren. In Anlehnung an Jorden und Schütte (2020, S. 193)

Metallguss	DIN EN ISO 8062-1:2008-01
Keramikherstellung	DIN 40680-1:1983-08
Gesenkschmieden (Stahl)	DIN EN 10243-1:2000-06
Gesenk- und Freiformschmieden (Aluminium)	DIN EN 586-3:2002-02
Stanzen	DIN 6930-2:2011-10
Spanen	DIN ISO 2768-1:1991-06
Unabhängig vom Fertigungsverfahren	DIN EN ISO 22081:2022-10

Toleranzen haben neben der Funktionsfähigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Herstellkosten (Jorden & Schütte, 2020; Ehrlenspiel et al., 2014). Je enger Toleranzen eines Geometrieelements sind, desto höher sind in der Regel die Kosten. Ausnahmen gibt es z. B. bei Kostensprüngen. So wird beim Bohren mit einem Spiralbohrer in der Regel der Grundtoleranzgrad IT12 erreicht. Das Bauteil wird also nicht teurer, wenn hier z. B. statt IT14 IT12 definiert wird. Für eine IT10 ist jedoch ein Aufbohren und Reiben notwendig, was die Kosten verdreifachen kann. Zwischen IT10 und IT7 gibt es dann in der Regel wieder keinen Preisanstieg, da die Fertigung gleichbleibt. (Jorden & Schütte, 2020)

2.2.7 Advanced Systems Engineering (ASE)

Die Entwicklung von komplexen und vernetzten Systemen unter der Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen erfordert eine systembasierte Herangehensweise. Zusätzlich zu der Disziplin-spezifischen Ebene wird eine Interdisziplinäre Vernetzungsebene benötigt (Abbildung 2.18). Für die Kollaboration werden dabei Menschorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools benötigt.

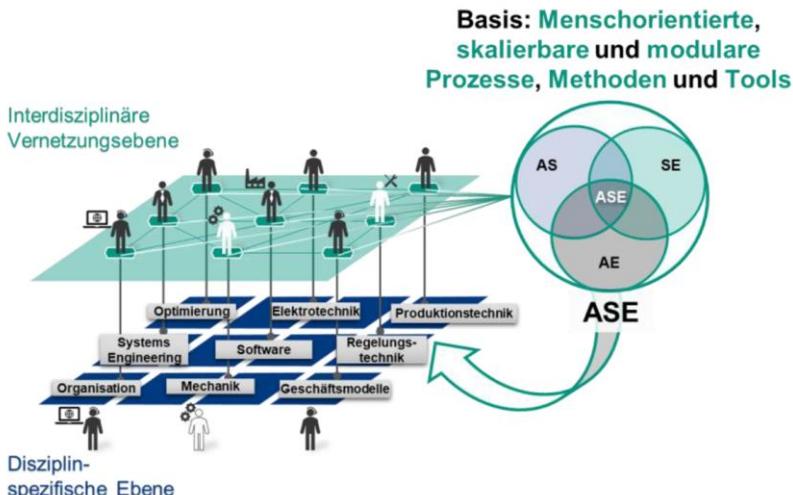


Abbildung 2.18: Kollaboration auf interdisziplinärer Vernetzungsebene durch Menschorientierte, skalierbare und modulare Prozesse, Methoden und Tools. Darstellung aus Mandel (2024, S. 6) angelehnt an Albers (2023).

Das *Advanced Systems Engineering* (ASE) stellt als Lösungsansatz eine integrierte Betrachtung der drei Handlungsfelder *Advanced Systems*, *Systems Engineering* und *Advanced Engineering* dar (Abbildung 2.19). Der Ausdruck *Advanced Systems* beschreibt den Bedarf, autonome, vernetzte Produkt-Service-Systeme zu entwickeln. Dabei erschweren die Komplexität der zu entwickelnden Systeme, sowie ein hoher Kostendruck und kurze Entwicklungszyklen die Entwicklung. *Systems Engineering* fördert unter anderem ein gemeinsames Systemverständnis und ermöglicht damit die Entwicklung von komplexen Produkten, ist jedoch noch nicht weit verbreitet im industriellen Kontext. Dabei wird Model-Based Systems Engineering (MBSE) als notwendig für einen durchgängigen Entwicklungsprozess gesehen. *Advanced Engineering* beschreibt neue Aspekte des Engineering. So wird eine digitale Durchgängigkeit und eine Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus benötigt. Andere Aspekte des *Advanced Engineering*s sind Digitale Zwillinge, Agilität, Assistenzsysteme mit Künstlicher Intelligenz und die Produktgenerationsentwicklung. (Albers, Dumitrescu et al., 2022)



Abbildung 2.19: Handlungsfelder des Advanced Systems Engineering aus Dumitrescu, Albers, Riedel, Stark und Gausemeier (S. 28)

Ein wichtiger Bestandteil des Advanced Systems Engineering ist die übergreifende Betrachtung ganzer Systeme. Eine Herausforderung stellt der Übergang von der Systembetrachtung zur funktionsorientierten Bauteilbetrachtung und Gestalt dar. Im Folgenden werden drei Aktivitäten in diesem Kontext beschrieben:

Moeser et al. (2016) stellen eine Methodik vor, die die modellbasierte, konzeptionelle Entwicklung und anschließende Modellierung der Gestalt von mechanischen Komponenten eines Systems unterstützt. Die Ergebnisse werden im Rahmen des Projektes *Entwicklung eines Modellierungswerkzeugs und technischer Dienstleistungen für Maschinenbaukonstrukteure zur systematischen Entwicklung und Modellierung des Funktions-Gestalt-Zusammenhangs mechatronischer Produkte mit durchgängiger Kopplung an SysML und CAD-Werkzeuge* (FAS4M) entwickelt. Die Methodik unterstützt die vier Anwendungsfälle: *System neu entwickeln*, *System dokumentieren*, *System analysieren* und *System weiterentwickeln*. Für die Modellierung von Mechanischen Systemen wird dabei die *Mechanics Modeling Language* (MechML) spezifiziert. (Moeser, 2016; Moeser et al., 2016)

Eigner, Dickopf, Schneider und Schulte (2017) Beschreiben ein ganzheitliches Konzept für die modellbasierte Entwicklung von cyberphysischen Systemen. Es wurde im Rahmen des Forschungsprojektes *mecPro²* entwickelt und besitzt zwei Hauptbestandteile. Das *mecPro²* Prozessframework und das *mecPro²* Architekturframework. Das Konzept basiert dabei auf Methoden des Model-Based Systems Engineering. So werden auf der Kontext Ebene Systemanforderungen von der natürlichen Sprache in modellbasierte Anforderungen in SysML (Systems Modelling Language, (OMG, 2019) überführt, um Datenkonsistenz und Datendurchgängigkeit zu steigern. Auf der Funktionsebene wird mithilfe der *Functional Architecture for Systems* (FAS) Methode (Weilkiens, Lamm, Roth & Walker, 2015) eine Beschreibung der Systemfunktion erstellt, welche über den

gesamten Lebenszyklus als Grundlage genommen werden kann. Auf der Ebene der Prinzipiellösung werden verschiedene Lösungsalternativen verglichen und dabei unter anderem durch den Grad der Funktionserfüllung bewertet. Die unterste Ebene der technischen Lösung beschreibt für die technische Lösung notwendige Komponenten, die mit ihren Schnittstellen eine Systemstruktur ergeben. Die Elemente der Systemstruktur können durch die vollständige Beschreibung an nachfolgende Entwicklungsschritte übergeben werden. (Eigner et al., 2017)

Fleischer et al. (2022) stellen einen Produktionssystemkonfigurator vor, der die Konfiguration eines schlüsselfertigen Produktionssystems basierend auf Features und Anforderungen vornimmt. Der Konfigurator durchläuft dabei vier Schritte:

- Ableitung der Fertigungstechnologien aus den Produktmerkmalen
- Sammeln relevanter Werkzeug- und Maschinendaten aus einer Modulbibliothek
- Auswahl von Maschinen und Werkzeugen für die Herstellung der Produkte
- Konfiguration des optimalen Produktionssystems

Für den Konfigurator wurde unter anderem ein regelbasierter Algorithmus entwickelt, der die extrahierten Features nutzt. Zusätzlich ist eine Plattform entstanden, auf der fertigungsrelevante Informationen wie Oberflächenanforderungen eingepflegt werden können. Für die Visualisierung und Einbeziehung weiterer Services wurde ein Softwareprototyp erstellt. (Fleischer et al., 2022)

2.2.8 Beschreibung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen mit dem C&C²-Ansatz

Nachdem der Zusammenhang zwischen Bedarfen, Zielen, Anforderungen und Funktionen, sowie zwischen Gestalt und Kosten beschrieben wurde, wird die Lücke nun geschlossen und der C&C²-Ansatz zur Analyse und Beschreibung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen beschrieben. Matthiesen (2021) definiert den C&C²-Ansatz wie folgt:

Definition C&C²-Ansatz

„Der C&C²-Ansatz ist ein Denkzeug, also ein Werkzeug zur Unterstützung und Strukturierung des Denkens während der Gestaltung eines Produkts. Er ist das Metamodell, mit dem konkrete C&C²-Modelle zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion von existierenden oder zu entwickelnden Produkten gebildet werden können.“

(Matthiesen, 2021, S. 421)

Die Analyse und Synthese von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen technischer Systeme stellt eine anspruchsvolle Tätigkeit dar. Unterstützung können Anwendende durch die Verwendung des C&C²-Ansatzes erhalten (Matthiesen, 2002). Die wichtigsten Bestandteile sind das visuelle C&C²-Modell, drei Kernelemente zur Modellbildung und drei Grundhypothesen (Abbildung 2.20).

Das visuelle C&C²-Modell steht dabei im Mittelpunkt (Abbildung 2.20, mittig). Es können Zusammenhänge auf unterschiedlichen Detailebenen modelliert werden (Matthiesen, 2002; Albers & Matthiesen, 2002; Albers & Wintergerst, 2014; Tröster et al., 2021). Die formalisierten Elemente ermöglichen dabei ein Modellieren in frühen, aber auch späten Phasen der Produktentwicklung (Grauberger, Heimicke, Nann, Albers & Matthiesen, 2020).

Dabei reichen drei Kernelemente, drei Nebenelemente und drei Strukturelemente für die Modellbildung (Abbildung 2.20, links). Die drei Kernelemente werden wie folgt von Matthiesen definiert: (Matthiesen, 2021, S. 421)

- „**Wirkflächenpaare** (WFP) sind Flächenelemente. Sie werden gebildet, wenn zwei beliebig geformte Oberflächen fester Körper oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern in Kontakt treten und am Energie-, Stoff- und/oder Informationsaustausch beteiligt sind.“
- „**Leitstützstrukturen** (LSS) sind Volumenelemente. Sie beschreiben Volumina von festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzten Räumen, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und eine Leitung von Stoff, Energie und/oder Information zwischen ihnen ermöglichen.“
- „**Connectoren** (C) integrieren die wirkungsrelevanten Eigenschaften, die außerhalb des Gestaltungsbereichs liegen, in die Systembetrachtung. Sie sind eine für die Beschreibung der betrachteten Funktion relevante Abstraktion der Systemumgebung. Connectoren haben eine repräsentative Wirkfläche und ein damit verknüpftes Modell der relevanten Systemumgebung und liegen damit im Betrachtungsraum aber nicht im aktuellen Gestaltungsraum.“

Die Nebenelemente *Wirkflächen* (WF), *Begrenzungsflächen* (BF) und die *Reststruktur* (RS) können die Modellbildung zusätzlich unterstützen. Besteht zusätzlich ein Bedarf C&C²-Modelle weitergehend zu strukturieren, können die Strukturelemente *Tragstruktur* (TS), *Wirknetz* und *Wirkstruktur* verwendet werden. Details zu den Neben und Strukturelementen finden sich in Matthiesen (2021,

S. 423). Für eine effiziente Modellerstellung mit dem C&C²-Ansatz werden Regeln benötigt, die die Beziehungen der Elemente zueinander beschreiben. Drei Regeln zur Modellierung werden im C&C²-Ansatz als Grundhypothesen bezeichnet (Abbildung 2.20, rechts). Matthiesen definiert diese wie folgt: (Matthiesen, 2021, S. 424)

- **Grundhypothese 1: Funktion braucht Wechselwirkung**

„Jedes funktionsrelevante Element eines technischen Systems ist an der Funktionserfüllung durch Wechselwirkungen mit mindestens einem anderen funktionsrelevanten Element beteiligt. Wechselwirkungen finden nur statt bei Kontakt von Wirkflächen (WF), die gemeinsam Wirkflächenpaare (WFP) bilden.“

- **Grundhypothese 2: Funktion braucht Mindestelemente**

„Eine Funktion erfordert mindestens zwei Wirkflächenpaare (WFP), die durch eine Leitstützstruktur (LSS) verbunden sind, und durch jeweils einen Connector (C) in die Umgebung eingebunden sind. Funktionsbestimmend sind dabei die Merkmale, Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare, der Leitstützstrukturen und der Connectoren.“

- **Grundhypothese 3: Fraktale Modellbildung**

„Jedes Teilsystem kann mit den Gestaltungsfunktionselementen Wirkflächenpaar (WFP), Leitstützstruktur (LSS) und Connector (C) auf verschiedenen Abstraktions- und Detaillierungsstufen beschrieben werden. Dazu ist eine Variation der Anzahl, der Anordnung und/oder der Eigenschaften der dargestellten Gestaltungsfunktionselemente erforderlich.“

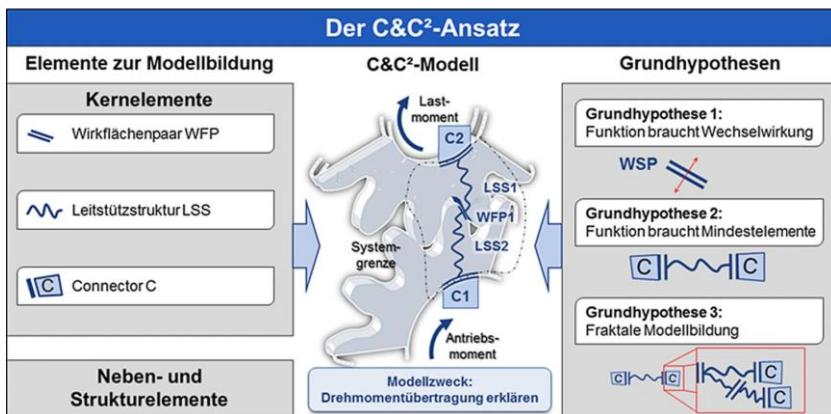


Abbildung 2.20: Übersicht über den C&C²-Ansatz und seine Elemente aus Tröster et al. (2021, S. 4) nach Matthiesen et al. (2018).

2.2.9 Zwischenfazit

Mit der Zunahme des Kostendrucks in Unternehmen besteht der Bedarf, Kosten aktiv zu beeinflussen. In der Produktentwicklung ist es von großem Interesse, die zukünftig entstehenden Kosten, insbesondere die Herstellkosten eines Produktes frühestmöglich zu kennen. Im Cost Engineering arbeitende Personen haben unter anderem die Aufgabe Herstellkostenschätzungen mit möglichst wenig Zeitaufwand, möglichst genau und nachvollziehbar, zu erstellen. Dafür ist zum einen eine breite Wissensbasis von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen und Gestalt-Fertigung-Zusammenhängen notwendig, zum anderen eine gute Verfügbarkeit von Produkt- und Fertigungsinformationen. Der C&C²-Ansatz kann hierbei für die Beschreibung und Analyse von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen verwendet werden. Die Auswahl von Fertigungsverfahren im Rahmen der Erstellung von Technologieketten, aber auch die Definition von Toleranzen im Rahmen der Geometrischen Produktspezifikation, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten. Die Verfügbarkeit von Daten, die den Gestalt-Fertigung-Zusammenhang beschreiben ist jedoch, insbesondere in den frühen Phasen der Produktentwicklung, gering. Um die Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen bei der Entwicklung von komplexen und vernetzten Systemen zu ermöglichen, wurde das *Advanced Systems Engineering* eingeführt.

Es gibt verschiedene Ansätze, Personen im Cost Engineering zu unterstützen. Bei detaillierten Herstellkostenschätzungen kann eine Unterstützung bei der Erstellung der Technologiekette z. B. durch Computer-aided Process Planning (CAPP) oder bei der Betriebsmittelzuordnung und Kostenableitung z. B. durch Parametrische Kostenmodelle erfolgen. Weitere Ansätze, beispielsweise aus dem Gebiet des Maschinellen Lernens, definieren in der Regel keine explizite Fertigungsfolge, was Aufwand spart, jedoch zu geringer Nachvollziehbarkeit der Herstellkostenschätzung führt und die Weiterverwendung der Ergebnisse damit erschwert. Zusätzlich sind datengetriebene Ansätze auf eine hohe Datenqualität und Datenquantität angewiesen, die aktuell große Herausforderungen darstellen.

Übergreifende Ansätze, die einen Lösungsansatz für die mangelhafte Datenverfügbarkeit liefern, fehlen derzeit. Eine Möglichkeit, die geringe Datenverfügbarkeit und Datenqualität zu verbessern, sind semantische Technologien, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden. Sie können sowohl für die Strukturierung und Formalisierung einer Datenbasis als auch für das Identifizieren ähnlicher Bauteile genutzt werden (Mabkhot, Al-Samhan & Hidri, 2019).

2.3 Semantische Technologien und deren Anwendung im Cost Engineering

Nach einer Einführung zu semantischen Technologien (Abschnitt 2.3.1) wird über das Wissensmanagement (Abschnitt 2.3.2) zu Ontologien und Wissensgraphen (Abschnitt 2.3.3) übergeleitet. Der Abschnitt schließt mit einer Betrachtung existierender Ontologien und Wissensgraphen im Cost Engineering (Abschnitt 2.3.4) und einem Zwischenfazit (Abschnitt 2.3.5) ab.

2.3.1 Grundlagen semantischer Technologien

Der Begriff *Semantik* entstammt ursprünglich den Gebieten der Semiotik (Ogden & Richards, 1923) und Linguistik (Fürber, 2016). Semiotik ist die Lehre von Zeichensystemen und umfasst die Disziplinen Syntax, Semantik und Pragmatik. Die Semantik stellt dabei die Beziehungen zwischen Zeichen und deren Bedeutungen und Sinn dar (Hoyningen-Huene, 1998). Die Linguistik ist die Lehre von Bedeutung und Sinn der Sprache. Sinn bezieht sich dabei auf das zugeordnete Konzept. Bedeutung bezieht sich auf das Bezugsobjekt in der Realwelt. Pellegrini (2006) veranschaulicht dies anhand eines Beispiels: Sonnenaufgang und

Sonnenuntergang beziehen sich beide auf denselben Himmelskörper (Bedeutung engl. reference: die Sonne), meinen (Sinn engl. meaning) jedoch Unterschiedliches.

Die Begriffe *Zeichen*, *Daten*, *Informationen* und *Wissen* lassen sich nach Freimut Bodendorf (2006) in eine Hierarchie einordnen (Abbildung 2.21). Grundlage ist ein definierter Zeichenumfang mit einer gewissen Menge an *Zeichen*. Wird zusätzlich zu den *Zeichen* eine bestimmte Syntax eingehalten, handelt es sich um *Daten*. Werden *Daten* in einen Kontext eingeordnet, handelt es sich um *Informationen*. Durch die Vernetzung von *Informationen* und die Einordnung in ein Gesamtbild entsteht *Wissen*.

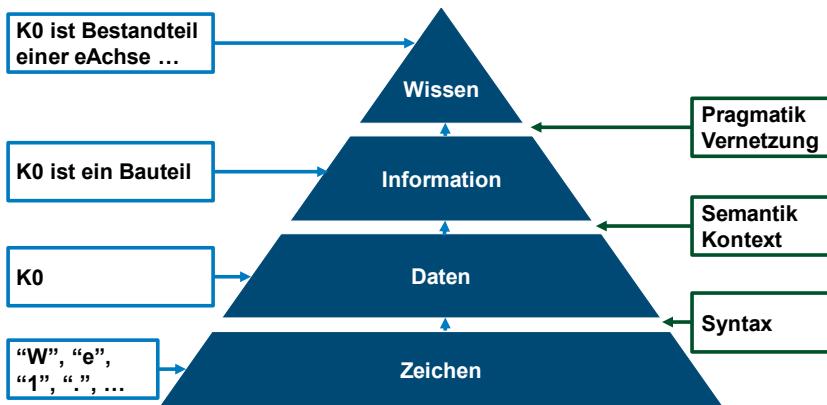


Abbildung 2.21: Begriffshierarchie von Zeichen, Daten, Informationen und Wissen nach Freimut Bodendorf (2006, S. 1)

Während die hierarchische Darstellung häufig verwendet wird, zweifelt Freimut Bodendorf (2006) die „suggerierte trennscharfe Unterscheidung“ von Daten, Informationen und Wissen an. Er plädiert für eine Vorstellung als Kontinuum zwischen den Polen *Daten* und *Wissen*. Abbildung 2.22 zeigt eine Auswahl an Deskriptoren, die eine Differenzierung der Begriffe erleichtern soll. (Freimut Bodendorf, 2006, S. 2)

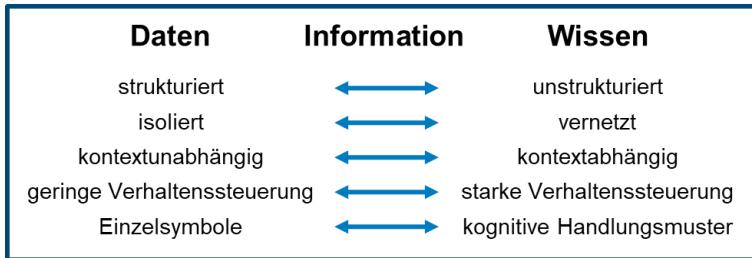


Abbildung 2.22: Kontinuierliche Darstellung von *Daten*, *Informationen* und *Wissen* mit Deskriptoren als Differenzierungsmerkmale nach Freimut Bodendorf (2006, S. 2)

Ogden und Richards (1923) beschreiben die Beziehungen zwischen *Zeichen*, *Konzept* und *Objekt* als *Semiotisches Dreieck* (Abbildung 2.23). Wright (2003) beschreibt in *From the Semiotic Triangle to the Semantic Web* auf dem Semiotischen Dreieck aufbauend die Entwicklung semiotischer Modelle bis zum *Semantic Web* (Berners-Lee, Hendler & Lassila, 2001).

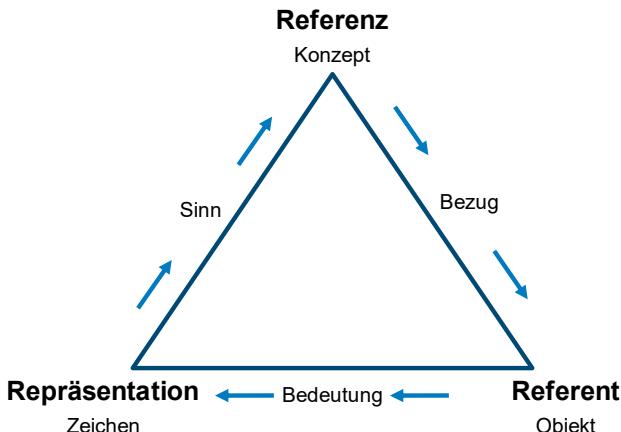


Abbildung 2.23: Beziehungen zwischen Zeichen, Konzept und Objekt im Semiotischen Dreieck nach Ogden und Richards (1923, S. 11), übersetzt nach Haneke (2022, S. 16)¹

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Das *Semantic Web* versucht, als Erweiterung des *World Wide Web*, Informationen durch Maschinenlesbarkeit besser austauschbar zu machen (Feigenbaum, Herman, Hongsermeier, Neumann & Stephens, 2009) und gleichzeitig nicht nur Daten, sondern auch Bedeutungen zu übertragen (Pellegrini, 2006). Nach Staab und Studer (2009) werden dafür insbesondere Wissensmanagement, Softwareengineering und Maschinelles Lernen angewendet. Einen Überblick über verwendete Konzepte und Abstraktionen sowie deren Umsetzungsmöglichkeiten im Semantic Web bietet der *Semantic Web Technology Stack* (Abbildung 2.24).

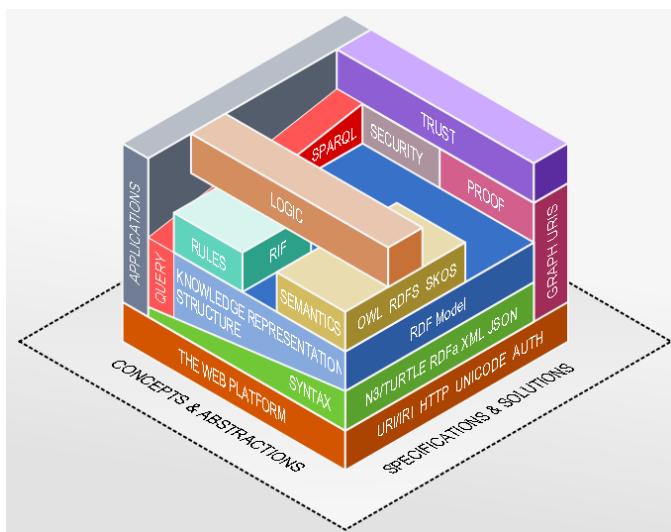


Abbildung 2.24: Semantic Web Technology Stack mit verwendeten Konzepten und Abstraktionen (linke Seite) und deren Umsetzungsmöglichkeiten (rechte Seite) aus Gängler (2011, S. 24)².

Uniform Ressource Identifier (URI) bezeichnen individuelle Informationsobjekte, bzw. Repräsentationen im Sinne des Semiotischen Dreiecks (vgl. Abbildung 2.23, unten links). Eine bedeutende Untergruppe der URI sind Uniform Ressource Locator (URL), welche auf eine eindeutige Location, z. B. im World Wide Web zeigen. (Berners-Lee, Fielding & Masinter, 2005)

² Abschlussarbeit

2.3.2 Wissensmanagement

Heute steht die Automobilindustrie unter hohem Wettbewerbsdruck (Roy, Souchoroukov & Shehab, 2011). Um Wissen gezielt im Unternehmen anzureichern und zu verwerten, wenden Unternehmen zunehmend Wissensmanagement an (Fakhar Manesh, Pellegrini, Marzi & Dabic, 2021). In verschiedenen Disziplinen gibt es unterschiedliche Verständnisse des Begriffs Wissensmanagement (Nonaka & Peltokorpi, 2006). Quintas, Lefrere und Jones (1997) schlagen vor, das Verständnis von Wissensmanagement auf Domänen einzuschränken. Die VDI-Richtlinie 5610 Blatt 1:2009-03 *Wissensmanagement im Ingenieurwesen – Grundlagen, Konzepte, Vorgehen* beschreibt Wissensmanagement als „[] Organisieren aller Prozesse, in denen Informationen, Erkenntnisse und Erfahrungen identifiziert, erzeugt, gespeichert, verteilt und angewendet werden.“ (VDI-Richtlinie 5610 Blatt 1:2009-03, S. 8).

Das wiederholte Anwenden von Wissen ist ein wichtiger Bestandteil wissensintensiver Aktivitäten. Ohne Wissensmanagement ist ein hoher Wiederverwendungsgrad nicht zu erreichen (Demarest, 1997). Wissensbasierte Systeme (engl. knowledge based systems; KBS) können Unternehmen und Menschen bei den Kernbestandteilen des Wissensmanagements (*identifizieren, erzeugen, speichern, verteilen, anwenden*) unterstützen (Zhen, Wang & Li, 2013). Abbildung 2.25 stellt den Aufbau und die Struktur eines wissensbasierten Systems dar.

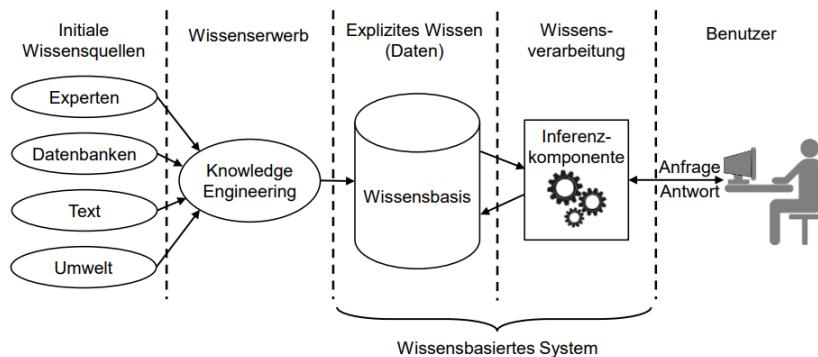


Abbildung 2.25: Struktur eines wissensbasierten Systems aus Brandmeier (2020, S. 52) in Anlehnung an Ertel (2013).

2.3.3 Ontologien und Wissensgraphen

Der Begriff *Ontologie* bezeichnet in der Philosophie ein Teilgebiet, welches sich mit der *Natur* und *Struktur* der *Realität* beschäftigt (Guarino, Oberle & Staab, 2009, S. 1). Abhandlungen zu dem philosophischen Ontologie Begriff finden sich in verschiedenen Quellen (Staab & Studer, 2009; Haneke, 2022³; Schmalenbach, 2013). Übertragen auf das Wissensmanagement bezieht sich *Ontologie* auf die Klassifizierung von Repräsentationen von realweltlichen Phänomenen. Studer, Benjamins und Fensel (1998) leiten davon ausgehend eine Definition basierend auf Gruber (1993) und Borst (1997) her:

Definition Ontologie

“Eine Ontologie ist eine formale, explizite Spezifikation einer geteilten Konzeptualisierung.” (Übersetzt)

„An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization.“

(Studer et al., 1998, S. 25)

Die Definition zeichnet sich durch vier Kernaspekte aus, die Studer et al. (1998) näher erläutern:

- **Formal** (engl: formal): Die Maschinenlesbarkeit ist gewährleistet.
- **Explizit** (engl: explicit): Die verwendeten Konzepte sind klar definiert.
- **Geteilt** (engl: shared): Das widergespiegelte Wissen ist nicht auf ein Individuum beschränkt, sondern entspricht dem Konsens einer Gruppe.
- **Konzeptualisierung**: (engl: conceptualisation): Ein realweltliches Phänomen ist durch relevante Konzepte als abstraktes Modell abgebildet.

Es gibt verschiedene formale Ontologie Sprachen auf den verschiedenen Ebenen des Semantic Web Technology Stacks (Abbildung 2.24), wie z. B. Resource Description Framework (RDF), Resource Description Framework Schema (RDFS), Terse RDF Triple Language (Turtle), Web Ontology Language (OWL). Verschiedene Autoren geben hier einen Überblick (Schmalenbach, 2013, 56ff.; Grimm, Hitzler & Abecker, 2007, 80 ff.; Baader, Horrocks & Sattler, 2009)

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Jean, Pierra und Ait-Ameur (2007) unterscheiden Upper-Level Ontologien und Domänenontologien. Upper-Level Ontologien versuchen universell anwendbare Konzepte bereitzustellen. Domänenontologien beschränken sich auf einen Fachbereich und können dadurch spezifische Zusammenhänge besser abbilden (Studer, Grimm & Abecker, 2007).

Werden Ontologien mit Informationen instanziert, kann daraus ein Wissensgraph entstehen (engl. Knowledge Graph) (Schrader, 2020). Im Gegensatz zur weit in die Vergangenheit reichenden Bezeichnung *Ontologie*, findet der Begriff *Knowledge Graph* erst seit ca. 1972 Verwendung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Schneider, 1972). Seit der Einführung des *Google Knowledge Graphs* (Singhal, 2012) steigt das Interesse an Wissensgraphen (Hogan et al., 2022) jedoch auch die häufig ungezielte Verwendung des Begriffes (Ehrlinger & Wöß, 2016) schnell an. Nichtsdestotrotz handelt es sich mittlerweile um ein großes Forschungsfeld mit zahlreichen Forschenden und Anwendungen (Ji, Pan, Cambria, Marttinen & Yu, 2022). In dieser Arbeit wird vereinbar mit der Beschreibung als Ergebnis der Instanziierung (s.o. und Abbildung 2.26) auf die Definition von D. Fensel et al. (2020) aufgebaut.

Definition Wissensgraph

„Wissensgraphen sind semantische Netze, die verschiedene unterschiedliche Informationsquellen integrieren, um Wissen bestimmter Domänen zu repräsentieren.“ (Übersetzt)

„Knowledge Graphs are [...] semantic nets that integrate various and heterogeneous information sources to represent knowledge about certain domains of discourse.“

(D. Fensel et al., 2020, S. 25)

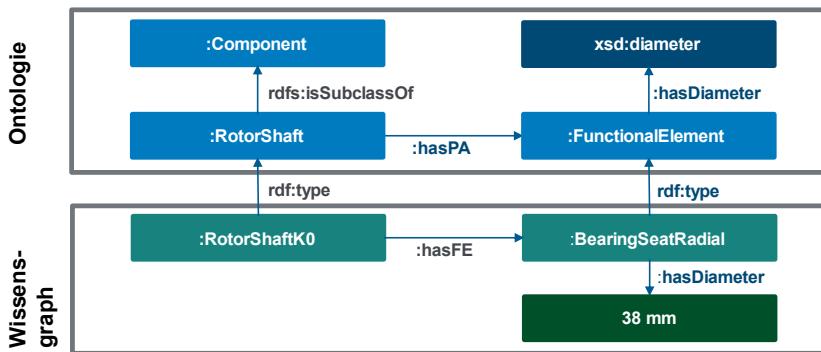


Abbildung 2.26: Beziehungen zwischen Ontologie und Wissensgraph am Beispiel einer Getriebewelle in Anlehnung an Haneke (2022, S. 22)⁴.

Verglichen mit relationalen Datenbanken (Codd, 2001) bieten Wissensgraphen flexiblere Strukturen für hinterlegte Informationen. Komplexe Abfragen werden durch die graphenbasierte Abfragesprache SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) ermöglicht (Pérez, Arenas & Gutierrez, 2009). SPARQL baut dabei auf der strukturierten Abfragesprache für relationale Datenbanken SQL (Structured Query Language) auf. Zusätzlich können jedoch z. B. Elemente des Resource Description Frameworks (RDF) und Variablen integriert und so komplexe Suchkriterien formuliert werden. (Dengel, 2012)

Tiefergehende Informationen zu Abfragesprachen für Ontologien und Wissensgraphen finden sich z. B. in Dengel (2012).

2.3.4 Semantische Technologien im Cost Engineering

Im Folgenden werden vorhandene Ansätze für Ontologien, Wissensgraphen und wissensbasierte Systeme in der Domäne Cost Engineering betrachtet.

Lemaignan, Siadat, Dantan und Semenenko (2006) entwickeln die Manufacturing's Semantics Ontology (MASON) für die Beschreibung von Fertigungszusammenhängen (Überblick in Abbildung 2.27). Die Ontologie basiert auf der Ontologiesprache OWL und beinhaltet 270 Hauptkonzepte und 50

⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

verbindende Eigenschaften. Als beispielhafte Anwendungen der Ontologie werden unter anderem Herstellkostenschätzungen genannt. So wird die Idee eines Expertensystems zur Herstellkostenschätzung für die Fertigung geringer Stückzahlen vorgestellt.

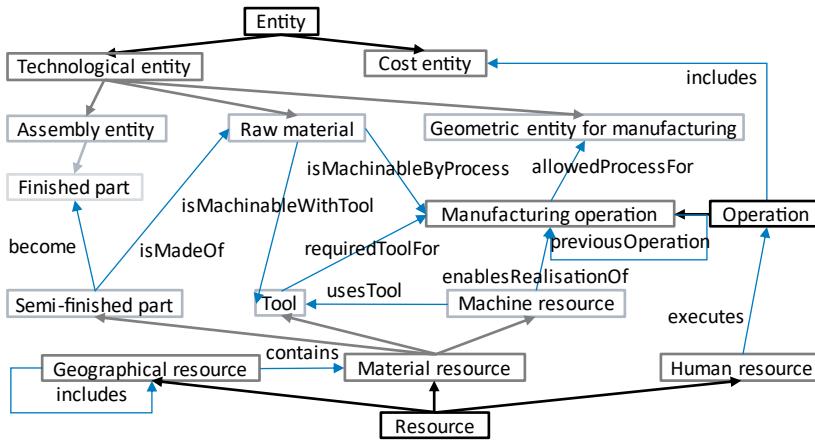


Abbildung 2.27: Überblick über die wichtigsten Klassen und Objekteigenschaften der Ontologie aus Lemaignan et al. (2006, S. 99).

Gröger, Schwarz und Mitschang (2014) stellen einen Wissensspeicher für Fertigungswissen (engl. *Manufacturing Knowledge Repository*) vor. Dieser ganzheitliche Wissensspeicher beinhaltet strukturiertes und unstrukturiertes Prozesswissen. Dafür wurde ein Datenmodell erstellt (u.a. Abbildung 2.28). Es werden verschiedene Charakteristika der notwendigen Daten analysiert und darauf aufbauend Speicherarchitekturen diskutiert. Mit Hilfe eines Prototyps wurde eine Machbarkeitsstudie am Beispiel der Fertigung von Federn für die Automobilindustrie durchgeführt. Dabei wurden Instanzdaten auf Basis von Annahmen erzeugt.

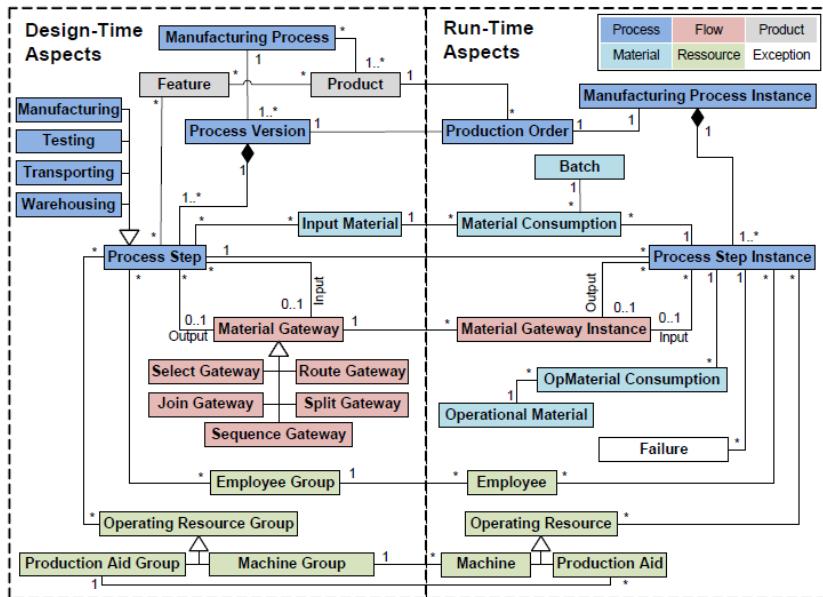


Abbildung 2.28: Ganzheitliches Prozess-Metamodell aus Gröger et al. (2014, S. 43).

Shehab und Abdalla (2001) stellen ein wissensbasiertes System zur Unterstützung von wenig erfahrenen Anwendenden bei Herstellkostenschätzungen in den frühen Phasen der Produktentwicklung vor. Dafür werden Regel- und Fuzzy-basierte sowie objektorientierte Wissensmodellierungsansätze verwendet. Eine prototypische Umsetzung mit CAD-Integration wurde evaluiert. Die Gültigkeit des Ansatzes ist jedoch auf wenige Fertigungsverfahren beschränkt.

Gleadall et al. (2016) beschreiben eine Methodik für die Überführung eines unspezifischen Produktkonzeptes in ein detailliertes Design und eine passende Prozesskette für hybride Fertigungsplattformen. Hybride Fertigungsplattformen beinhalten verschiedene Technologien für die Fertigung von komplexen Produkten, z. B. additive und subtraktive Verfahren (Zhu, Dhokia, Nassehi & Newman, 2013). Die Methodik beinhaltet drei Kernmodelle (Abbildung 2.29). Das Produkt-Design-Modell, das hybride Fertigungsplattformmodell und das Evaluationsmodell wurden in der beispielhaften Entwicklung eines LED-Produktes im Rahmen des Forschungsprojektes SMARTLAM angewendet. Die Methodik ist technologie-übergreifend anwendbar, verarbeitet jedoch weniger Detailinformationen als vergleichbare technologiespezifische Ansätze. (Gleadall et al., 2016)

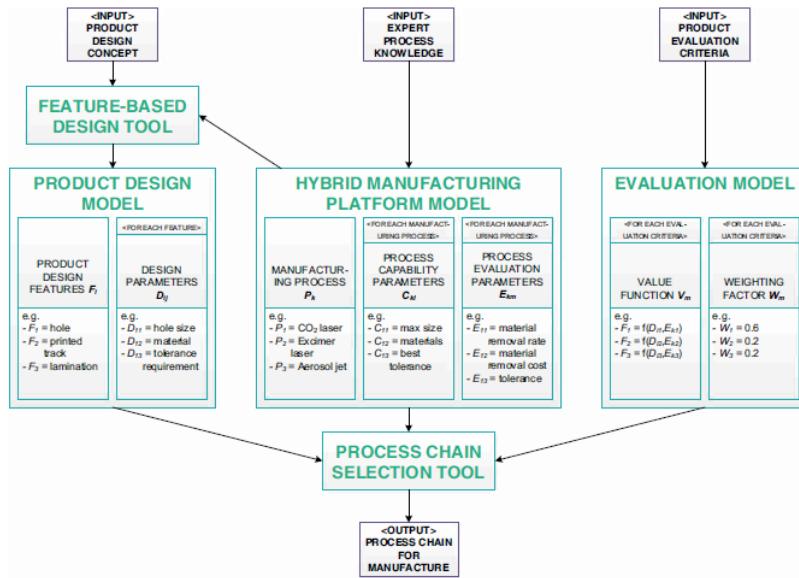


Abbildung 2.29: Überblick über die Hauptbestandteile der Methodik für die Überführung eines Konzeptes in ein detailliertes Design und eine passende Prozesskette für hybride Fertigungsplattformen aus Gleadall et al. (2016, S. 557).

Zhang, Luo, Zhang und Sutherland (2014) stellen ein ontologiebasiertes Wissensmanagementsystem vor. Es wird Fertigungswissen zur Bauteilfertigung über eine Abbildung der Fertigbarkeitsgrenzen mit der Semantic Web Rule Language (SWRL) und der Zusammenhänge mit der Web Ontology Language (OWL) gespeichert. Verschiedene Fertigungstechnologien werden dabei semantisch beschrieben. Aufgrund der Anzahl und Varianz können jedoch nicht alle Details betrachtet und modelliert werden. Zusätzlich wird ein initialer Prototyp für Gussteile vorgestellt, der feste Grenzen, wie eine maximale Länge von 300 mm, implementiert. Dies erzeugt ein anwendbares Technologimodell, welches jedoch aufgrund der starren Grenzen eine eingeschränkte Gültigkeit besitzt.

Kang et al. (2016) stellen einen Ansatz für die Auswahl und Strukturierung von Bearbeitungsschritten in der spanenden Fertigung vor. Der Ansatz nutzt einen ontologiebasierten Wissensspeicher und in Bezug stehende Zusammenhänge. Der Schlussfolgerungsmechanismus betrachtet unter anderem Features, Prozesse und Grenzen der Fertigbarkeit. So kann der finale Bearbeitungsschritt über Anforderungen des Features und die Grenzen der Fertigbarkeit abgeleitet werden.

Ein Nachteil dabei ist der große Modellierungsaufwand beim Festlegen der Regeln und die Unsicherheit bei starren Grenzen. So sind die Grenzen nicht nur abhängig von dem Bearbeitungsschritt, sondern ebenso von der Maschine, der Umgebung und der Erfahrung der Bedienenden.

Voltolini, Borsato und Peruzzini (2019) stellen einen ontologiebasierten Ansatz zur Kostenschätzung in den frühen Phasen der Produktentwicklung vor. Dabei soll auf Wissen aus vorherigen Entwicklungsaktivitäten und formalisiertes Expertenwissen zurückgegriffen werden. In einer Case Study anhand eines Brückenkrans wurde zunächst eine Ontologie entwickelt. Die Verbindung zwischen Funktion und Bauteilen kann durch die Ontologie abgebildet werden. Aufbauend auf dieser Verknüpfung werden Abfragen zu verwendenden und in ihrer Eignung bewerteten Bauteilen aus vergangenen Projekten durchgeführt. Nachteile bestehen in der notwendigen Verfügbarkeit von bereits bewerteten Bauteilen und dem initialen Aufwand für Produkte, den Zusammenhang zwischen Funktion und Bauteilen zu modellieren. Die Ontologie wurde qualitativ von Ontologie-Experten bewertet, nicht jedoch die Anwendbarkeit oder der Nutzen des gesamten Ansatzes. Auch hatten die Prüfenden keine Erfahrung im Cost Engineering. (Voltolini, Vasconcelos, Borsato & Peruzzini, 2018; Voltolini, Vasconcelos, Borsato & Peruzzini, 2019; Voltolini, Borsato & Peruzzini, 2019)

Mandolini, Campi, Favi, Germani und Raffaeli (2020) beschreiben ein Framework zur analytischen Kostenschätzung von mechanischen Komponenten, welches auf formalisiertem Fertigungswissen basiert. Das Framework besteht dabei aus vier Bestandteilen: Einer Struktur zur Kostenaufstellung, einem Datenmodell, um das notwendige Fertigungswissen aufzunehmen und zu speichern, einem Datenmodell für die notwendigen Kostenzusammenhänge und einem Workflow zur Festlegung der Prozesskette. Bei der Festlegung der Prozesskette werden fünf Entscheidungsschritte durchlaufen, die jeweils durch eine spezifische Datenbasis unterstützt werden. Das Framework wird in einer Case Study mit zwei rotationssymmetrischen, geschmiedeten Komponenten getestet. Campi, Mandolini, Favi, Checcacci und Germani (2020) wenden das Framework auf acht weitere rotationssymmetrische, geschmiedete Komponenten an. Einschränkungen ergeben sich bei der Übertragbarkeit auf andere Technologien. Darüber hinaus wird der Automatisierungsgrad nicht im Detail betrachtet, was einen hohen manuellen Aufwand für Anpassungen und Berechnungen mit dem Kostenmodell vermuten lässt. So findet bei der Extraktion der Produkt- und Fertigungsinformationen (PMI) aus dem CAD-Modell (Abbildung 2.30) eine Unterstützung durch Wissen statt, nicht jedoch eine automatische Parameterextraktion. Des Weiteren wurde das Framework lediglich Experten vorgestellt, nicht jedoch durch diese angewendet. Eine umfassende

Validierungsstudie würde eine detailliertere Bewertung zulassen. (Mandolini, Favi, Campi & Raffaeli, 2020; Mandolini, Campi et al., 2020; Campi et al., 2020)

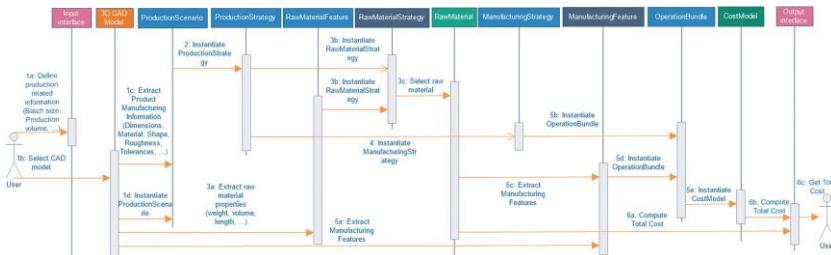


Abbildung 2.30: Workflow für die Festlegung der Prozesskette aus Mandolini und Campi et al. (2020, S. 1139).

2.3.5 Zwischenfazit

Semantische Technologien, wie Ontologien und Wissensgraphen, können angewendet werden, um Menschen in der Produktentwicklung zu unterstützen. Sie werden sowohl für die Festlegung von Prozessketten (z. B. CAPP, SWRL), als auch für Kostenmodelle und damit für die Schätzung von Herstellkosten verwendet. Ein wichtiges Spannungsfeld bei der Entwicklung von unterstützenden Systemen ist die große Vielfalt an Fertigungstechnologien, der große Detaillierungsaufwand für eine genaue Schätzung und die Anzahl an existierenden Einflüssen und Beziehungen. So beinhaltet die DIN 8580:2022-12 in den Untergruppen fast 200 Arten von Herstellverfahren. Eine weitere Herausforderung bei der Beschreibung spezifischer Fertigungstechnologien ist der von externen Umständen abhängige Charakter. So sind Grenzen der Fertigbarkeit unter anderem von Maschinen, Unternehmen, Bedienenden, dem Werkstoff und Umwelteinflüssen abhängig, die in keiner Arbeit vollständig abgebildet werden. Dies liegt auch daran, dass ein Verschieben der Grenzen der Fertigbarkeit für ein Unternehmen zu erheblichen Wettbewerbsvorteilen führen kann, die auch effizient genutzt werden sollten.

Weiteres Potential wird in der Kombination verschiedener Ansätze gesehen. So finden die Erkenntnisse, dass Produkte aufbauend auf Referenzen entwickelt werden, noch wenig Beachtung in semantischen Ansätzen für die Herstellkostenschätzung. Hier sollten Möglichkeiten, Referenzsystemelemente effizient mit semantischen Abfragen in Wissensgraphen zu identifizieren, geprüft werden. Des Weiteren bieten semantische Wissensmanagementsysteme die Möglichkeit, iterativ den Umfang des gespeicherten Wissens zu erweitern. So

wurden bisher keine Ansätze betrachtet, die darauf basieren im Verlauf der Anwendung die Wissensbasis zu erweitern und somit ein lernendes System mit zunehmender Genauigkeit zu bieten.

Ein weiteres Defizit bei den betrachteten Ansätzen wird in der Evaluierung gesehen. Die meisten Ansätze wurden lediglich auf allgemeine Anwendbarkeit evaluiert. Studien, bei denen die anwendenden Personen die Ansätze oder entwickelte Prototypen anwenden, haben sich nicht gefunden. Dies ist hinsichtlich der Bewertung der Anwendbarkeit problematisch. Ein weiterer Punkt ist die wenig betrachtete Automatisierung, die den Zeitaufwand für Herstellkostenschätzungen in Unternehmen reduzieren kann. Insbesondere die aufwendige Datenübertragung aus einem Produktmodell wird häufig nicht im Detail betrachtet. Eine konsequente Evaluierung entwickelter Ansätze ist notwendig, um den Mehrwert darzulegen.

2.4 Fazit als Übergang zum Forschungsbedarf

In der Frühen Phase der SGE existieren verschiedene Möglichkeiten den Unternehmenserfolg durch kostengünstige Produkte positiv zu beeinflussen. Gleichzeitig sind Ziel- und Objektsystem noch nicht vollständig spezifiziert, was große Unsicherheiten impliziert. Hier helfen Variationen von Referenzsystemelementen, welche die Unsicherheit und den Aufwand in der Produktentwicklung reduzieren.

Bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen als erfahrungsbasierte Tätigkeit im Spannungsfeld des Produkt-Produktions-CoDesigns wird versucht, Unsicherheiten bezüglich später anfallenden Kosten zu reduzieren. Zur Unterstützung wurden verschiedene Methoden und Ansätze der Herstellkostenschätzung, sowie Ansätze zur geometrischen Produktspezifikation und zur Beschreibung des Gestalt-Funktion-Zusammenhangs vorgestellt. Eine Herausforderung sind derzeit nicht verknüpfte Produkt- und Fertigungsinformationen. Zudem scheitern verschiedene Ansätze oder sind limitiert durch eine geringe formale Datenverfügbarkeit.

Ein Lösungsansatz besteht in der Verwendung von semantischen Technologien, wie Ontologien und Wissensgraphen. Diese werden erläutert und semantische Ansätze im Cost Engineering beschrieben. Derzeit existieren keine geeigneten Methoden zur Unterstützung bei der referenzbasierten Erstellung von Herstellkostenschätzungen mit semantischen Technologien. Diese Forschungslücke wird im Rahmen dieser Arbeit behandelt.

3 Zielsetzung

Zunächst wird für die Zielsetzung der Arbeit der Forschungsbedarf beschrieben. Danach folgt eine Fokussierung durch eine Forschungsthese.

3.1 Forschungsbedarf

Das Cost Engineering verfolgt bereits in der Frühen Phase der SGE das Ziel, durch die gezielte und systematische Schätzung und Beeinflussung von Kosten die Profitabilität zu steigern. So werden unter anderem detaillierte Herstellkostenschätzungen erstellt. Dies benötigt detaillierte Produkt-, Prozess- und Kosteninformationen sowie Wissen und Erfahrung im Cost Engineering. Drei wichtige, messbare Erfolgsfaktoren, die den Einfluss von Herstellkostenschätzungen auf die Profitabilität beeinflussen sind die Reduktion des Zeitaufwandes für die Erstellung, die Transparenz der erstellten Herstellkostenschätzungen und die Wissensverfügbarkeit während der Erstellung. Um die Erstellung von Herstellkostenschätzungen zu unterstützen, bestehen bereits Prozesse, Methoden und Tools, die jedoch Lücken bezüglich der genannten Erfolgsfaktoren aufweisen.

Bei der Betrachtung des Zeitaufwandes fällt auf, dass die Erstellung von Herstellkostenschätzungen nach wie vor ein größtenteils manueller Prozess ist. Ein hoher Kostendruck, steigende Lohnkosten und zunehmende Systemkomplexität erfordern jedoch Effizienzsteigerungen im Cost Engineering. Dies gilt auch im Bereich der Elektromobilität, für die in der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) Produkte entwickelt werden. Es gibt Ansätze für automatisierte Herstellkostenschätzungen, die jedoch entweder Produkt- und Fertigungsinformationen wie z. B. die Geometrie und Toleranzen nicht ausreichend betrachten oder nur für einen Prozessschritt ausgelegt sind. Ein weiteres Defizit verschiedener existierender Ansätze ist, dass die aufwendige Datenübertragung aus einem Produktmodell häufig nicht im Detail betrachtet wird. Gerade hier bietet sich jedoch ein großes Potential durch Automatisierung.

Sowohl manuell erstellte Herstellkostenschätzungen als auch fallbasierte Methoden zur Kostenschätzung besitzen meist Defizite in der Transparenz. Die Transparenz ist bei Herstellkostenschätzungen von großer Bedeutung, da gewählte Prämissen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse besitzen und

Randbedingungen wie Materialpreise z. B. geografisch und zeitlich stark variieren. Gleichzeitig bedeutet eine manuelle Dokumentation von Prämissen einen hohen manuellen Zeitaufwand. Zukünftige Unterstützungen erfordern somit eine verbesserte Transparenz und einen angemessenen Automatisierungsgrad z. B. bezüglich der Dokumentation.

Die Verfügbarkeit von Informationen und Wissen im Cost Engineering ist aktuell geprägt von einer wenig strukturierten und nicht verknüpften Ablage der Produkt- und Fertigungsinformationen, insbesondere in der Frühen Phase der SGE. Zusätzlich wird der Zusammenhang zwischen Produkt und Prozesskette derzeit nicht strukturiert beschrieben oder gespeichert und ist deshalb in der Regel nicht maschinenlesbar verfügbar. Gerade an der Schnittstelle zwischen Produkt und Produktionssystem gibt es einen Bedarf für systematische Wiederverwendung von Wissen im Rahmen des Produkt-Produktions-CoDesigns (PPCD). Verschiedene Vorgehensweisen im Cost Engineering basieren intuitiv auf einem Referenzsystem. Es gibt jedoch keine geeigneten Methoden, um Personen im Cost Engineering bei der Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen (RSE) zu unterstützen. Effizienzsteigerungen durch die Anwendung des Modells SGE – Systemgenerationsentwicklung wurden bereits für verschiedene Bereiche der Produktentwicklung bewiesen (Abschnitt 2.1.2). Das Verständnis des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung gilt neben Produkten auch für Produktionssystemen.

Diese Arbeit soll auf zwei Ebenen einen Beitrag zum Produkt-Produktions-CoDesign leisten. Zum einen auf der Ebene der Technologiekettenerstellung, in der bisherige Methoden, Prozesse und Tools das in den Unternehmen bereits vorhandene Wissen nicht konsequent einsetzen. Zum anderen für die Informationsbereitstellung für prozessspezifische, detaillierte Herstellkostenschätzungen.

Für die Umsetzung können semantische Technologien verwendet werden. Diese finden bereits Anwendung in verschiedenen Bereichen der Produktentwicklung. Allerdings sind diese nicht uneingeschränkt auf das Cost Engineering übertragbar. Domänenspezifische Ontologien bieten einen hohen Detailgrad. Diese werden meist von in einer Domäne erfahrenen Personen zusammen mit in der Erstellung von Ontologien erfahrenen Personen entwickelt (Staab & Studer, 2009). Es existieren bereits Ontologien und Wissensgraphen im Bereich des Cost Engineering. Diese sind jedoch nicht dafür geeignet Produktinformationen auf der Ebene von Wirkflächen im Sinne des C&C²-Ansatzes maschinenlesbar zu modellieren und mit der Fertigung auf Ebene von einzelnen Prozessschritten zu verknüpfen. Diese Anforderungen sollte eine auf Herstellkostenschätzungen angepasste Cost Engineering Ontologie erfüllen.

Ein allgemeines Defizit von existierenden Unterstützungen des Cost Engineering ist die fehlende Evaluierung. In der Regel wird lediglich die allgemeine Anwendbarkeit evaluiert. Studien mit erfahrenen Personen aus dem Cost Engineering finden sich jedoch nicht. Dies erschwert eine strukturierte Bewertung der Anwendbarkeit und Eignung existierender Methoden und Tools.

3.2 Ziel der Arbeit und Forschungsthese

Auf Basis der Forschungslücke und des Forschungsbedarfs wird das Ziel dieser Arbeit folgendermaßen definiert:

Ziel der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, die Herstellkostenschätzung durch die Verwendung von semantischen Technologien zur Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für Getriebekomponenten der Elektromobilität zu unterstützen. Dafür soll eine Unterstützung entwickelt und deren Einfluss auf die Profitabilität durch den benötigten Zeitaufwand, die Transparenz und das verfügbare Wissen in der Herstellkostenschätzung untersucht werden.

Das Ziel der Arbeit basiert auf einer Forschungsthese. Diese stellt eine zentrale Annahme dar auf der diese Arbeit aufbaut und lautet wie folgt:

Forschungsthese

Die gezielte Verwendung von semantischen Technologien zur Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE führt zu einer Steigerung der Profitabilität bei Getriebekomponenten der Elektromobilität.

3.3 Forschungsfragen

Die Forschungsfragen strukturieren die Forschungsthese weiter in drei Abschnitte mit je zwei Fragen und operationalisieren damit das Ziel der Arbeit.

FF1.1: Welche Informationen werden für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE benötigt?

FF1.2: Wie können für die Herstellkostenschätzung notwendige Informationen und Zusammenhänge modelliert werden?

FF2.1: Wie können semantische Technologien die Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für die Herstellkostenschätzung unterstützen?

FF2.2: Wie können Menschen bei der Anwendung der Methode in der Praxis am Beispiel von Getriebekomponenten für die Elektromobilität unterstützt werden?

FF3.1: Wie kann die entwickelte Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) validiert werden?

FF3.2: Welchen Effekt hat die Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) auf die Profitabilität durch Zeitaufwand, Transparenz und Wissensverfügbarkeit?

4 Forschungsmethodik

In diesem Kapitel wird zunächst das Forschungsvorgehen der Arbeit vorgestellt und die Erfolgsfaktoren der zu entwickelnden Unterstützung beschrieben. Anschließend werden verwendete empirische Methoden und die Forschungsumgebung erläutert.

4.1 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen der vorliegenden Arbeit lehnt sich an die Design Research Methodology (DRM) an. Diese wurde von Blessing und Chakrabarti (2009) für Forschende im Bereich der anwendungsorientierten Methodenforschung in der Produktentwicklung entwickelt. Die DRM beschreibt zur Strukturierung von Forschungsarbeiten eine grundlegende Struktur von vier Stadien:

- Die Klärung des Forschungsgegenstands beinhaltet die Analyse des Standes der Forschung und die Erarbeitung der Zielsetzung.
- Die Deskriptive Studie 1 (DS-I) beinhaltet meist empirische Analysen, um das Verständnis des Forschungsgegenstandes auszuweiten.
- Die Präskriptive Studie (PS) beinhaltet die Synthese von methodischen Unterstützungen für die Produktentwicklung und deren initiale Evaluation.
- Die Deskriptive Studie 2 (DS-II) beinhaltet in der Regel empirische Analyse, um entwickelte Unterstützungen zu evaluieren.

Weitergehend klassifizieren Blessing und Chakrabarti (2009) Forschungsarbeiten nach den durchlaufenden Stadien und deren Detailgrad. Sie unterscheiden sieben Arten von Forschungsarbeiten (Abbildung 4.1). Tiefergehende Ausführungen zu den Stadien der DRM finden sich in Blessing und Chakrabarti (2009) und Reinemann (2021).

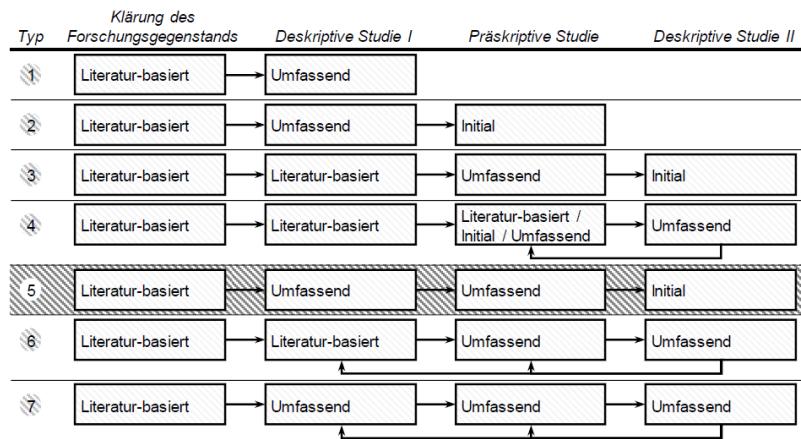


Abbildung 4.1: Sieben Typen von Forschungsarbeiten der Methodenforschung in der Produktentwicklung aus Reinemann (2021, S. 124) nach Blessing und Chakrabarti (2009, S. 18) und Einordnung der vorliegenden Arbeit als Typ 5

Das Forschungsvorgehen dieser Arbeit ist als Typ Nr. 5 klassifiziert und umfasst alle vier Stadien der DRM. Wobei die Klärung des Forschungsgegenstandes literaturbasiert, die DS-I und PS umfassend und die DS-II initial durchgeführt werden. Abbildung 4.2 stellt das Forschungsvorgehen dieser Arbeit nach den vier Stadien der DRM dar.

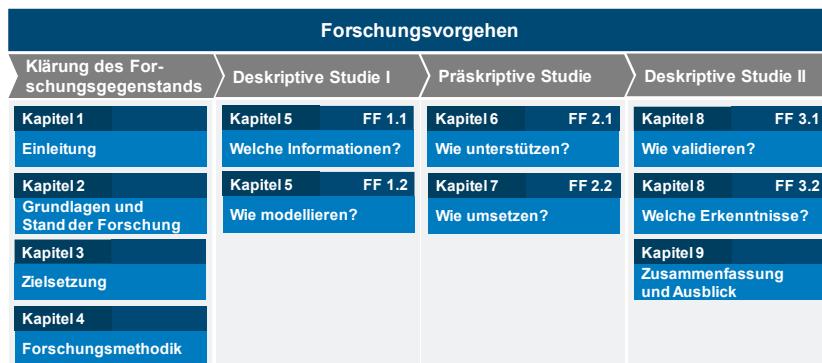


Abbildung 4.2: Forschungsvorgehen dieser Arbeit nach den Stadien der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009).

Die ersten vier Kapitel werden der Klärung des Forschungsgegenstands zugeordnet. Aufbauend auf dem Forschungsbedarf und der Forschungsthese werden je zwei Forschungsfragen (FF) der in Abschnitt 3.3 vorgestellten Forschungsfragen der DS-I, der PS und der DS-II zugeordnet. Dabei beantwortet die DS-I FF1.1 und FF1.2 in Kapitel 5. Die PS beantwortet FF2.1 in Kapitel 6 und FF2.2 in Kapitel 7. Und die DS-II beantwortet die FF3.1 und 3.2 in Kapitel 8 und beinhaltet als Abschluss eine Zusammenfassung und den Ausblick in Kapitel 9.

4.2 Intended Impact Model

Aufbauend auf den Forschungsfragen und dem abgeleiteten Forschungsvorgehen wird ein Intended Impact Model nach Blessing und Chakrabarti (2009) entwickelt (Abbildung 4.3). Es zeigt den beabsichtigten Einfluss der im Rahmen der PS entwickelten Unterstützung als Antwort auf FF2.1 und FF2.2. Der übergeordnete Erfolgsfaktor ist die Profitabilität eines Unternehmens, die für unternehmerischen Erfolg notwendig ist. Auf die Profitabilität wirken vier mit dem Cost Engineering verbundene Erfolgsfaktoren. Diese werden von den drei messbaren Erfolgsfaktoren Zeitaufwand, Transparenz und verfügbares Wissen beeinflusst. Die in dieser Arbeit zu entwickelnder Unterstützung wirkt sich auf die messbaren Erfolgsfaktoren aus, wobei in Bezug auf den Zeitaufwand die Automatisierung als Schlüsselefaktor betrachtet wird. Das Intended Impact Model wird mit Hilfe der DS-II (Kapitel 8) untersucht und mit den Ergebnissen in ein Actual Impact Model überführt.

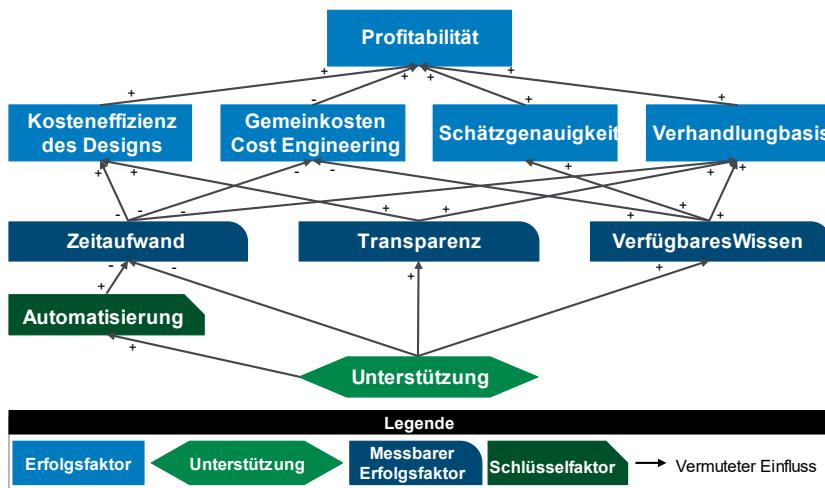


Abbildung 4.3: Intended Impact Model nach Blessing und Chakrabarti (2009). Übersetzte Darstellung aus Hellweg, Haneke, Cacaj, Rapp und Albers (2023, S. 382)

4.3 Überblick Forschungsmethoden

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Beantwortung der Forschungsfragen verschiedene Forschungsmethoden angewendet (Tabelle 4.1). Eine Begründung der Methodenwahl findet sich in den entsprechenden Kapiteln. Detaillierte Methodenbeschreibungen finden sich in Blessing und Chakrabarti (2009, S. 239–382) und Marxen (2014, S. 54–143) die zusätzlich auch einen Überblick über weitere Forschungsmethoden im Umfeld der Produktentwicklung geben.

Tabelle 4.1: In dieser Arbeit verwendete Forschungsmethoden nach Kapiteln.

Kapitel 5	<ul style="list-style-type: none">• Teilstrukturiertes Interview• Beobachtung
Kapitel 7	<ul style="list-style-type: none">• Delphi Methode
Kapitel 8	<ul style="list-style-type: none">• Question Method Matrix• Beobachtung• Teilstrukturiertes Interview• Fragebogen• Inhaltsanalyse

4.4 Forschungsumgebung

Als Forschungsumgebung dieser Arbeit dient ein dreijähriges Forschungsprojekt in der Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH. Ziel des Forschungsprojektes bei der Robert Bosch GmbH ist die Unterstützung des Cost Engineerings durch Automatisierung. Die allgemeinen frühen Phasen der Produktentwicklung werden häufig nicht näher konkretisiert. Die Frühe Phase der SGE hingegen endet definiert mit einem unter anderem hinsichtlich Kosten bewerteten Konzept. Da eben diese Bewertung im Fokus dieser Arbeit steht, steht die Frühe Phase der SGE im Fokus.

Die Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH arbeitet im Konzern übergreifend an verschiedenen Zukunftsthemen wie Mobilität, Automatisierung, Industrie 4.0, Konnektivität, künstlicher Intelligenz und Medizintechnik (Robert Bosch GmbH, 2023b; Baumann et al., 2019; Rezaei, Xiao, Gao, Li & Munir, 2018; Stürner et al., 2021; P.-W. Wang, Donti, Wilder & Kolter, 2019; P. Xu, Mei, Ren & Chen, 2017). Über 1700 Mitarbeitende arbeiten weltweit an 11 Standorten (Robert Bosch GmbH, 2023a).

Die Bosch-Gruppe ist ein international agierendes Technologie- und Dienstleistungsunternehmen. Es beschäftigt in ca. 60 Ländern über 400.000 Mitarbeitende. Es hat im Geschäftsjahr 2021 78,7 Mrd. € Umsatz in den vier Unternehmensbereichen Mobility Solutions, Industrial Technology, Consumer Goods und Energy and Building Technology erwirtschaftet. Die

Unternehmensbereiche sind wiederum in verschiedene Geschäftsbereiche unterteilt. Gegründet wurde das Unternehmen 1886 von Robert Bosch als *Werkstätte für Feinmechanik und Elektrotechnik* in Stuttgart (Robert Bosch GmbH, 2022).

Das Cost Engineering ist in verschiedenen Geschäftsbereichen und in der Forschung und Vorausentwicklung vorhanden. Die einzelnen Abteilungen und Gruppen sind über eine Cost und Benchmarking Organisation verknüpft. Diese fördert den Austausch, einheitliche Tools und ein standardisiertes Vorgehen bei Herstellkostenschätzungen. Für die Bearbeitung des Forschungsprojektes wurden mehr als 20 erfahrene Personen aus dem Cost Engineering der verschiedenen Bereiche einbezogen.

Der große Kostendruck im Markt der Elektromobilität macht ein effizientes Cost Engineering notwendig (Kampker et al., 2022). Ein wichtiger Bestandteil von elektrischen Antrieben ist das Getriebe. Hier kombinieren sich Fragestellungen bezüglich Übertragungsverlusten, Bauraum und NVH bei einer sehr angespannten Kostensituation. Getriebekomponenten von elektrischen Achsen besitzen zudem einen relevanten Kostenanteil und eine aufwendige mechanische Fertigung. Dies erfordert eine effiziente und detaillierte Kostenbetrachtung, weshalb diese im Rahmen der Arbeit betrachtet wird. Abbildung 4.4 zeigt die in dieser Arbeit betrachteten Komponenten. Die betrachteten Getriebekomponenten sind dabei nach Abbildung 2.17 gleichzeitig Komponenten und Bauteile.

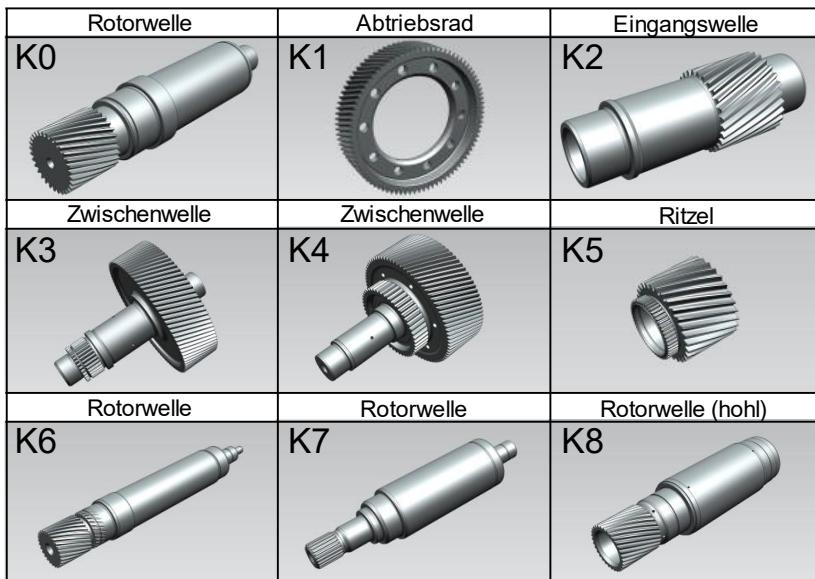


Abbildung 4.4: Im Rahmen der Arbeit untersuchte Getriebekomponenten von eAchsen (K0-K8).

4.5 Fazit

In diesem Kapitel wird ausgehend von der Zielsetzung ein Forschungsvorgehen entwickelt. Dieses bietet die Struktur für die folgenden Kapitel. Zusätzlich wird mit dem Intended Impact Model beschrieben, welche Wirkung durch eine zu entwickelnde Unterstützung auf verschiedene Erfolgsfaktoren erwartet wird. Übergeordnetes Ziel der über die Erfolgsfaktoren verknüpften Wirkkette ist die Steigerung der Profitabilität. Für die Umsetzung werden dafür in den einzelnen Kapiteln verschiedene Forschungsmethoden in einer realen Forschungsumgebung angewendet.

5 Analyse der Herstellkostenschätzung in der Praxis

In diesem Kapitel werden zunächst mithilfe einer Interviewstudie und einer teilnehmenden Beobachtung der Informationsbedarf in der Herstellkostenschätzung und Herausforderungen in der Bereitstellung untersucht (Abschnitt 5.1). Dazu wird die in Kapitel 3 eingeführte Forschungsfrage (FF) 1.1 beantwortet.

FF1.1: Welche Informationen werden für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE benötigt?

Auf Grundlage der benötigten Informationen und existierenden Herausforderungen aus der Praxis wird in Abschnitt 5.2 eine Ontologie für die Beschreibung der für Herstellkostenschätzungen notwendigen Produkt- und Fertigungsinformationen und deren Zusammenhänge vorgestellt FF1.2 beantwortet.

FF1.2: Wie können für die Herstellkostenschätzung notwendige Informationen und Zusammenhänge modelliert werden?

Abbildung 5.1 zeigt einen Überblick über das Forschungsvorgehen mit Fokus auf Fragestellungen, die in diesem Kapitel bearbeitet werden.

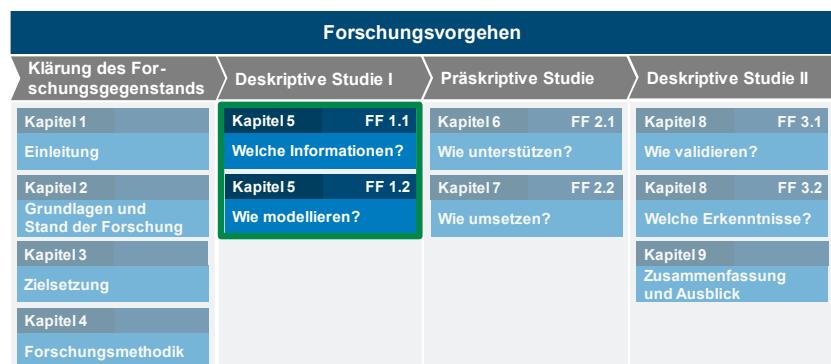


Abbildung 5.1: Überblick über das Forschungsvorgehen mit in Kapitel 5 zu bearbeitenden Fragestellungen.

5.1 Durchführung einer Interviewstudie und einer teilnehmenden Beobachtung

Durch die Deskriptive Studie sollen für die Herstellkostenschätzung benötigte Informationen und weitere Herausforderungen identifiziert werden.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Abschnitts wurden auf der *R&D Management Conference 2021 – Innovation in an Era of Disruption* veröffentlicht (Hellweg & Behrendt, 2021).

5.1.1 Studiendesign

Die Studie basiert auf der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009) und beinhaltet die Schritte einer umfassenden Deskriptiven Studie 1 (DS-I). Insgesamt wurden 22 semi-strukturierte Interviews geführt. Fünf Vorabinterviews dienen dabei der Validierung des Interviewleitfadens. Der Interviewleitfaden (Anhang A) beinhaltet sowohl offene als auch geschlossene Fragen. Die Interviewten (Tabelle 5.1) stammen aus drei großen Unternehmen mit mehr als 10.000 Mitarbeitenden.

Tabelle 5.1: Übersicht über Interviewte im Rahmen der Studie inkl. Vorabinterviews in Anlehnung an Hellweg und Behrendt (2021, S. 4).

#	Tätigkeitsfeld	Berufserfahrung in Jahren	Produktfokus
Pre1	Cost Engineering	>10	Elektronik
Pre2	Cost Engineering	>10	Blechbearbeitung
Pre3	Cost Engineering	5 - 10	Healthcare
Pre4	Konstruktion	>10	Getriebe
Pre5	Gruppenleitung	5 - 10	Sonstige
Int1	Konstruktion	1 - 5	Brennstoffzelle
Int2	Konstruktion	>10	E-Maschinen
Int3	Konstruktion	>10	Healthcare
Int4	Konstruktion	>10	Turbo-Maschinen
Int5	Konstruktion	>10	E-Maschinen
Int6	Konstruktion	>10	Turbo-Maschinen
Int7	Konstruktion	>10	Elektronik
Int8	Konstruktion	>10	Brennstoffzelle
Int9	Produktmanagement	1 - 5	Züge
Int10	Cost Engineering	1 - 5	Turbo-Maschinen
Int11	Projektleitung	5 - 10	Maschinen
Int12	Konstruktion	1 - 5	LKW-Antriebsstrang
Int13	Cost Engineering	1 - 5	Elektronik
Int14	Projektleitung	1 - 5	Healthcare
Int15	Forschung	1 - 5	Getriebe
Int16	Forschung	5 - 10	Getriebe
Int17	Cost Engineering	5 - 10	Maschinen

Tabelle 5.1 kann entnommen werden, dass zehn Interviewte mehr als zehn Jahre und insgesamt 15 mehr als fünf Jahre Berufserfahrung besitzen. Zudem kommen

die Interviewten aus verschiedenen Produkt- und Tätigkeitsfeldern. Dies ermöglicht einen tiefen und wertigen Einblick in die Herstellkostenschätzung aus verschiedenen Sichten.

Die teilnehmende Beobachtung wurde über den Zeitraum von über einem Jahr durch den Autor dieser Arbeit in der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) durchgeführt. Zusätzlich wurden regelmäßige Gespräche mit verschiedenen im Cost Engineering tätigen Entscheidungsträgern geführt.

5.1.2 Ergebnisse der Studie

Die Interviewten sehen bei Projekten mit einem starken Kostenfokus die Bereitstellung von verschiedenen Produkt- und Fertigungsinformationen als vorteilhaft. Je nach Tätigkeitsfeld im Produktentwicklungsprozess werden andere Informationen benötigt. In der Gesamtbetrachtung werden Toleranzen, die Fertigbarkeit, Prozessdetails, aber auch das Material oder Taktzeiten als Vorteilhaft eingeschätzt (Abbildung 5.2; Hellweg & Behrendt, 2021). Für die Bildung der Antwortkategorien werden die Antworten auf die offene Fragestellung analysiert und kategorisiert.

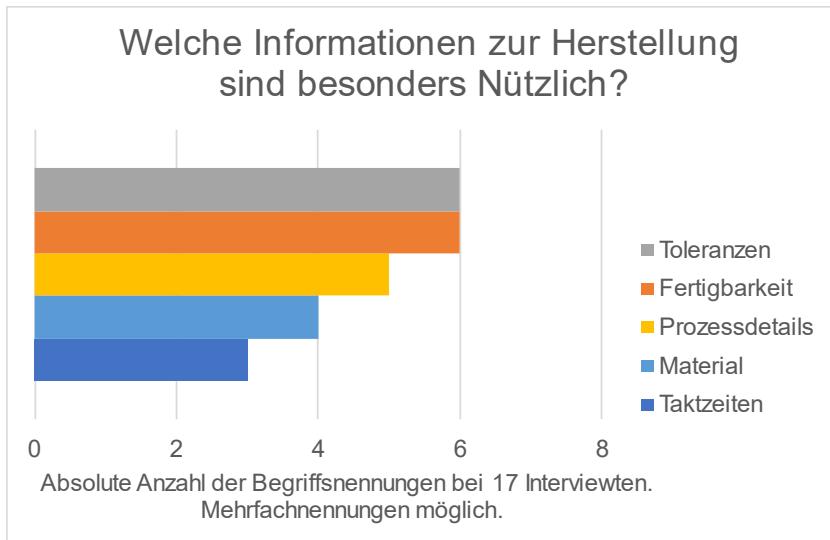


Abbildung 5.2: Nützliche Informationen zur Herstellung nach Hellweg und Behrendt (2021, S. 7).

Die in Abbildung 5.2 genannten Fertigungsinformationen sind von Bedeutung für die Entwicklung einer Unterstützung. Zusätzlich wird in der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) beobachtet, dass einige dieser Informationen in der Entwicklung vorhanden sind, jedoch nicht allen Nutzenden verfügbar. So sind die Toleranzen oder das Material in der Konstruktion arbeitenden Personen bekannt, während im Cost Engineering arbeitende Personen diese teilweise nicht zur Verfügung haben und aufwendig recherchieren müssen.

Für die Bereitstellung von Fertigungsinformationen, die zunächst nicht vorhanden sind, wird mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung (Abschnitt 2.1.2) die Bereitstellung von Fertigungsinformationen ähnlicher Produkte untersucht. Abbildung 5.3 stellt den Einfluss verschiedener Informationen auf Arbeitsergebnisse dar. Die Prozesskette und detaillierte Prozessinformationen werden am häufigsten als *sehr hilfreich* und *hilfreich* bewertet.

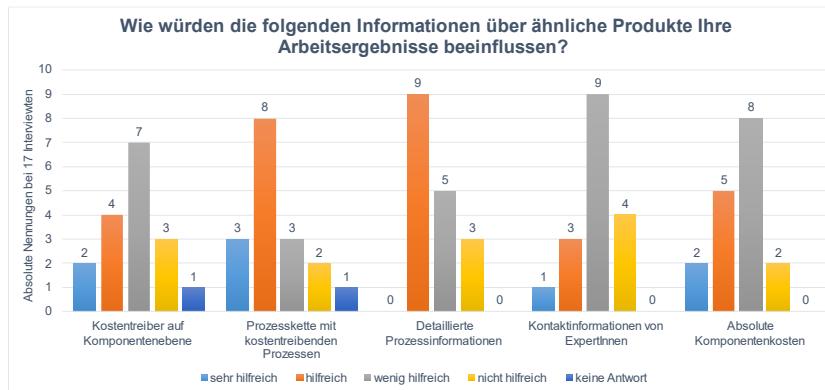


Abbildung 5.3: Einfluss auf Arbeitsergebnisse durch die Bereitstellung verschiedener Informationen nach Hellweg und Behrendt (2021, S. 9).

Die durch den Autor dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen in der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) stimmen mit den Ergebnissen der Studie überein. Am Rande der Interviewstudie wurde von verschiedenen Beteiligten ein Automatisierungsbedarf geäußert, dem aktuell teilweise nicht standardisierte und nicht maschinenlesbare Produkt- und Fertigungsinformationen entgegenstehen. So werden Informationen unter anderem in der Form von Bildern, Präsentationen, Excel Tabellen, E-Mails, oder Notizen gespeichert.

5.1.3 Zwischenfazit

In der Interviewstudie werden verschiedene für die Herstellkostenschätzung relevante Informationen identifiziert. Diese Erkenntnisse werden durch die Erfahrungen aus der teilnehmenden Beobachtung in der Forschungsumgebung bestätigt. So werden Fertigungsinformationen wie Prozessketten und detaillierte Prozessinformationen von ähnlichen Produkten von einer Mehrheit der Teilnehmenden als sehr hilfreich und hilfreich bewertet. Die Informationen dieser ähnlichen Produkte sind Teil der Referenzsystemelemente im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers (Abschnitt 2.1.2). Fertigungsinformationen von ähnlichen Produkten können somit als Grundlage für eine auf Referenzsystemelementen aufbauenden Unterstützung im Cost Engineering dienen. (Hellweg & Behrendt, 2021)

Weiterhin wird ein Defizit beim Wissenstransfer identifiziert. Informationen, die von einem Stakeholder bereits definiert wurden, sind anderen nicht verfügbar. Beispiele

sind das Material oder Toleranzen einer Komponente, welche von Konstruierenden festgelegt wurden, im Cost Engineering jedoch nicht zur Verfügung stehen. Festgestellt wird auch, dass nicht nur die eigentlichen Informationen, sondern auch deren Zusammenhänge relevant sind.

5.2 Entwicklung einer Ontologie für die Beschreibung der Zusammenhänge in der Herstellkostenschätzung

In diesem Kapitel wird als Antwort auf FF1.2 eine Ontologie entwickelt, mit Hilfe derer die für die Herstellkostenschätzung notwendigen Informationen und Zusammenhänge zwischen Komponenten und deren Fertigung modelliert werden können. Gleichzeitig leistet die Ontologie durch die Beschreibbarkeit der Zusammenhänge zwischen Produkt und Fertigung einen Beitrag zur interdisziplinären Zusammenarbeit im Sinne des Produkt-Produktions-CoDesigns (Abschnitt 2.1.7). Durch die formale, explizite Spezifikation der Ontologie ist zudem eine Maschinenlesbarkeit gegeben. Die Ontologie für die Beschreibung der Zusammenhänge in der Herstellkostenschätzung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *Cost Engineering Ontologie* bezeichnet.

Die Grundlegenden Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Abschnitts wurden auf der *32nd CIRP Design Conference – Design in a changing world* (Hellweg, Brückmann, Beul, Mandel & Albers, 2022) und bei dem *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2023* (Hellweg, Haneke et al., 2023) veröffentlicht. Diese waren teilweise Gegenstände von durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten Abschlussarbeiten (Brückmann, 2021; Haneke, 2022; Cacaj, 2022)¹.

5.2.1 Vorgehen

Die für die Herstellkostenschätzung benötigten Informationen und Zusammenhänge wurden aufbauend auf dem vorangegangenen Abschnitt im Rahmen der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) iterativ mit verschiedenen Fachexperten (Tabelle 5.2) und Abschlussarbeiten (Brückmann, 2021; Haneke, 2022; Cacaj,

¹ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

2022)² erarbeitet. Erfahrungen aus der Umsetzung in Prototypen haben zusätzlich auf die Weiterentwicklung der Ontologie Einfluss genommen.

Tabelle 5.2: Übersicht über beteiligte Personen mit Erfahrung im Cost Engineering.

#	Tätigkeitsfeld	Berufserfahrung in Jahren	Produktfokus
Exp1	Cost Engineering	>10	Elektronik
Exp2	Cost Engineering	>10	Brennstoffzelle
Exp3	Cost Engineering	5-10	Healthcare
Exp4	Cost Engineering	>10	Elektromotor
Exp5	Cost Engineering	>10	Getriebe

Weiterhin werden reale Informationen von Getriebekomponenten von eAchsen für die Analyse verwendet (Abschnitt 4.4). So wird der Zusammenhang zwischen Herstellverfahren und dem Produkt über Wirkflächen (im Sinne des C&C²-Ansatzes, Abschnitt 2.2.8) analysiert. Abbildung 5.4 zeigt diesen Zusammenhang. Für die Verbindung zwischen Komponente und Prozesskette wird ein Bedarf für detaillierte Informationen festgestellt. Die verwendeten Konzepte dienen dem Verständnis und der Beschreibungsfähigkeit und werden im folgenden Abschnitt eingeführt.

² Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

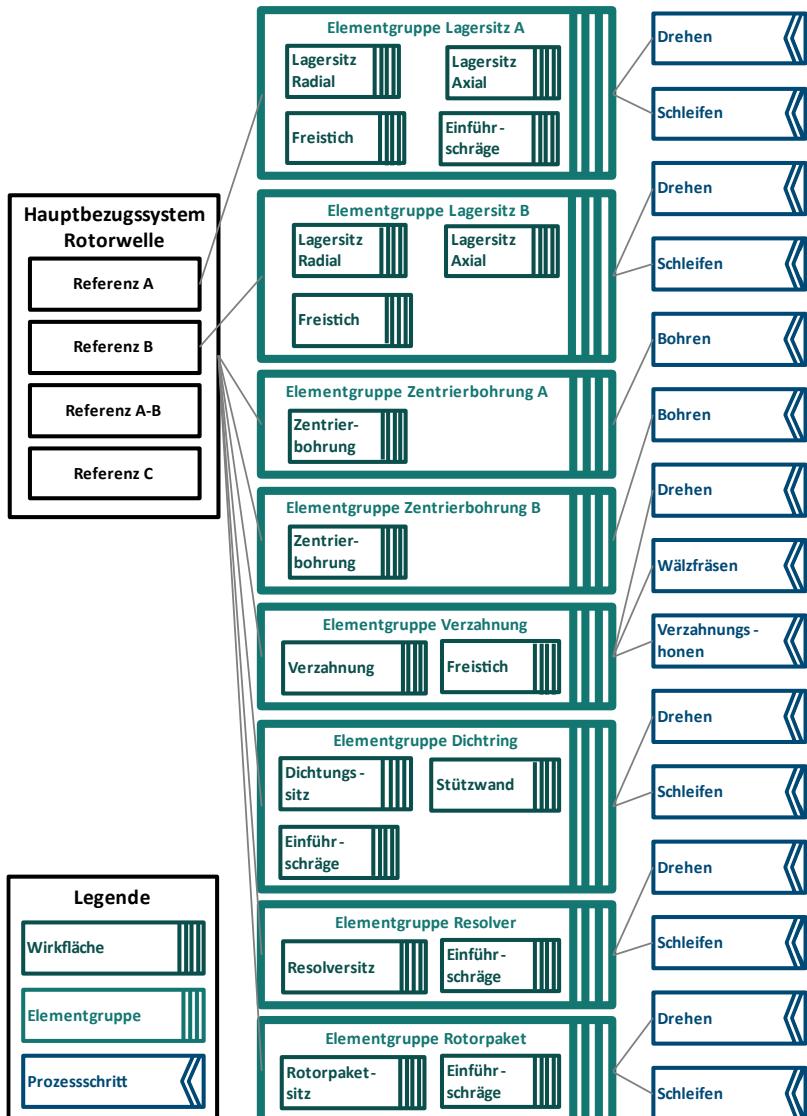


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen der Rotorwelle K0 und einer möglichen Fertigung verknüpft über Wirkflächen.

5.2.2 Elemente und Struktur

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass die in der Regel über die Funktion hergeleitete Wirkfläche als Bindeglied zwischen Komponente und Fertigung dient, wird eine Ontologie entwickelt. Abbildung 5.5 gibt eine Übersicht über die Konzepte für Komponente und Fertigung der Ontologie in Anlehnung an Hellweg und Haneke et al. (2023), die nachfolgend beschrieben werden.

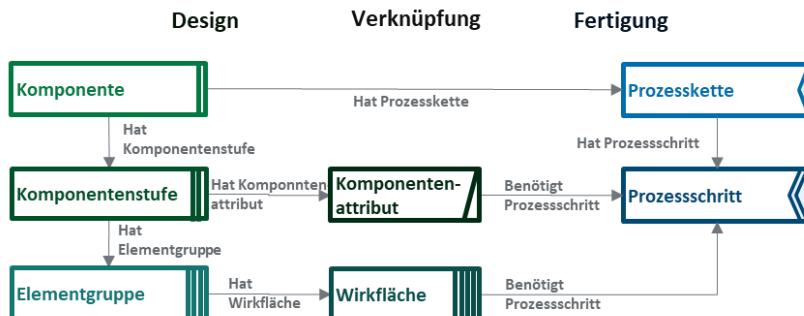


Abbildung 5.5: Übersicht über die wichtigsten Konzepte der Ontologie für die Beschreibung der für die Herstellkostenschätzung benötigten Zusammenhänge zwischen Komponenten und deren Fertigung. Aktualisierter und übersetzter Stand aus Hellweg und Haneke et al. (2023, S. 6).

- Eine **Komponente** ist nach Krause et al. (2021) die kleinste zu betrachtende Einheit in der Produktarchitektur. Komponenten können dabei aus einem oder mehreren Bauteilen oder einer Baugruppe bestehen (Abbildung 2.17). Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Getriebekomponenten (Abschnitt 4.4) bestehen aus einem Bauteil.
- Eine **Komponentenstufe** ist ein Konzept, um unterschiedliche Fertigungszustände einer Komponente beschreiben zu können. So können in der spanenden Bearbeitung von Getriebewellen Zustände nach den verschiedenen Prozessschritten beschrieben werden. Z. B. Rohmaterial, gedrehte Welle, gehärtete Welle, Fertigteil.
- Eine **Elementgruppe** ist eine Menge von Wirkflächen, die einer Produktfunktion zugeordnet werden können. Zu beachten ist dabei, dass die Funktion im Sinne des C&C²-Ansatzes nicht durch die Wirkflächen der Elementgruppe allein, sondern nur unter Beteiligung mindestens einer weiteren Komponente und deren Wirkflächen erfüllt werden kann. Ein Beispiel ist die Elementgruppe *Lagersitz* der Rotorwelle *K0* mit den Wirkflächen *Lagersitz Radial*, *Lagersitz Axial* und *Freistich* in Abbildung

5.6. Für die Funktionserfüllung wird zusätzlich ein montiertes Lager benötigt.

- Eine **Wirkfläche** ist nach Matthiesen (2021) eine Oberfläche eines festen Körpers oder eine generalisierte Grenzfläche von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise in Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche steht. Im Fokus dieser Arbeit stehen dabei Oberflächen fester Körper, welche aus Geometrieelementen im Sinne der Geometrischen Produkt Spezifikation bestehen. Diesen können Eigenschaften wie z. B. Toleranzen oder Verzahnungsinformationen zugeordnet werden können.

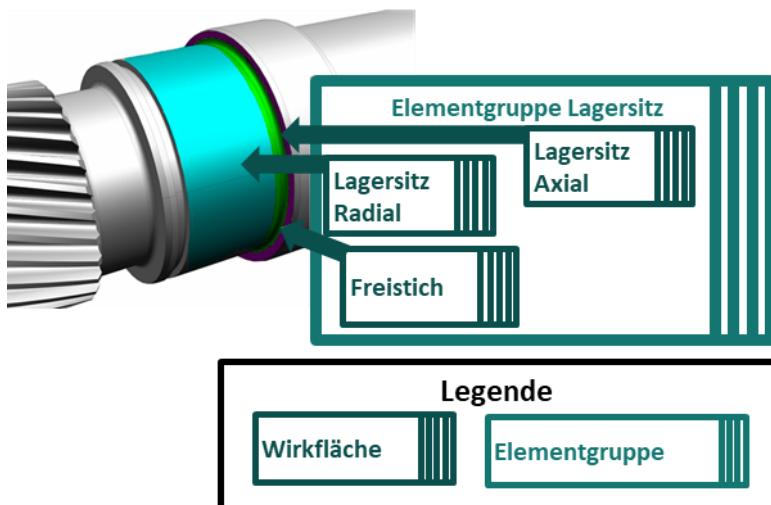


Abbildung 5.6: Lagersitz der Rotorwelle *K0* als Elementgruppe mit Wirkflächen in Anlehnung an Hellweg et al. (2022, S. 248).

- Ein **Komponentenattribut** ist eine übergeordnete Eigenschaft der Komponentenstufe, die für die vollständige Beschreibung der Komponente erforderlich ist. Beispiele sind das Volumen, die Masse und das Material einer Komponente.
- Eine **Prozesskette** ist in Anlehnung an Abbildung 2.16 eine Fertigungsmittelbezogene Betrachtungsweise von Fertigungsprozessen. Dabei werden Prozessschritte sequenziell aneinandergereiht. Häufig existieren verschiedene mögliche Prozessketten für eine Komponente. Abbildung 5.7 stellt einen Ausschnitt einer möglichen Prozesskette der Rotorwelle *K0* mit Details zu einem Prozessschritt dar.
- Ein **Prozessschritt** beschreibt analog zu der Prozesskette die Fertigung von Komponenten mit einem Fertigungsmittel. Beispielsweise werden

verschiedene Drehbearbeitungen, die hintereinander auf einer Drehmaschine durchgeführt werden als ein Prozessschritt betrachtet. Ein Prozessschritt ist somit ein Bestandteil einer Prozesskette.

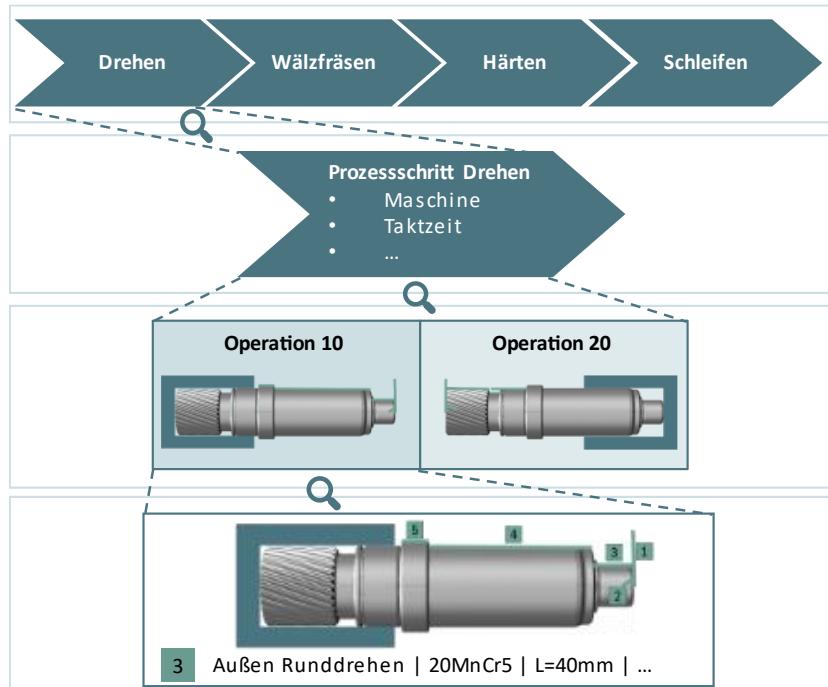


Abbildung 5.7: Das Konzept der Prozesskette am Beispiel eines Ausschnitts einer Prozesskette der Rotorwelle *K0* mit Fokus auf dem Prozessschritt Drehen und dazugehörigen Prozessdetails. Angepasste, übersetzte Darstellung aus Hellweg et al. (2022, S. 248).

5.2.3 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wird eine Ontologie vorgestellt, durch deren Einsatz der Zusammenhang von Komponenten und Fertigung modelliert werden kann. Eine Modellierung der Komponente wird durch die Konzepte Komponente, Komponentenstufe, Elementgruppe, Wirkfläche und Komponentenattribut realisiert. Diese können über semantische Beziehungen untereinander, aber auch mit Konzepten der Fertigung verknüpft werden. Die Konzepte der Fertigung sind die

Prozesskette und der Prozessschritt. Durch den formalen, expliziten Charakter der Ontologie, ist zudem eine eindeutige und maschinenlesbare Beschreibung möglich.

Sollen Herstellkostenschätzungen eine hohe Genauigkeit aufweisen und kostentreibende Funktionen und Prozesse identifiziert werden, ist die Modellierung der zugrundeliegenden Zusammenhänge hilfreich. Soll beispielsweise ein kostentreibender Schleifprozess vermieden werden, ist es vorteilhaft, die damit verknüpften Wirkflächen zu kennen. Der hohe Detailgrad auf Wirkflächenebene ist von entscheidender Bedeutung. Die Wirkflächen sind an der Erfüllung von Funktionen beteiligt und bestimmen damit maßgeblich die Fertigung. Das Ziel der Entwicklung ist häufig eine Funktionalität auf Produkt ebene, welche über die Wirkflächen auf die Komponenten heruntergebrochen werden kann. Die Ontologie ist somit eine mögliche Antwort auf FF1.2.

5.3 Fazit zur Herstellkostenschätzung in der Praxis

In diesem Kapitel werden verschiedene für die Herstellkostenschätzung relevante Informationen und Defizite in deren Verfügbarkeit identifiziert. Insbesondere eine verbesserte Bereitstellung von Produkt- und Fertigungsinformationen, wie Toleranzen, Fertigbarkeit, Prozessketten und detaillierte Prozessinformationen wird positiv bewertet. Ein wichtiges Defizit ist die geringe Verknüpfung von Produkt- und Fertigungsinformationen. Diese Informationen und Zusammenhänge sollten einfach zugreifbare Bestandteile der Referenzsystemelemente im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers sein, um das Cost Engineering bei Herstellkostenschätzungen zu unterstützen. Wichtig dafür ist eine Überwindung von Domänengrenzen im Sinne des Produkt-Produktions-CoDesigns (Abschnitt 2.1.7) und eine strukturierte und maschinenlesbare Speicherung der Informationen und Zusammenhänge.

Mit Hilfe der Ontologie können die Zusammenhänge zwischen Komponenten und Fertigung maschinenlesbar modelliert werden. Sie bietet damit die Grundlage dafür, die Zusammenhänge zu dokumentieren und Entwickelnden auf Basis ähnlicher Komponenten passende Referenzsystemelemente zur Verfügung zu stellen. Von Bedeutung für die Modellierung ist der Detailgrad, insbesondere mit den an der Funktionserfüllung beteiligten Wirkflächen. Darauf aufbauend wird im Folgenden eine Methode entwickelt, die die Anwendung der Ontologie im Kontext der Herstellkostenschätzung ermöglicht.

6 Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung

Aufbauend auf den Ergebnissen des vorherigen Kapitels, wird in diesem Kapitel die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung entwickelt. Die Methode stellt den ersten Teil der Präskriptiven Studie dar und bildet die Grundlage für den Funktionsdemonstrator (Kapitel 7). Geführt durch Forschungsfrage (FF) 2.1 verfolgt die Methode das Ziel, bei der Durchführung der Herstellkostenschätzung von Komponenten zu unterstützen (Abbildung 6.1).

FF2.1: Wie können semantische Technologien die Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für die Herstellkostenschätzung unterstützen?

Forschungsvorgehen				
Klärung des Forschungsgegenstands	Deskriptive Studie I		Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
Kapitel 1 Einleitung	Kapitel 5 Welche Informationen?	FF 1.1	Kapitel 6 Wie unterstützen?	FF 2.1
Kapitel 2 Grundlagen und Stand der Forschung	Kapitel 5 Wie modellieren?	FF 1.2	Kapitel 7 Wie umsetzen?	FF 2.2
Kapitel 3 Zielsetzung				Kapitel 8 Wie validieren?
Kapitel 4 Forschungsmethodik				Kapitel 8 FF 3.2 Welche Erkenntnisse?
				Kapitel 9 Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 6.1: Überblick über das Forschungsvorgehen mit der in Kapitel 6 zu bearbeitenden Fragestellung.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Kapitels wurden auf dem *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2023 SSP 2023 – Produktentwicklung in volatilen Zeiten* vorgestellt und veröffentlicht (Hellweg, Haneke et al., 2023) und

waren teilweise Gegenstand zweier durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten Abschlussarbeiten (Haneke, 2022; Cacaj, 2022)¹.

6.1 Vorgehen

Die Methode wird aufbauend auf den Ergebnissen der Deskriptiven Studie 1 (DS-I) (Kapitel 5) iterativ entwickelt. In der DS-I wird die Frage bearbeitet, wie für Herstellkostenschätzungen notwendige Informationen und Wissen abgebildet werden kann. Bisher wird dies in der Regel im Kopf der Menschen, die Herstellkostenschätzungen erstellen oder in nicht maschinenlesbarer Form in Anwendungen wie *Teamcenter Product Cost Management* (Siemens Digital Industries Software, 2023), *OneNote* oder *Excel* gespeichert. Die Cost Engineering Ontologie (Abschnitt 5.2) bietet eine Möglichkeit, dieses Wissen über Komponenten, Prozessschritte und deren Zusammenhänge zu sichern. Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode stellt ein mögliches Vorgehen dar, wie die in der Ontologie gespeicherten Zusammenhänge für Herstellkostenschätzungen genutzt werden können.

Doch wie kann die Abbildung der Produkt- und Fertigungsinformationen und deren Zusammenhänge mit Hilfe der Ontologie nun in einer Herstellkostenschätzung genutzt werden? Dafür wird sich an der klassischen Durchführung von Herstellkostenschätzungen orientiert. Dazu können in der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) Beobachtungen angestellt und auf Erfahrungen von Personen im Cost Engineering zurückgegriffen werden. Zunächst wird die zu schätzende Komponente analysiert. Komponentenattribute, wie Material, Abmaße und zu erfüllende Funktionen sind relevant, jedoch häufig nicht direkt verfügbar. Ein enger Austausch mit Konstruierenden ist damit notwendig. Im nächsten Schritt wird versucht Referenzen zu finden. Dies läuft häufig unterbewusst basierend auf dem Erfahrungsschatz bereits kalkulierter Komponenten ab. Zum Teil wird aber auch persönlich oder via E-Mail nachgefragt, ob bereits eine ähnliche Komponente kalkuliert wurde. Sollte dies der Fall sein, wird versucht die nicht einheitliche Dokumentation zu verwenden und die Kalkulation entsprechend der Unterschiede der Komponenten anzupassen. Grundlage der Kalkulation ist in der Regel eine Prozesskette, welche alle relevanten Herstellprozesse enthält. Diese wird neu aufgestellt oder aus oben genannten Referenzen übernommen und angepasst. Anschließend wird versucht, für die einzelnen Prozessschritte den Kostenanteil zu

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

bestimmen. Der Detailgrad der Prozesskette aber vor allem der Prozessschritte unterscheidet sich je nach Phase, in der sich das Produkt befindet. In der Frühen Phase der SGE, in der auch an der Komponente Details fehlen können, wird in der Regel mit geringerem Detailgrad gearbeitet. Das bedeutet, das Komponentendesign mit der Anordnung der Wirkflächen und Komponentenattribute kann sich noch ändern. Zudem ist die Festlegung auf Ebene der Prozesskette vorläufig und weitere Prozessdetails sind häufig nicht definiert. In Serie befindliche Komponenten werden hingegen mit hohem Detailgrad und geringer Unsicherheit abgeschätzt. Das bedeutet, das Komponentendesign wurde freigegeben und eine oder mehrere Fertigungslinien wurden von Personen aus der Qualitätssicherung abgenommen und Prozessschritte einschließlich Prozessdetails bleiben konstant. Als nächster Schritt können Herstellkostenschätzungen durch ein Vier-Augengespräch geprüft werden. Abschließend werden Herstellkostenschätzungen an die Auftraggeber übergeben und in Ordnerstrukturen abgelegt.

Dieses Vorgehen kann zu großen Teilen mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers beschrieben werden. Produkte werden nicht auf dem weißen Blatt neu entwickelt, sondern basieren auf Variationen von Elementen eines Referenzsystems. Ebenso werden Herstellkostenschätzungen und damit das Aufstellen von Prozessketten und das Abschätzen von Prozessschritten durch Variationen von Elementen eines Referenzsystems erstellt. Die entwickelte Methode expliziert dieses referenzbasierte Vorgehen und gibt mit der Ontologie gleichzeitig die Grundlage für die Modellierung der Produkt- und Fertigungsinformationen und deren Zusammenhänge. Aufbauend auf der Ontologie wird ein Wissensgraph entwickelt. Dieser entsteht, indem mit Hilfe der Ontologie reale Komponenten der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) mit Produkt- und Fertigungsinformationen beschrieben werden. Die Instanzen der Komponenten im Wissensgraph enthalten somit auch Informationen wie diese hergestellt werden können und welchen Einfluss das Komponentendesign auf die Fertigung hat. Dies geschieht durch die Beschreibung von Prozessketten und die Verknüpfung zwischen Komponente und Fertigung über die Beziehungen zwischen Wirkflächen und benötigter Prozessschritte. Zusätzlich ist es möglich durch Wissensgraph-Anwendungen auf dieses Wissen automatisiert zuzugreifen. Aus der Kombination des bisherigen Vorgehens bei Herstellkostenschätzungen, dem Verständnis von Referenzsystemelementen in dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers und der Einbindung von Wissensgraphen ergibt sich die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung.

6.2 Methodenbeschreibung

Die Methode besteht aus sechs Schritten, die für eine Herstellkostenschätzung durchlaufen werden. Die Methode wird initial für im Cost Engineering erfahrene Menschen entwickelt, welche als Anwendende der Methode im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen. Die Methode ermöglicht eine schrittweise Automatisierung der Herstellkostenschätzung. Die einzelnen Methodenschritte können jedoch zwischen vollständig automatisiert und vollständig manuell ausgeprägt sein. Grundlegend für die Methode ist die Cost Engineering Ontologie (Abschnitt 5.2). Zusätzlich kann ein Wissensgraph implementiert werden. Der Wissensgraph als Datenlage bietet die Möglichkeit, Produkt- und Fertigungsinformationen früherer Produktgenerationen präzise abfragbar zu speichern. Somit dient ein Ausgangsdatensatz auf Basis bereits gefertigter Produktgenerationen als Basis für die Anwendung der Methode. Abbildung 6.2 zeigt die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung.

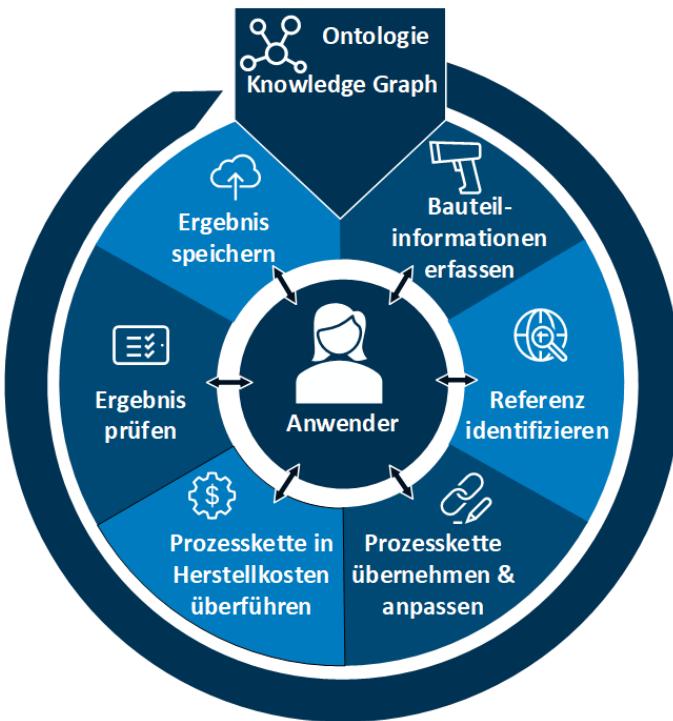


Abbildung 6.2: Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung nach Hellweg und Haneke et al. (2023, S. 6)

6.2.1 Bauteilinformationen erfassen

Um passende Referenzsystemelemente zu identifizieren, ist zunächst eine genaue Beschreibung der zu entwickelnden Komponente erforderlich. Dazu gehören zur Erfüllung der Funktion notwendigen Produktinformationen (z. B. Geometrie, Wirkflächen, Material). Die Informationen müssen für eine automatisierte Umsetzung in einer maschinenlesbaren und strukturierten Form, z. B. in einer Datenbank oder einem Wissensgraph, zugänglich sein. Für die Beschreibung eignen sich z. B. neutrale Datenformate wie STEP und JT oder native Datenformate von CAD-Anwendungen, die jedoch nur von bestimmten CAD-Anwendungen verwendet werden können.

6.2.2 Referenzsystemelemente identifizieren

Ziel dieses Methodenschritts ist die Identifikation von Referenzsystemelementen im Wissensgraph. Unter den Annahmen, dass ähnliche Komponenten auch in ähnlicher Weise gefertigt werden und ein Wissensgraph mit Komponenten und deren Prozessketten existiert, müssen hierfür ein oder mehrere ähnliche Komponenten identifiziert werden. Ähnliche Komponenten lassen sich dabei durch Ähnlichkeitskriterien identifizieren. Ähnlichkeitskriterien können z. B. auf Basis der Geometrie, der Funktion oder von Komponentenattributen ausgewählt werden. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Identifikation ähnlicher Funktionen gesetzt. Dafür werden Wirkflächen auf Komponentenebene verwendet. Diese ermöglichen ähnliche Komponenten zu identifizieren. Je nach geplantem Automatisierungsgrad werden spezifische Kriterien für Wissensgraph-Abfragen definiert oder die Verantwortung den durchführenden Personen übertragen.

6.2.3 Prozesskette übernehmen und anpassen

Im vorherigen Schritt identifizierte, ähnliche Referenzsystemelemente dienen nun als Ausgangspunkt für die Prozesskette der zu entwickelnden Komponente. Wenn z. B. durch die Verwendung eines Wissensgraphen eine Prozesskette einer ähnlichen Komponente vorhanden ist, kann diese direkt als Startpunkt dienen. Ist keine Prozesskette vorhanden, kann versucht werden diese Informationen zu recherchieren. Abweichungen der Komponentenattribute zwischen den Komponenten und deren Auswirkungen auf die Prozesskette können bei vorhandenem Wissen oder entsprechender Implementierung des Zusammenhangs in diesem Methodenschritt korrigiert werden. Zusätzlich benötigte Prozessschritte können hinzugefügt und unnötige entfernt werden. Dabei ist z. B. ein Vorgehen über die Gesamtgeometrie oder realisierte Funktionen denkbar. Sowohl automatisierte als auch manuelle Umsetzungen sind möglich. Referenzen in der Prozesskettenerstellung werden in Abschnitt 2.2.5 aufgeführt.

6.2.4 Prozesskette in Herstellkosten überführen

Zur Schätzung der Herstellkosten auf Basis der Prozesskette können prozessspezifische Herstellkostenmodelle verwendet werden. Die Verfügbarkeit und der Detailgrad der Produkt- und Fertigungsinformationen haben einen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses und den zu realisierenden Automatisierungsgrad. Durch die Aufteilung in zwei Ebenen, lassen sich prozessspezifische Modelle über verschiedene Produkte hinweg für die Berechnung von Herstellkosten verwenden.

Eine vollständig manuelle Schätzung auf Basis von Erfahrungen ist ebenfalls möglich.

6.2.5 Ergebnis prüfen

Aufgrund der rückwärtsgewandten Abfrage, statistischen Abweichungen und möglichen Fehlannahmen sind Ungenauigkeiten und Fehler bei der automatischen Erstellung der Prozesskette auf Basis von Referenzsystemelementen unvermeidbar. Daher sollte der Vorschlag auf Korrektheit und Plausibilität geprüft werden. Dies kann durch im Cost Engineering erfahrene Personen erfolgen. Darüber hinaus können alternative Werkzeuge zur Herstellkostenschätzung oder manuelle Herstellkostenschätzungen genutzt werden (Abschnitt 2.2), um auf Unstimmigkeiten zu prüfen und ggf. Korrekturen vorzunehmen. Zudem kann für die Überprüfung der Plausibilität von der Komponentenebene auf die Systemebene abstrahiert werden. So können die Kosten der Komponenten eines Systems addiert und die Summe mit vergleichbaren Systemen verglichen werden.

6.2.6 Ergebnis speichern

Nach dem Überprüfungsprozess kann die vorgeschlagene Prozesskette in Verbindung mit der Komponentenrepräsentation im Wissensgraphen oder einem anderen Medium gespeichert werden. Dadurch wird eine neue Referenz hinzugefügt, so dass der Wissensgraph und die Qualität der Ergebnisse während der Nutzungsphase kontinuierlich wachsen. Im vollständig manuellen Fall merkt sich der Anwendende das Ergebnis und erweitert so seinen Erfahrungsschatz.

6.3 Fazit zur Methode

Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4 stellen die sechs Methodenschritte Bauteilinformationen erfassen, Referenz identifizieren, Prozesskette übernehmen und anpassen, Prozesskette in Herstellkosten überführen, Ergebnis prüfen und Ergebnis speichern vereinfacht dar.

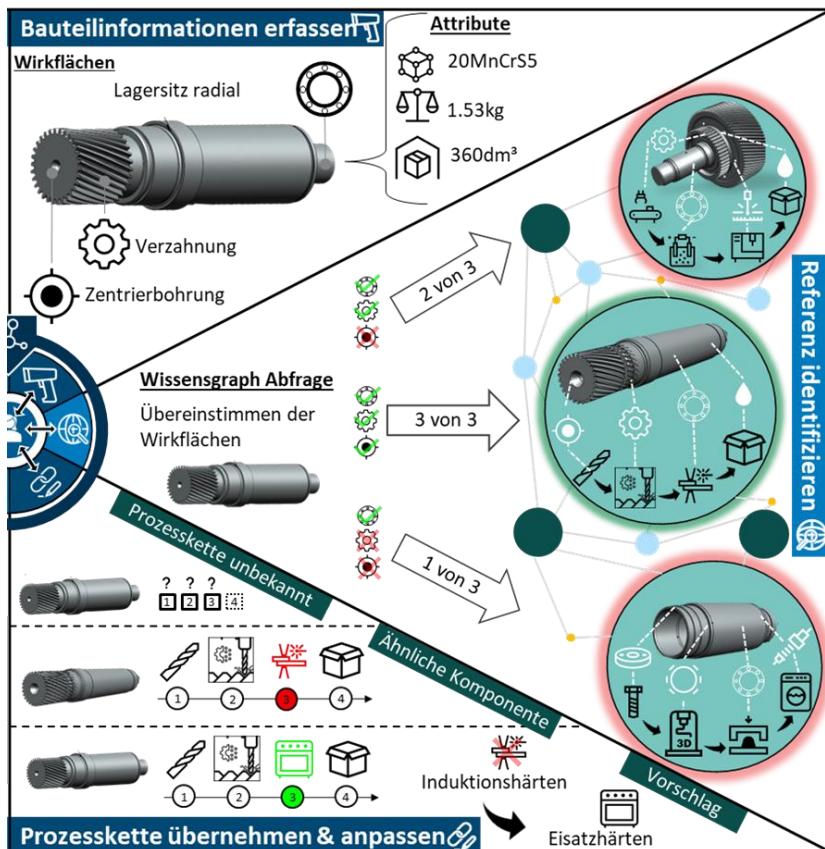


Abbildung 6.3: Schritte eins bis drei der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung. Detailabbildung nach Cacaj (2022, S. 38).

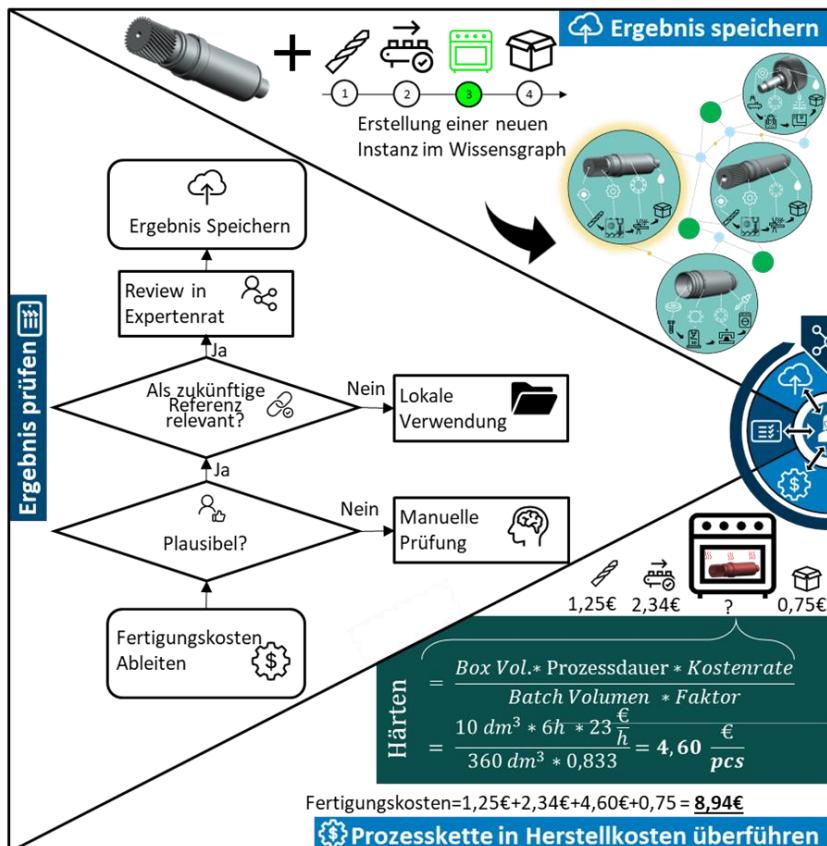


Abbildung 6.4: Schritte drei bis sechs der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung. Detailabbildung nach Cacaj (2022, S. 38).

Die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung integriert die Konzepte der Referenzsystemelemente sowie Ontologie und Wissensgraph als semantische Technologien in die Herstellkostenschätzung. Eine Herstellkostenschätzung kann mehrere Stunden in Anspruch nehmen, wenn der durchführenden Person keine geeignete Referenz bekannt ist. Die Zeit wird für das Sammeln von Informationen und Diskussionen mit Fachleuten verwendet, um Wissen über bestimmte Prozessschritte oder Komponententypen aufzubauen. Darüber hinaus benötigt die größtenteils manuelle Aufstellung der Prozesskette und detaillierte Berechnung der

Herstellkosten Zeit. FF2.1 wird durch die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung beantwortet, indem die Methode ein Vorgehen bereitstellt, welches Anwendende bei der Durchführung von Herstellkostenschätzung durch die Verwendung semantischer Technologien unterstützen kann. Dafür wird im Folgenden der Abstraktionsgrad durch die Entwicklung eines Funktionsdemonstrators reduziert.

7 Funktionsdemonstrator der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung

Um den hohen Abstraktionsgrad der Methode zu reduzieren und eine Evaluierung auf verschiedenen Abstraktionsgraden durchführen zu können, wird im Folgenden ein Funktionsdemonstrator der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung entwickelt. Der Funktionsdemonstrator wird als Softwareprototyp für die Situation und den Bedarf der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4) realisiert. In diesem Kapitel wird der Softwareprototyp detailliert vorgestellt, Defizite des Softwareprototyps betrachtet und eine initiale Evaluation durchgeführt. Damit wird eine Antwort auf Forschungsfrage (FF) 2.2 gegeben (Abbildung 7.1)

FF2.2: Wie können Menschen bei der Anwendung der Methode in der Praxis am Beispiel von Getriebekomponenten für die Elektromobilität unterstützt werden?

Forschungsvorgehen				
Klärung des For- schungsgegenstands	Deskriptive Studie I		Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
Kapitel 1 Einleitung	Kapitel 5 FF 1.1	Welche Informationen?	Kapitel 6 FF 2.1	Kapitel 8 FF 3.1
Kapitel 2 Grundlagen und Stand der Forschung	Kapitel 5 FF 1.2	Wie modellieren?	Kapitel 7 FF 2.2	Kapitel 8 FF 3.2
Kapitel 3 Zielsetzung			Wie unterstützen? Wie umsetzen?	Welche Erkenntnisse?
Kapitel 4 Forschungsmethodik				Kapitel 9 Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 7.1: Überblick über das Forschungsvorgehen mit der in Kapitel 7 zu bearbeitenden Fragestellung.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Kapitels wurden auf dem *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2023 SSP 2023 – Produktentwicklung in volatilen Zeiten* veröffentlicht (Hellweg, Haneke et al., 2023) und waren teilweise Gegenstand zweier durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten

Abschlussarbeiten (Haneke, 2022; Cacaj, 2022)¹. So wurde ein Großteil des Programmcodes basierend auf den Ideen und unter Anleitung durch den Autor dieser Arbeit als Bestandteil der Abschlussarbeit von Haneke (2022)² programmiert.

7.1 Softwareprototyp

Der Funktionsdemonstrator wird aufbauend auf den Ergebnissen der DS-I (Kapitel 5) und der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung (Kapitel 6) unter Einsatz semantischer Technologien entwickelt. Die Realisierung als Softwareprototyp erfolgt spezifisch für Getriebekomponenten von elektrischen Achsen aus der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4). Der Softwareprototyp soll die Erstellung von Herstellkostenschätzungen unterstützen. Dadurch wird eine Steigerung der Profitabilität, insbesondere durch die Reduzierung des Kalkulationsaufwandes, die Steigerung der Transparenz und die bessere Verfügbarkeit von Wissen erwartet. Ein Schlüsselfaktor dabei ist die Automatisierung der Schritte der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung. Der Softwareprototyp als Realisierung des Funktionsdemonstrators soll später eingesetzt werden, um die Funktionsweise der Methode durch Anwendung in der Forschungsumgebung besser verständlich und evaluierbar zu machen. Gleichzeitig steht die intuitive Nutzbarkeit nicht im Vordergrund, sondern das prinzipielle Demonstrieren einer möglichen Umsetzung der Funktionen. Zusätzlich können Erfahrungen bei der Entwicklung des Softwareprototyps gesammelt und ausgewertet werden.

Der Softwareprototyp orientiert sich an den sechs Schritten der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung und dient als Schnittstelle zwischen Anwendenden und der semantischen Wissensquelle (Abbildung 7.2). Im Ablauf einer Herstellkostenschätzung werden drei Interaktionen der anwendenden Person erwartet (STEP-Datei auswählen, manuelles bearbeiten der Prozesskette und das Ergebnis manuell Prüfen). Verknüpfte Wissensquellen für den Softwareprototyp sind der Wissensgraph in Stardog und prozessspezifische Kostenmodelle in Excel und Python.

¹ Co-betreute Abschlussarbeiten (unveröffentlicht)

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

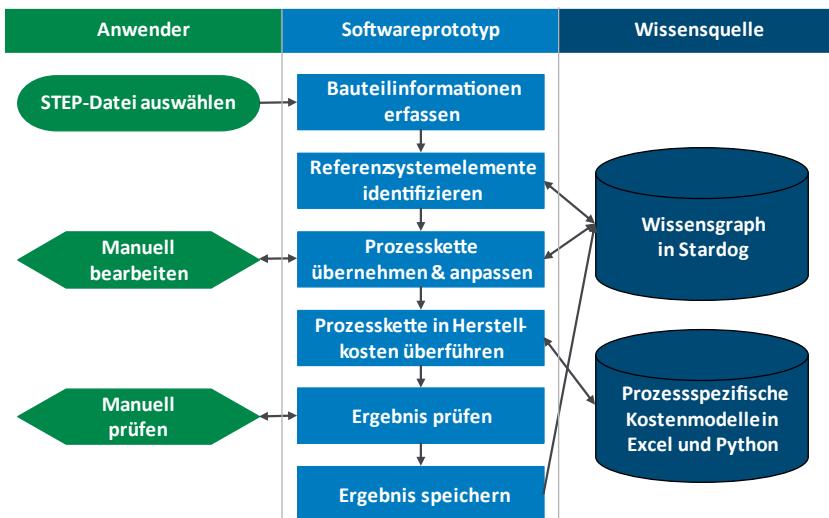


Abbildung 7.2: Aktivitätsdiagramm des Softwareprototyps in Anlehnung an Haneke (2022, S. 34)

Für die Entwicklung des Programmcodes wird die Programmiersprache Python (Python Software Foundation, 2023a) und die Programmierumgebung PyCharm (jetbrains, 2023) verwendet. Dabei wird mit dem tkinter-Paket (Python Software Foundation, 2023b) eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) für die Bedienung und Anzeige entwickelt, um die Einstiegshürde von anwendenden Personen zu verringern und die Abläufe im Softwareprototyp zu veranschaulichen. Zur leichteren Anwendbarkeit, auch im Rahmen der Validierungsstudie, wird der Softwareprototyp für die Anwendung zusätzlich in eine alleinstehende .exe Anwendung umgewandelt.

Die grafische Nutzeroberfläche (GUI) ist in vier Bereiche unterteilt (Abbildung 7.3):

- Die Menüleiste (1) dient der Bedienung des Programms. Sie ist in drei Untermenüs gegliedert. Diese dienen dem Dateimanagement (File), der Interaktion mit dem Wissensgraph (Query) und dem Bearbeiten des angezeigten Arbeitsstandes (Edit).
- Der Wirkflächenbereich (2) zeigt die identifizierten Wirkflächen der Komponente. Anwendende können mittels Drag-and-Drop die Reihenfolge ändern. Zusätzlich lassen sich weitere Wirkflächen anlegen und bearbeiten, sowie unpassende entfernen.
- Der Prozesskettenbereich (3) zeigt analog zu dem Wirkflächenbereich die verknüpften Prozessschritte. Dieser lässt sich ebenfalls mittels Drag-and-

Drop bearbeiten und zusätzliche Prozessschritte können angelegt, vorhandene bearbeitet und überflüssige entfernt werden. Auch kann der Zusammenhang zwischen Wirkfläche und Prozessschritt hier festgehalten werden.

- Der Ergebnisbereich (4) stellt die aufsummierten Prozesskosten, Materialkosten und die daraus resultierenden, abgeschätzten Herstellkosten dar.

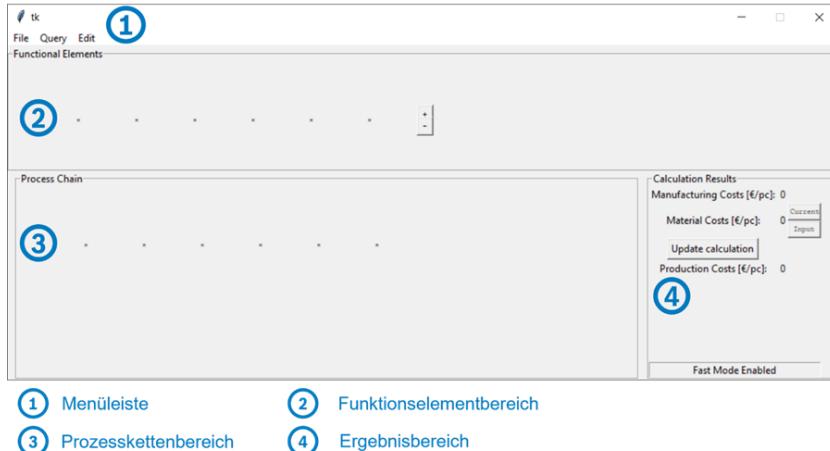


Abbildung 7.3: Vier Bereiche der graphischen Nutzeroberfläche (GUI) des Softwareprototyps aus Haneke (2022, S. 35).

Für die prototypische Implementierung wird auf der Ontologie von Hellweg et al. (2022) (Abschnitt 5.2) aufgebaut. Die Ontologie wird mit der Software TopBraid EDG (Topquadrant, 2023) erstellt und bearbeitet. Der Wissensgraph wird mit der Software Stardog (Stardog Union, 2023) instanziert. Der Wissensgraph bietet als Datenspeicher die Möglichkeit, Produkt- und Fertigungsinformationen, sowie deren Zusammenhänge von früheren Produktgenerationen abzufragen. Er kann über den Softwareprototyp mit dem Paket pystardog (Oliveira, Bresnahan & Nowell) abgefragt und bearbeitet werden. Auch Voltolini, Borsato und Peruzzini (2019) empfehlen die Benutzung von Stardog. Die detaillierte Beschreibung des Softwareprototyps erfolgt analog der Methodenbeschreibung (Abschnitt 6.2) an den einzelnen Methodenschritten.

7.1.1 Bauteilinformationen erfassen

Im Rahmen des Softwareprototyps werden die erforderlichen Produktinformationen einer neuen Komponente automatisch aus STEP-Dateien gelesen. Dafür wird das STEP Application Protokoll 242 (AP242) nach ISO 10303-242:2022-12 verwendet. Für die Erzeugung der 3D-Modelle werden CAD-Systeme verwendet. Die Spezifikation und Verifizierung der geometrischen Anforderungen erfolgt nach den Prinzipien der Geometrischen Produktspezifikation (ISO GPS, Abschnitt 2.2.6). Viele CAD-Systeme bieten einen Export als STEP AP242 an. Diese STEP-Dateien enthalten Produkt- und Fertigungsinformationen, die auch auf technischen Zeichnungen enthalten sind. Beispiele sind Form- und Lagetoleranzen oder Oberflächengüten (Abbildung 7.4).

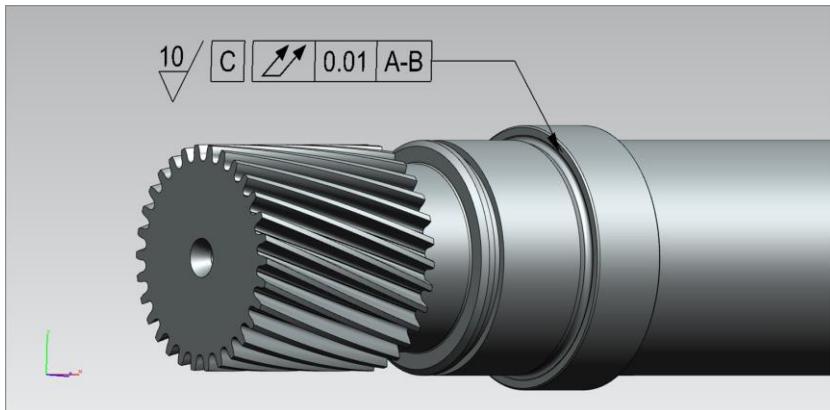


Abbildung 7.4: Darstellung der Wirkfläche Axialer Lagersitz der Rotorwelle K0 als Modellansicht im STEP-Format nach ISO 10303-242:2022-12 dargestellt über das Programm Teamcenter Visualization.

Eine Besonderheit der Methode und des Softwareprototyps ist, dass die benötigten Informationen strukturiert an die entsprechenden Wirkflächen angehängt werden. So ist es möglich über ein Dateidialogfenster des Softwareprototyps eine STEP-Datei auszuwählen (Abbildung 7.5), welche dann automatisch geöffnet und ausgelesen wird.

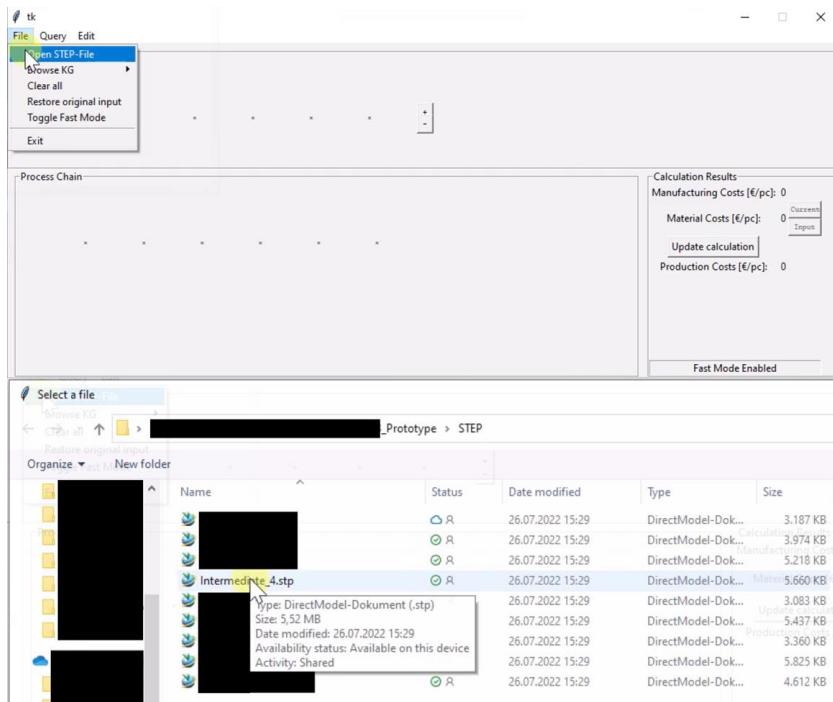


Abbildung 7.5: Einlesen einer STEP-Datei in den Softwareprototyp: Aufrufen des Dateidialogfensters aus dem Softwareprototyp (oben) und auswählen der STEP-Datei im Dateidialogfenster (unten).

Da die ISO 10303-242:2022-12 keine Modellierung von Wirkflächen vorsieht, werden diese im CAD-System als Ansichten (engl. Views) angelegt. Dadurch können die Wirkflächen direkt mit der entsprechenden Fläche verknüpft werden (Abbildung 7.6).

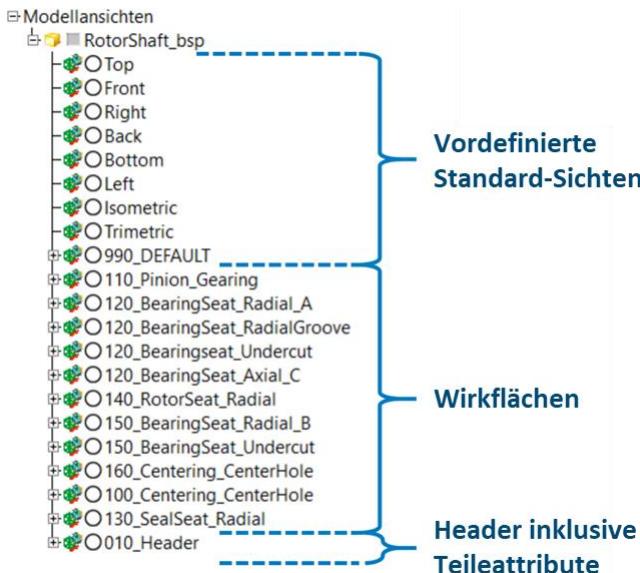


Abbildung 7.6: Darstellung der Wirkflächen der Rotorwelle K0 als Modellansichten im STEP-Format nach ISO 10303-242:2022-12 dargestellt über das Programm Teamcenter Visualization in Anlehnung an Haneke (2022, S. 42).

Darüber hinaus können weitere Informationen wie Oberflächengüten oder Toleranzen mit der Fläche und damit auch der Wirkfläche und Elementgruppe verknüpft modelliert und damit vollständig maschinenlesbar abgelegt werden. Neben den funktionsbezogenen Informationen auf Wirkflächenebene können weitere Informationen wie Material und Gewicht auf Komponentenebene hinterlegt werden (Abbildung 7.7).

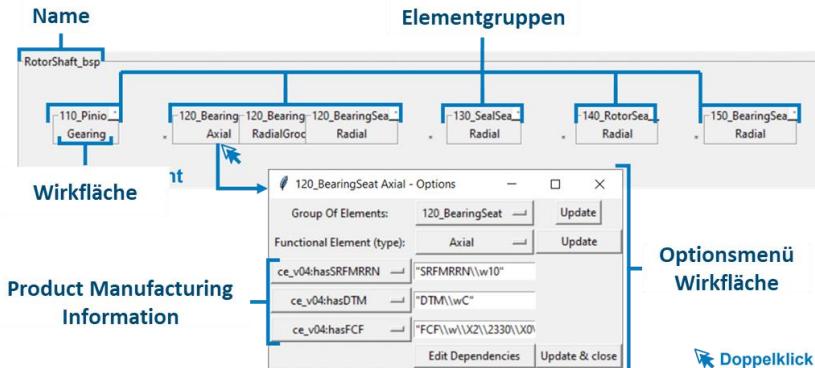


Abbildung 7.7: Detailmenü zur Konfiguration der Elementgruppen mit Wirkflächen am Beispiel des axialen Lagersitzes der Rotorwelle K0 in Anlehnung an Haneke (2022, S. 41).

7.1.2 Referenzsystemelemente identifizieren

Für den Softwareprototyp wird ausgehend von dem im Schritt zuvor eingelesenen STEP-Modell eine Abfrage (Query) des Wissensgraphen durchgeführt, um geeignete Referenzsystemelemente zu identifizieren. Als Ähnlichkeitskriterium wird die Anzahl der übereinstimmenden Wirkflächen nach dem C&C²-Ansatz (Abschnitt 2.2.8) verwendet. Ziel ist es die Prozesskette des Referenzsystemelements als Ausgangspunkt für die nächsten Schritte zu verwenden (Abbildung 7.8).

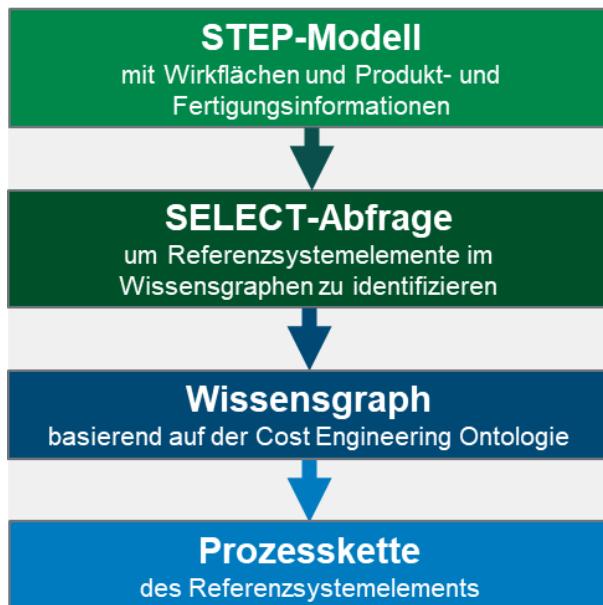


Abbildung 7.8: Einbettung der Wissensgraph-Abfrage in den Ablauf des Softwareprototyps.

Bei der Abfrage wird Stardog (Stardog Union, 2023) für die Verwaltung des Wissensgraphs und für den Zugriff verwendet. Als Sprache für die Abfrage wird SPARQL verwendet (Abschnitt 2.3.3). Die im Softwareprototyp verwendetene SPARQL-Abfrage ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Es handelt sich um eine SELECT-Abfrage deren Ergebnis eine Liste von Komponenten ist, die nach der Anzahl übereinstimmender Wirkflächen sortiert ist. Ausgewählt wird dann die Komponente mit den meisten übereinstimmenden Wirkflächen. Am Beispiel der Rotorwelle K0 wird die Rotorwelle K8 als am besten geeignetes Referenzsystemelement mit acht übereinstimmenden Wirkflächen ausgewählt.

```
SELECT ?Component (count(?Component) as ?count)
WHERE {
  :RotorShaft_4-temp ce_v04:hasComponentStage ?ComponentStage .
  ?ComponentStage ce_v04:hasGroupOfElements ?GroupOfElements .
  ?GroupOfElements a ?type .
  FILTER(?type != ce_v04:GroupOfElements && ?type != owl:Thing
    && ?type != ce_v04:AuxiliaryElement && ?type != ce_v04:FunctionalElement)
  ?GoE_result a ?type .
  ?newCompStage ce_v04:hasGroupOfElements ?GoE_result .
  ?Component ce_v04:hasComponentStage ?newCompStage .
  FILTER (?Component != :RotorShaft_4-temp)
}
GROUP BY ?Component
ORDER BY desc(?count)
```

Abbildung 7.9: SPARQL-Abfrage zur Identifikation geeigneter Referenzsystemelemente.

7.1.3 Prozesskette übernehmen und anpassen

Der Softwareprototyp verwendet eine DESCRIBE-Abfrage³, um relevante Produkt- und Fertigungsinformationen aus dem Wissensgraphen abzurufen. Abbildung 7.10 zeigt eine Teilmenge der Wirkflächen und der zugehörigen Prozesskette am Beispiel der Rotorwelle K0. Die hervorgehobene Wirkfläche Verzahnung (engl. Gearing) erfordert die hervorgehobenen Prozessschritte (Wälzfräsen, Härt(en), Honen). Würde die zu entwickelnde Komponente die Wirkfläche Verzahnung nicht enthalten, würden die entsprechenden Prozessschritte entfernt werden, sofern sie nicht auch zur Herstellung anderer Wirkflächen benötigt werden. Fehlt eine Wirkfläche aus der zu entwickelnden Komponente, wird der Wissensgraph nach einer ähnlichen Wirkfläche mit entsprechendem Prozessschritt durchsucht und diese dem Prozesskettenvorschlag hinzugefügt.

³ DESCRIBE-Abfrage: Bei einer DESCRIBE-Abfrage an einen Wissensgraphen werden Suchvariablen definiert und als Ergebnis ein RDF-Graph zurückgegeben.

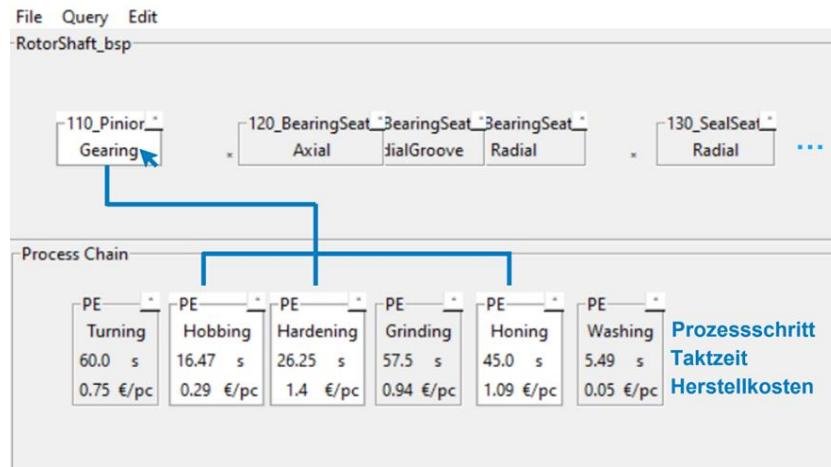


Abbildung 7.10: Teilmenge von Wirkflächen und verknüpften Prozessschritten der Rotorwelle K0. Hervorgehoben ist die Wirkfläche Verzahnung (Gearing), die mit den Prozessschritten Wälzfräsen (Hobbing), Härteln (Hardening) und Verzahnungshonen (Honing) verknüpft ist.

7.1.4 Prozesskette in Herstellkosten überführen

Innerhalb des Softwareprototyps wird ein modularer Ansatz für die Überführung der Prozesskette aus dem vorherigen Schritt in eine Herstellkostenschätzung umgesetzt (Abbildung 7.11). Verschiedene Prozesse werden in unterschiedlichem Detailgrad auf Basis einer Excel-Integration berechnet oder die Berechnung direkt in Python ausgeführt. Die Prozessmodelle für die verschiedenen Fertigungsprozesse sind dabei unterschiedlich detailliert.

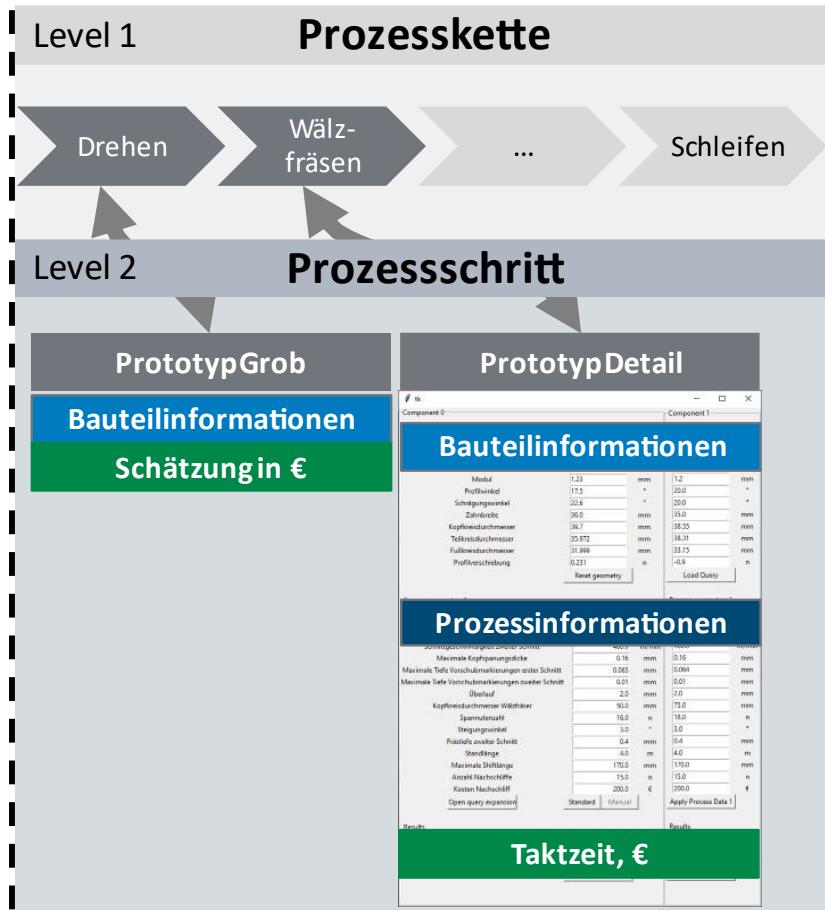


Abbildung 7.11: Modularer zweistufiger Ansatz bei dem die prozessspezifischen Herstellkosten aufbauend auf der Prozesskette in unterschiedlichem Detailgrad berechnet werden können.

Abbildung 7.12 stellt ein Modul für die Berechnung der Taktzeit und der Werkzeugkosten für Wälzfräsen dar, welches einen hohen Detailgrad besitzt und verschiedene Geometrie- und Fertigungsparameter als Eingabegrößen zulässt. Für die Schätzung der Fertigungskosten des Wälzfräsen stellt Abbildung 7.13 die Logik dar, wie die Taktzeit und die Werkzeugkosten zu der Berechnung der Fertigungskosten verwendet werden. Andere Prozessmodelle werden durch

einfache Berechnungen oder konstante Erfahrungswerte umgesetzt. Ein Beispiel hierfür ist der Prozessschritt des Reinigens, der einen geringen Anteil auf die Kosten der Komponente besitzt und deshalb nur grob abgeschätzt wird.

Component 0		Component 1	
Geometry parameters 0		Geometry parameters 1	
Name der Komponente	Alternative Name	Alternative Name	
Zähnzahl	27.0	n	30.0
Modul	1.23	mm	1.2
Profilwinkel	17.5	*	20.0
Schrägungswinkel	22.6	*	20.0
Zahnbreite	36.0	mm	35.0
Kopfkreisdurchmesser	39.7	mm	38.55
Teilkreisdurchmesser	35.972	mm	38.31
Fußkreisdurchmesser	31.999	mm	33.15
Profilverschiebung	0.231	n	-0.9
<input type="button" value="Reset geometry"/>		<input type="button" value="Load Query"/>	
Process parameters 0		Process parameters 1	
konstanter Zeitzusatz	10.0	s	10.0
Schnittgeschwindigkeit erster Schnitt	350.0	m/min	350.0
Schnittgeschwindigkeit zweiter Schnitt	460.0	m/min	460.0
Maximale Kopfspanungsdicke	0.16	mm	0.16
Maximale Tiefe Vorschubmarkierungen erster Schnitt	0.065	mm	0.064
Maximale Tiefe Vorschubmarkierungen zweiter Schnitt	0.01	mm	0.01
Überlauf	2.0	mm	2.0
Kopfkreisdurchmesser Wälzfräser	50.0	mm	75.0
Spannutenzahl	16.0	n	18.0
Steigungswinkel	3.0	*	3.0
Frästiefe zweiter Schnitt	0.4	mm	0.4
Standlänge	4.0	m	4.0
Maximale Shiftlänge	170.0	mm	170.0
Anzahl Nachschliffe	15.0	n	15.0
Kosten Nachschliff	200.0	€	200.0
<input type="button" value="Open query expansion"/>	<input type="button" value="Standard"/>	<input type="button" value="Manual"/>	<input type="button" value="Apply Process Data 1"/>
Results		Results	
Cycle time	26.27	s	32.98
Tool costs	0.14	€/piece	0.15
<input type="button" value="Recalculate"/>		<input type="button" value="Recalculate"/>	

Abbildung 7.12: Modul für die Berechnung der Taktzeit für den Prozess Wälzfräsen mit Verzahnungsparametern und Erfahrungswerten. Die Taktzeit und Werkzeugkosten werden im Softwareprototyp für die Berechnung der Herstellkosten weiterverwendet (Abbildung 7.13).

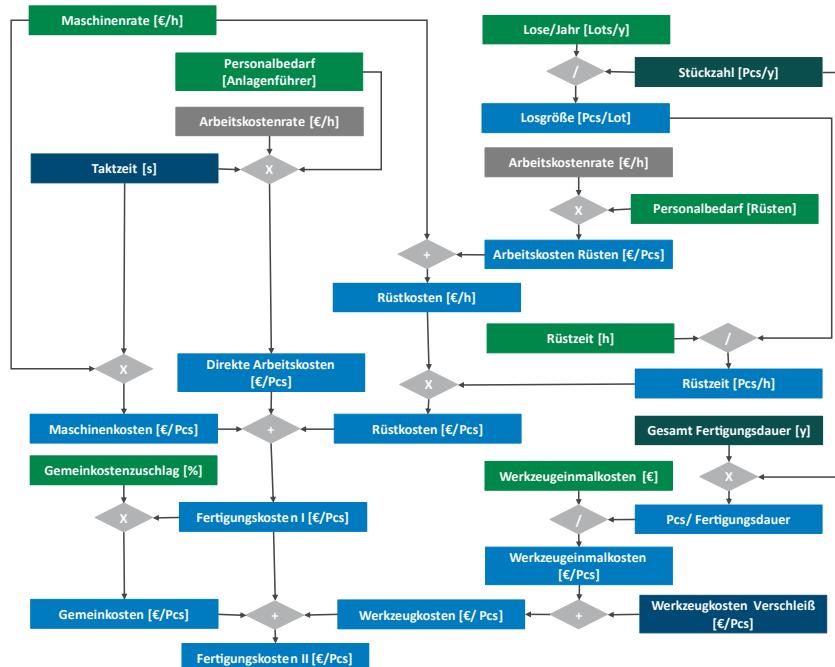


Abbildung 7.13: Logik für die Abschätzung von Fertigungskosten des Prozessschrittes Wälzfräsen. Dabei werden die Taktzeit und die Werkzeugkosten aus dem Modul für die Berechnung der Taktzeit für den Prozess Wälzfräsen (Abbildung 7.12) übernommen.

7.1.5 Ergebnis prüfen

Ein automatisierter Prüfschritt ist im Softwareprototyp nicht vorgesehen. Das Ergebnis soll durch die erfahrenen Bedienenden manuell auf Validität geprüft werden. Prüfkriterien können dabei unter anderem die allgemeine Fertigbarkeit, die Sinnhaftigkeit der Prozesskette oder die Plausibilität der resultierenden Kosten sein. Bei Zweifeln kann eine manuelle Herstellkostenschätzung, gegebenenfalls unterstützt durch Softwarelösungen wie z. B. Teamcenter Product Cost Management (Siemens Digital Industries Software, 2023) durchgeführt werden.

7.1.6 Ergebnis speichern

Der letzte Methodenschritt wird im Softwareprototyp durch eine Upload Funktion umgesetzt. Dafür wird das überarbeitete und geprüfte Ergebnis in das Resource Description Framework (RDF) umgewandelt und mit einer INSERT-Query in den Wissensgraph eingefügt. Anschließend können die Ergebnisse als Referenzsystemelemente identifiziert und verwendet werden. Der Umfang des Wissensgraphen steigt somit über die Nutzungszeit an. Die Funktion ist jedoch als optional zu betrachten, da nur valide Ergebnisse, z. B. nach Prüfen durch ein Prüfgremium in den Wissensgraphen aufgenommen werden sollten.

7.2 Defizite des Softwareprototyps

Aufgrund begrenzter Entwicklungskapazitäten weist der Softwareprototyp Defizite auf. Um einen besseren Überblick zu erhalten, wurde in einem Expertenworkshop eine zweistufige Delphi-Studie zur Kategorisierung und Bewertung der Defizite durchgeführt. Defizite stellen dabei Differenzen des Ist-Zustandes von dem Soll-Zustand einer ohne spezielle Begleitung anwendbaren Softwarelösung dar. Delphi-Studien sind geeignet, um belastbare Einschätzungen zu unklaren Sachverhalten zu generieren. Dazu geben Personen in einem mehrstufigen und anonymen Verfahren ihre Einschätzungen ab. (Häder, 2014) Tiefergehende Informationen zu Delphi-Befragungen finden sich in Häder (2014).

An der Delphi-Studie teilgenommen haben zwei an der Entwicklung des Softwareprototyp beteiligte Studierende, sowie zwei im Cost Engineering tätige Personen. Die Delphi-Studie wurde angewendet, um identifizierte Defizite zu bewerten.

Es werden sieben Defizite des Konzeptes (DK1-7), sieben Defizite der Umsetzung (DU1-7) und sechs Defizite der Anwendung (DA1-6) identifiziert und bewertet. Für die Bewertung werden drei Kategorien mit einer Skala von 1-4 verwendet:

- Tragweite des Defizits (1=geringe Auswirkung; 4=macht Ansatz komplett unbrauchbar)
- Lösungsnähe (1=Lösung absehbar; 4=Keine Lösung denkbar)
- Zeitaufwand für Lösung (1=1 Monat, 2=½ Jahr, 3=1 Jahr, 4=>5 Jahre, X=nicht anwendbar)

Zunächst wird eine unabhängige, anonyme Bewertung der einzelnen Defizite in den drei Kategorien durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen wird im Anschluss der

Mittelwert gebildet und eine Diskussionsrunde zu den einzelnen Defiziten durchgeführt, um etwaige starke Abweichungen zu erkennen und spezifisches Expertenwissen bei einer vermuteten Fehleinschätzung zu kommunizieren. Im Rahmen der Diskussionsrunde wurden keine kritischen Einschätzungen identifiziert, sodass der Mittelwert in sämtlichen Defiziten übernommen wird. Lediglich bei der Bewertung des Zeitaufwands für eine Lösung wurde teilweise mit einem „X“ bewertet, welches *nicht anwendbar* entsprach und damit die Bildung eines Mittelwertes verhindert hat. Sämtliche Defizite mit Bewertung sind befinden sich in Anhang B.

Tabelle 7.1 listet zwei Arten von Defiziten des Softwareprototyps auf. Zum einen *Probleme* mit einer großen Tragweite ($>=2,5$) und einem unbekannten Lösungsweg, bzw. geringer Lösungsnähe ($>=2,5$). Zum anderen *Aufgaben* mit einer großen Tragweite ($>=2,5$), einem bekannten Lösungsweg, bzw. großer Lösungsnähe ($<2,5$) und einem großen Zeitaufwand für die Umsetzung der Lösung.

Tabelle 7.1: Als Probleme (grau) und Aufgaben (weiß) identifizierte Defizite des Softwareprototyps. Ausführliche Beschreibung in Anhang B.

Defizit	Kurzbeschreibung	Tragweite	Lösungsnähe	Zeitaufwand
DK2	Prozessinnovationen nur manuell	2,50	3,00	X
DK4	Konvergente Vorschläge	2,50	2,50	X
DA2	Starre Semantik für Konstruierende	3,25	2,75	3,50
DU2	Fehlende Hintergrunddaten	2,75	2,00	3,00
DU5	Einschränkung auf Getriebewellen	2,50	2,25	3,25
DA1	Initial hoher Zeitaufwand	2,50	2,25	3,25
DA4	Skalieren der Wissensgraphanwendung	2,50	2,25	3,00

Abschließend lässt sich festhalten, dass noch ein erheblicher Zeitaufwand für die Beseitigung der Defizite getätigter werden müsste. Ziel ist ein Zustand, in dem der Softwareprototyp ohne spezielle Anleitung und aufwändige manuelle Betreuung des Wissensgraphen anwendbar ist. Dabei existieren für einige Herausforderungen bereits Lösungsansätze, für andere Herausforderungen muss ein Lösungsweg erst noch gefunden werden.

7.3 Initiale Evaluation des Softwareprototyps

Im Rahmen der Entwicklung des Softwareprototyps wird eine erste initiale Evaluation vorgenommen. Dafür werden die neun in der Forschungsumgebung verfügbaren Getriebekomponenten von eAchsen K0 – K8 betrachtet (Abschnitt 4.4). Für jede dieser Komponenten steht eine STEP-Datei zur Verfügung. Da der Softwareprototyp determiniert, das heißt für gleiche Startwerte (STEP) immer das gleiche Ergebnis liefert, wird für jede Komponente nur ein Methodendurchlauf benötigt. Entsprechend wird die Methode für die initiale Evaluation neun Mal unterstützt durch den Softwareprototyp durchlaufen. Tabelle 7.2 zeigt die für eine Inputgeometrie identifizierten Referenzsystemelemente.

Tabelle 7.2: Zuordnung der Komponenten durch die Ähnlichkeitsabfrage
 Zeile: Auszulegende Komponenten, Spalte identifiziertes Referenzsystemelement in Anlehnung an Haneke (2022, S. 54)

	K0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
K0									1
K1						1			
K2				1					
K3					1				
K4				1					
K5		1							
K6									1
K7									1
K8								1	

Es können bidirektionale Abhängigkeiten identifiziert werden. So identifizieren sich die Paare [K1, K5], [K3, K4] und [K7, K8] gegenseitig. Herauszuhaben ist auch K8, welche für drei Komponenten [K0, K6, K7] als Referenzsystemelement dient. Die eigene Repräsentation im Wissensgraph kann aufgrund einer programmierten Einschränkung im Softwareprototyp nicht als Referenzsystemelement identifiziert werden. Sonst würde für die im Wissensgraph enthaltenen Repräsentationen aufgrund einer 100 % Übereinstimmung der Wirkflächen jeweils diese ausgewählt. Für eine

geeignete Aufteilung in Lerndaten (Komponente in Wissensgraph) und Kontrolldaten (Komponente durchläuft Methodenanwendung) waren nicht ausreichend Komponenten in geeigneter Aufbereitung verfügbar.

In Tabelle 7.3 werden die generierten Prozessketten des Softwareprototyps mit den vorgesehenen Prozessketten, die auch im Wissensgraph hinterlegt sind, verglichen. Die Abweichung im Typ entsteht beispielsweise bei einem alternativen Prozesskettenvorschlag durch den Softwareprototyp, der sich von dem ursprünglich geplanten unterscheidet. So schlägt der Softwareprototyp beispielsweise für K5 einen Verzahnungsschleifprozess vor, der sich vom ursprünglich geplanten Verzahnungshonen unterscheidet. Aus fertigungstechnischer Sicht sind jedoch beide Prozesse denkbar. Eine Abweichung im Typ lässt sich somit nicht direkt in eine geringere Güte eines Vorschlags übersetzen.

Tabelle 7.3: Anzahl der Prozessschritte in originaler Auslegung, abgeschätzt durch den Softwareprototyp und die Abweichung bezüglich der Anzahl und der exakten Prozesse.

Komponente	K0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Anzahl Schritte	5	8	8	10	9	9	8	5	6
Anzahl generierte Schritte	7	8	10	9	9	8	7	5	7
Abweichung Anzahl	2	0	2	-1	0	-1	-1	0	1
Abweichung im Typ	3	2	4	0	2	2	2	1	2

Für jede Komponente werden drei Herstellkostenschätzungen durchgeführt:

- Ausführliche manuelle Herstellkostenschätzung unterstützt durch die Software *Teamcenter Product Cost Management* (Siemens Digital Industries Software, 2023) aufbauend auf ursprünglicher Prozesskette (DO). Diese Herstellkostenschätzung wird im Folgenden als Referenz gesehen, da die Komponenten noch nicht produziert wurden und somit keine genauere Herstellkostenschätzung existiert.
- Herstellkostenschätzung mit Verwendung der Kostenmodelle des Softwareprototyp mit ursprünglicher Prozesskette (PO)
- Herstellkostenschätzung mit Verwendung der Kostenmodelle des Softwareprototyp mit vorgeschlagener Prozesskette (PG)

Darauf aufbauend zeigt Tabelle 7.4 die Abweichungen von der als Referenz angenommenen ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzung.

Tabelle 7.4: Abweichung der Herstellkostenschätzung des Softwareprototyps mit generierter Prozesskette von jener mit der ursprünglichen und der ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzung in %.

Komponente	K0	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Abweichung PG-PO	1,6	-6,0	20,5	-12,7	10,1	3,3	-4,6	-0,7	1,0
Abweichung PG-DO	30,3	-21,8	71,6	36,0	14,8	-23,5	-2,8	-4,2	-8,0

Die drei größten Abweichungen der Herstellkostenschätzungen des Softwareprototyps basierend auf der ursprünglichen Prozesskette (PO) weichen mehr als 10%, aber weniger als 21% ab [K2=20,5%; K3=-12,7%; K4=10,1%]. Die drei größten Abweichungen der Herstellkostenschätzungen des Softwareprototyps basierend auf der vorgeschlagenen Prozesskette weichen mehr als 30% ab [K0=30,3%; K2=71,6%; K3=36,0%]. Die Herstellkostenschätzung für K2 sticht hier als signifikanter Ausreißer in beiden Datenreihen hervor. Zwei Ursachen werden dafür identifiziert. Erstens werden die Kosten des Prozessschrittes Härten überschätzt. Zweitens beinhaltet die STEP-Datei von K2 einen Fehler. Das Gewicht ist nicht korrekt und somit werden falsche Materialkosten innerhalb des Softwareprototyps berechnet.

Die Diskrepanz zwischen den Schätzwerten des Prototyps und der ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzung lässt sich durch grobe Prozessmodelle im Softwareprototyp erklären. Darüber hinaus verdeutlicht die hohe Abweichung der Komponente K2 die Abhängigkeit von korrekten Eingangsdaten.

7.4 Fazit zum Funktionsdemonstrator

Der Funktionsdemonstrator und die Realisierung als Softwareprototyp soll Menschen bei der Anwendung der Methode in der Praxis unterstützen und zeitgleich Lösungsoptionen unter Zuhilfenahme von semantischen Technologien aufzeigen. Damit beantwortet der Softwareprototyp FF2.2. Der Softwareprototyp unterstützt die Methodenschritte in unterschiedlichem Ausmaß. Die Suche nach Referenzsystemelementen findet vollständig automatisiert statt, während der Prüfschritt manuell vorgesehen ist. Im Rahmen eines Workshops werden Defizite des Softwareprototyps bewertet und ein erheblicher Zeitaufwand für eine unternehmensweit nutzbare Lösung identifiziert. Dabei existieren sowohl Probleme mit unbekanntem Lösungsweg als auch Aufgaben mit bekanntem Lösungsweg.

Eine initiale Evaluation zeigt Abweichungen der Herstellkostenschätzungen des Softwareprototyps von ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzungen. Diese sind unter anderem auf unpräzise Kostenmodelle zurückzuführen. Zur detaillierten Evaluation der Methode und des Softwareprototyps ist eine größere Studie mit Expertenbeteiligung notwendig, die im nächsten Kapitel präsentiert wird.

8 Evaluation

In diesem Kapitel wird eine Deskriptive Studie 2 (DS-II) im Sinne der Design Research Methodology (DRM) (Blessing & Chakrabarti, 2009) durchgeführt, um die in Abschnitt 3.3 abgeleiteten Forschungsfragen (FF) 3.1 und 3.2 zu beantworten (Abbildung 8.1):

FF3.1: Wie kann die entwickelte Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) validiert werden?

FF3.2: Welchen Effekt hat die Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) auf die Profitabilität durch Zeitaufwand, Transparenz und Wissensverfügbarkeit?

Zunächst werden die Erfolgs-, Anwendungs- und Unterstützungsmerkmale der Studie abgeleitet. Anschließend werden die für die Unterstützungsvalidierung zu verwendenden Methoden erarbeitet. Dafür wird die Question-Method-Matrix angewendet. Interview, Fragebogen und Beobachtung werden in der Studie mit Experten verwendet, um den Einfluss der entwickelten Methode (Kapitel 6) und des als Softwareprototyp realisierten Funktionsdemonstrators (Kapitel 7) auf die Profitabilität zu untersuchen. Auf die Ergebnisse folgt eine Diskussion anhand eines Impact Models.

Weite Teile der Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Kapitels wurden auf der *ICED23 – 24th International Conference on Engineering* veröffentlicht (Hellweg, Cacaj, Haneke & Albers, 2023) und waren teilweise Gegenstand einer durch den Autor der vorliegenden Arbeit co-betreuten Abschlussarbeit (Cacaj, 2022)¹.

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Forschungsvorgehen							
Klärung des For- schungsgegenstands		Deskriptive Studie I		Präskriptive Studie		Deskriptive Studie II	
Kapitel 1		Kapitel 5	FF 1.1	Kapitel 6	FF 2.1	Kapitel 8	FF 3.1
Einleitung		Welche Informationen?		Wie unterstützen?		Wie validieren?	
Kapitel 2		Kapitel 5	FF 1.2	Kapitel 7	FF 2.2	Kapitel 8	FF 3.2
Grundlagen und Stand der Forschung		Wie modellieren?		Wie umsetzen?		Welche Erkenntnisse?	
Kapitel 3						Kapitel 9	Zusammenfassung und Ausblick
Zielsetzung							
Kapitel 4							
Forschungsmethodik							

Abbildung 8.1: Überblick über das Forschungsvorgehen mit in Kapitel 8 zu bearbeitenden Fragestellungen.

8.1 Studiendesign

Analog zu Blessing und Chakrabarti (2009) werden unterschiedliche Arten von Evaluationen unterschieden: Erfolgsevaluation, Anwendungsevaluation und Unterstützungsevaluation. Für die Evaluationen werden Kriterien benötigt. Die Erfolgskriterien (Tabelle 8.1: E1-E3), Anwendungskriterien (Tabelle 8.1: A1-A4) und Unterstützungskriterien (Tabelle 8.1: S1-S6) wurden aufbauend auf folgenden Einflüssen entwickelt:

- Den drei Evaluationsarten von Blessing und Chakrabarti (2009)
- Dem Intended Impact Model (Abschnitt 4.2)
- Der Situation und den Bedarfen der Forschungsumgebung (Abschnitt 4.4)
- Den sechs Methodenschritten (*Bauteilinformationen erfassen, Referenzsystemelemente identifizieren, Prozesskette übernehmen und anpassen, Prozesskette in Herstellkosten überführen, Ergebnis prüfen und Ergebnis speichern*, Abschnitt 6.2)

Die Erfolgskriterien (Tabelle 8.1: E1-E3) zielen auf die Bewertung der Nützlichkeit der Unterstützung ab, d.h. auf den Grad, in dem die Unterstützung die formulierten Ziele erreicht. Sie sind aufgeteilt in die drei messbaren Erfolgsfaktoren des Intended Impact Models (Abschnitt 4.2). Die Anwendungskriterien (Tabelle 8.1: A1-A4) konzentrieren sich auf die Beurteilung der Nutzbarkeit und Anwendbarkeit der Unterstützung. Als Unterstützungskriterien (Tabelle 8.1: S1-S6) werden die

Automatisierungsgrade der sechs Methodenschritte verwendet. Diese werden kontinuierlich während der gesamten Entwicklung betrachtet.

Tabelle 8.1: Erfolgs-, Anwendungs- und Unterstützungskriterien der Deskriptiven Studie 2 (DS-II). Übersetzte Tabelle aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 4)

Kriterium	Beschreibung
E1	Die Unterstützung reduziert den Zeitaufwand für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE.
E2	Die Unterstützung begünstigt die Transparenz der Kosten.
E3	Die Unterstützung begünstigt die Nutzung von vorhandenem Wissen.
A1	Die Unterstützung ist für anwendende Personen einfach zu handhaben.
A2	Die Unterstützung ist für anwendende Personen verständlich.
A3	Die Unterstützung ist in sinnvolle Schritte gegliedert.
A4	Die Unterstützung ist auf andere Produkt- und Fertigungsbereiche übertragbar.
S1	Automatisierungsgrad von <i>Bauteilinformationen erfassen</i>
S2	Automatisierungsgrad von <i>Referenzsystemelemente identifizieren</i>
S3	Automatisierungsgrad von <i>Prozesskette übernehmen und anpassen</i>
S4	Automatisierungsgrad von <i>Prozesskette in Herstellkosten überführen</i>
S5	Automatisierungsgrad von <i>Ergebnis prüfen</i>
S6	Automatisierungsgrad von <i>Ergebnis speichern</i>

Um die Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) hinsichtlich ihres Erfolges und ihrer Anwendbarkeit anhand der abgeleiteten Kriterien bewerten zu können werden Methoden benötigt. Zur Beantwortung der FF3.1 wird die Question-Method-Matrix (Tabelle 8.2) nach Blessing und Chakrabarti (2009) verwendet. Dabei wird die Eignung, der Zeitaufwand für die Studie organisierende Personen und der Zeitaufwand für Teilnehmende bewertet. Ausführungen zu der Question-Method-Matrix und den für die Methode durchzuführenden Schritte finden sich in Blessing und Chakrabarti (2009, 106 ff.). Vier Methoden werden in der Question-Method-Matrix analysiert, um unterschiedliche Aspekte innerhalb der Studie untersuchen zu können (Tabelle 8.2).

Tabelle 8.2: Question-Method-Matrix: nach Blessing und Chakrabarti (2009) effiziente und effektive Methoden für Forschungaspekte. Ausgewählte Methoden sind hervorgehoben. In Anlehnung an Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 5).

Art der Evaluierungskriterien	Beobachtung		Gleichzeitige Verbalisierung		Fragebogen		Interview	
Erfolgskriterien	✓✓		✓		✓✓		✓✓	
	R	P	R	P	RR	P	RR	P
Anwendungskriterien	✓		✓		✓✓		✓✓	
	RR	P	RR	P	RR	P	RR	P
Unterstützungskriterien			✓		✓✓		✓	
			RR	P	RR	P	RR	P

Legende für Tabelle 8.2:

- **Eignung der Methode für das Evaluierungskriterium:**
 - ✓ teilweise geeignet
 - ✓✓ vollständig geeignet
- **Zeitaufwand für die Studie organisierende Menschen**
 - R geringer Zeitaufwand
 - RR hoher Zeitaufwand
- **Zeitaufwand für die Teilnehmenden**
 - P geringer Zeitaufwand
 - PP hoher Zeitaufwand

Die drei Methoden: Beobachtung, Fragebogen und Interview wurden mit Hilfe der Question-Method-Matrix ausgewählt. Methoden werden für die Evaluierung unterschiedlicher Details eingesetzt:

- Die **Beobachtung** der Studienteilnehmenden bei der Anwendung der Methode und des Softwareprototyps wird für quantitative Zeitmessungen verwendet.
- Der **Fragebogen** (siehe Anhang C) sammelt zum einen Informationen zu den Teilnehmenden, zum anderen werden spezifisch für Methode und Softwareprototyp die Erfolgs- und Anwendungskriterien abgefragt.

Zusätzlich folgt eine Bewertung des Automatisierungsaufwandes und des Automatisierungspotentials der sechs Methodenschritte.

- Die semi-strukturierten **Interviewfragen** (siehe Anhang C) dienen unter anderem dem Einholen von Feedback zur Prototyp-Anwendung und der offenen Untersuchung von Stärken und Schwächen der Unterstützung.

Als Forschungsumgebung dient das in Abschnitt 4.4 vorgestellte Cost Engineering im Unternehmensumfeld. Da die Unterstützung im Cost Engineering erfahrene Personen unterstützen soll, werden für die Studie im Cost Engineering erfahrene Personen aus unterschiedlichen Geschäftsbereichen und mit unterschiedlichem Produktfokus befragt. Zwei Vor-Interviews dienen dem Testen des Studiendesigns, der Fragebögen und des Interviewleitfadens. Diese werden nicht in der Auswertung betrachtet. Die eigentliche Studie beinhaltet Fragebögen, Beobachtungen und Interviews mit zehn Teilnehmenden (Tabelle 8.3).

Tabelle 8.3: Teilnehmende der Validierungsstudie in Anlehnung an Cacaj (2022, S. 50)

#	Arbeitserfahrung in Jahren	Tätigkeitsfeld	Produkt-Fokus
Pre01	20 – 29	Cost Engineering	Elektronik
Pre02	10 – 19	Cost Engineering	Verschiedene
Int1	30 – 39	Cost Engineering	Verschiedene
Int2	20 – 29	Cost Engineering	Getriebe
Int3	10 – 19	Cost Engineering	Elektronik
Int4	10 – 19	Cost Engineering	Elektronik
Int5	20 – 29	Cost Engineering	Verschiedene
Int6	10 – 19	Cost Engineering	Getriebe
Int7	20 – 29	Cost Engineering	Elektrische Maschinen
Int8	10 – 19	Cost Engineering	Elektrische Maschinen
Int9	10 – 19	Nachhaltigkeit	Kunststoffe
Int10	5 – 10	Einkauf	Verschiedene

8.2 Ergebnisse der Evaluation

Die Ergebnisse der DS-II werden strukturiert nach Erfolgs-, Anwendungs- und Unterstützungsmerkmalen. Um FF3.2 zu beantworten, wird der Fokus der Ergebnisse auf die Erfolgskriterien gesetzt. Hier dienen die drei messbaren Erfolgskriterien *reduzierter Zeitaufwand*, *Transparenz* und *verfügbares Wissen* des Initial Impact Models (Abschnitt 4.2) als weitere Strukturierungsebene.

Alle Teilnehmenden haben alle Interviewfragen beantwortet und den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Im Fragebogen wird für die Bewertung der Erfolgs- und Anwendungskriterien eine fünfstufige Likert-Skala verwendet. Zudem werden positiv und negativ formulierte Fragen beantwortet, um einen Zustimmungsbias zu

minimieren. Die negativen Fragen werden für die Auswertung invertiert, um die Übereinstimmung mit den positiven Fragen zu untersuchen. Abbildung 8.2 zeigt die Mittelwerte der Antworten (Anhang C) für die Erfolgskriterien E1-E3 und die Anwendungskriterien A1-A4. Dabei wird jeweils in positiv und negativ formulierte Fragen unterschieden (+, -) und eine unabhängige Bewertung der Methode und des Prototyps (M, P). Eine starke Zustimmung wird für Bewertungsergebnisse ≥ 4 angenommen, eine schwache Zustimmung für Bewertungsergebnisse im Bereich ≥ 3 und <4 .

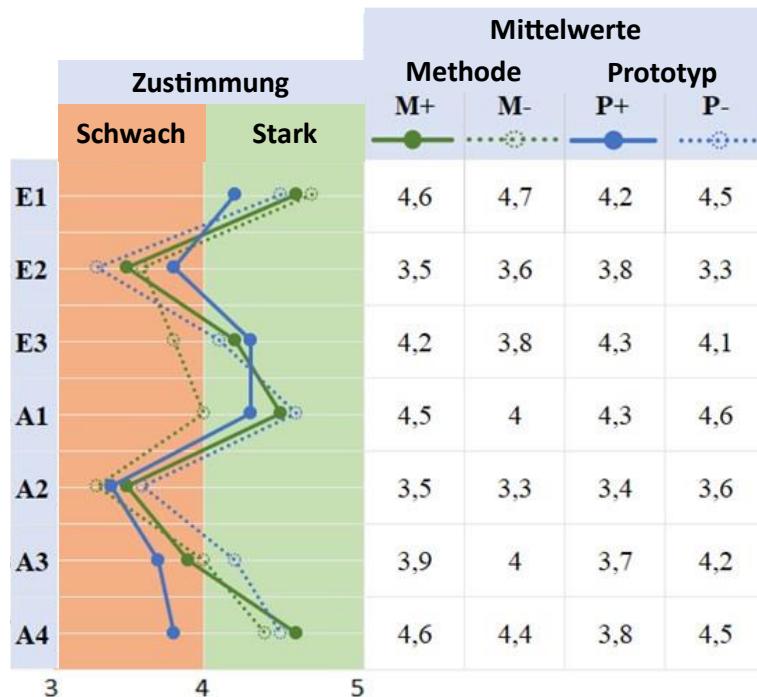


Abbildung 8.2: Auswertung der Fragebogenergebnisse zu Erfolgs- und Anwendungskriterien. Übersetzte Abbildung aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 6) nach Cacaj (2022, S. 63).

In den Interviews geäußerte Stärken (oben) und Schwächen (unten) werden in Abb. 8.3 dargestellt. Dazu wurden die Tonbandaufnahmen der semi-strukturierten Interviews transkribiert und eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) mit induktiver Kategorienbildung ausgewertet. Ziel des Verfahrens ist die Reduktion der

Aussagen und Ableitung von Kategorien. Weitere Details und das abgeleitete Kategoriensystem findet sich in Cacaj (2022)².

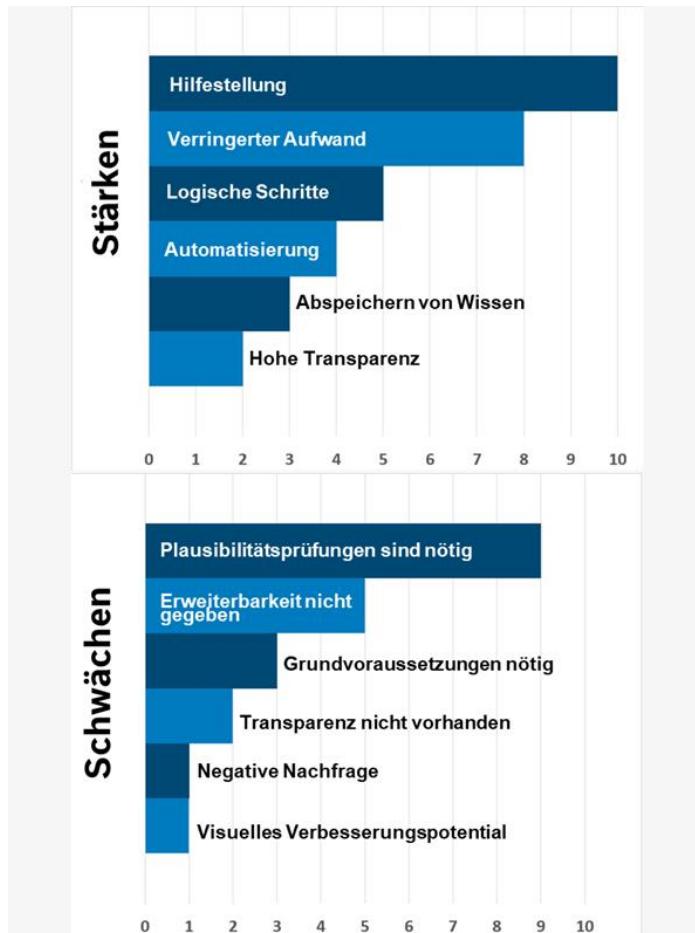


Abbildung 8.3: In den Interviews geäußerte Stärken (oben) und Schwächen (unten) der Unterstützung aus Cacaj (2022, S. 59).

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Erfolgskriterien

In den semi-strukturierten Interviews haben alle Teilnehmenden die Hilfestellung der Unterstützung als Stärke genannt (Abbildung 8.3, oben). Acht der zehn Teilnehmenden beschreiben zusätzlich einen **reduzierten Zeitaufwand** als weitere Stärke. So erklärt Int5, dass „innerhalb kurzer Zeit ein Kostenmodell erstellt wurde, für das man [mit herkömmlicher Vorgehensweise] einen halben Tag gebraucht hätte.“ Die Einschätzung des reduzierten Zeitaufwandes wird durch die starke Zustimmung zu E1 im Fragebogen (Abbildung 8.2, E1) unterstützt.

Bei der Frage nach Schwächen der Methode, geben neun Teilnehmende den notwendigen Prüfschritt an (Abbildung 8.3, unten). Insbesondere bei unerfahrenen Anwendenden bestehe das Risiko, „die Reihenfolge der Prozesskette falsch einzuschätzen“ (Int1) und „Ergebnisse unreflektiert zu übernehmen“ (Int2).

Im Softwareprototyp wird Automatisierung initial umgesetzt. Die Teilnehmenden benötigen für das manuelle Aufstellen einer Prozesskette in der Studie im Schnitt etwa sieben Minuten. Mit dem Softwareprototyp ist ein Aufstellen der Prozesskette mit zusätzlicher initialer Berechnung der Herstellkosten in etwa einer Minute möglich. Die Ergebnisse sind jedoch mit Unsicherheit behaftet, da bei dem manuellen Aufstellen zum Teil langwierige Diskussionen aufgekommen sind. (Hellweg, Cacaj et al., 2023; Cacaj, 2022)

Transparenz bedeutet in diesem Zusammenhang die mögliche Aufschlüsselung der Berechnung einer Komponente und die Nachvollziehbarkeit der beeinflussenden Randbedingungen. Der positive Einfluss der Methode auf die Transparenz wird von zwei Teilnehmenden bestätigt, während zwei Teilnehmende angeben, dass der Softwareprototyp die Transparenz in der Berechnung verhindere. Im Fragebogen weisen die Aussagen zu E2 eine schwache Indikation auf (Abbildung 8.2, E2). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der positiven Fragen, dass die Transparenz der Methode eine geringere Zustimmung erfährt als die Transparenz des Softwareprototyps. Die invertierten negativen Fragen zeigen das Gegenteil.

Der Interviewleitfaden enthält eine Frage nach dem Verständnis von Transparenz im Cost Engineering. Dadurch soll festgestellt werden, ob die Teilnehmenden ein einheitliches Verständnis des Transparenzbegriffs besitzen. Die Auswertung der Antworten zum Transparenzbegriff im Cost Engineering zeigt dabei ein einheitliches Verständnis (Tabelle 8.4). Die transkribierten Aussagen wurden für eine bessere Lesbarkeit grammatisch und sprachlich angepasst.

Tabelle 8.4: Tabelle zum Verständnis des Transparenzbegriffs im Cost Engineering aus Cacaj (2022, S. 61).

Interview	Verständnis von Transparenz im Cost Engineering
Int1	Kostentreiber, Zuschläge, Rohmaterialen, Fertigungsschritte und die dazugehörigen Taktzeiten, sodass man eine Kostenzusammensetzung bekommt. Mit diesen Informationen kann besser beurteilt werden, ob eine Optimierung möglich ist. Mit dieser Tiefe ist eine Diskussion mit dem Lieferanten realistisch.
Int2	Aus der Sicht der interviewten Person müssen die Kostentreiber, die Grundprämissen wie Standorte, Betrachtungsjahr, Materialpreise usw. klar sein.
Int3	Als im Cost Engineering erfahrene Person muss man seinen Kolleginnen und Kollegen die größtmögliche Transparenz anbieten, sodass diese die Kostenstruktur eines Bauteils verstehen.
Int4	Die durchgehende Nachvollziehbarkeit, welches Maß zu welchen Veränderungen in Gewicht und Taktzeit und somit den Kosten führt.
Int5	Aufteilung des Cost-Breakdowns in die Elemente Rohmaterial, Prozesskosten, Overheads und Scrap.
Int6	Wie kommt man auf die Taktzeit? Woher kommen die Zahlen? Wie kommt man auf den jeweiligen Herstellprozess? Wie viele Teile passen da rein?
Int7	Transparenz bedeutet, dass man bis auf die Zykluszeit nachvollziehen kann, warum ein Bauteil so viel kostet wie es kostet.
Int8	Das Sichtbarmachen von Haupteinflussparametern. Insbesondere das Hervorheben von stark veränderten Ergebnissen, nachdem die Parameter um 50 % verändert werden.
Int9	Die auf den Cent genaue Zusammensetzung des Preises für das Bauteil und die Prämissen, d.h., welche Annahmen wurden für die Prozesse, das Umrüsten, allg. Informationen des Lieferanten, Materialkosten und Maschinenkosten getroffen.
Int10	Kosten sind eine heikle Sache. Es ist so, wie wenn Sie jemanden fragen, was Sie tun. Ich bin Ingenieur, ich arbeite bei der Bank und so weiter. Wenn man fragt wie viel man verdient, wird alles was mit Wert zu tun hat zu einer sensiblen Information. Es liegt in der Natur der Sache, dass wir nicht teilen und nichts verraten.

Das Potenzial der Methode, hilfreiche Referenzen zu identifizieren und damit das **verfügbare Wissen** zu erweitern, wird von drei der zehn Teilnehmenden als Stärke bestätigt (Abbildung 8.3, oben). Allerdings nennen auch drei Teilnehmende notwendige Anforderungen an die Methode als Schwäche (Abbildung 8.3, unten), wie z. B. die "Entwicklung einer ausgewogenen Wissensbasis" (Int4). In der Auswertung der Fragebogenergebnisse (Abbildung 8.2, E3) liegt der Softwareprototyp im Bereich der starken Indikation für E3, während die Methode aufgrund des niedrigen Mittelwerts der negativen Frage nur eine schwache Indikation hat.

Anwendungskriterien

Die Anwendung wird mit den vier Anwendungskriterien bewertet (Abbildung 8.2, A1-A4). Die Einfachheit der Anwendung wird für Methode und Softwareprototyp mit starker Zustimmung positiv bewertet (A1). Die Verständlichkeit wird hingegen durchwegs mit schwacher Zustimmung bewertet (A2). Bei der Strukturierung (A3) und der Übertragbarkeit (A4) unterscheiden sich die Ergebnisse. Für die Strukturierung werden jeweils die negativ formulierten Fragen besser bewertet als die positiven. Eine klare Aussage ist hier nicht zu beobachten. Bei der Übertragbarkeit überwiegt eine deutlich positive Bewertung, jedoch gibt es einen Ausreißer bei der positiv formulierten Frage hinsichtlich des Softwareprototyps, weshalb auch hier keine klare Aussage getroffen werden kann.

Unterstützungskriterien

Die Ergebnisse der Umfrage bezüglich **Automatisierungsaufwand und Automatisierungsnutzen** der sechs Methodenschritte S1-S6 sind in Abbildung 8.4 dargestellt. Das Diagramm ist in drei unterschiedlich farbige Bereiche unterteilt:

- **Rot** indiziert ein geringes Automatisierungspotential mit großem Aufwand und geringem Nutzen.
- **Gelb** indiziert ein mittleres Automatisierungspotential entweder mit hohem Aufwand und hohem Nutzen oder geringem Aufwand und geringem Nutzen.
- **Grün** indiziert ein hohes Automatisierungspotential mit geringem Aufwand und hohem Nutzen.

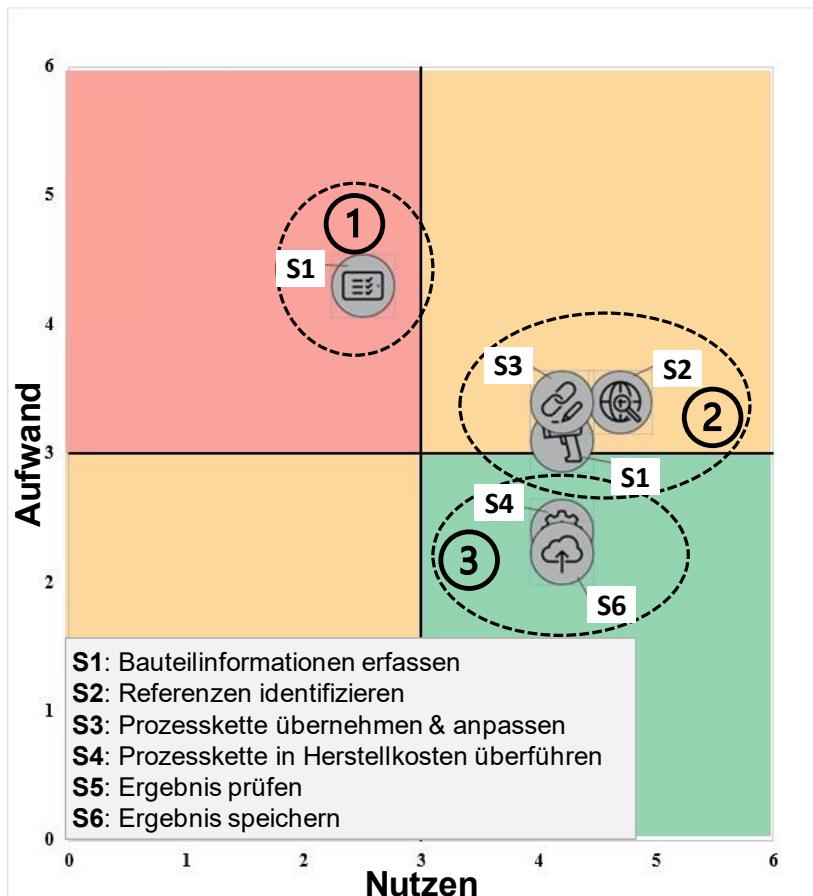


Abbildung 8.4: Automatisierungspotenzial als Verhältnis von geschätztem Aufwand und Nutzen der Automatisierung der sechs Methodenschritte. In Anlehnung an Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 7).

Es gibt drei Cluster in Abbildung 8.4. Das erste Cluster mit Methodenschritt S5 zeigt geringes Automatisierungspotenzial und befindet sich im roten Bereich. Das zweite Cluster befindet sich im gelben Bereich an der Grenze zum grünen Bereich. Die dort liegenden Methodenschritte S1, S2 und S3 besitzen einen großen Nutzen, jedoch

einen moderaten Aufwand. Das dritte Cluster befindet sich im grünen Bereich. Methodenschritt S4 und S6 besitzen ein hohes Automatisierungspotential. Um die vorgestellten Evaluationsergebnisse einzuordnen, folgt eine Diskussion.

8.3 Diskussion der Evaluationsergebnisse

Die Diskussion der Evaluationsergebnisse erfolgt strukturiert nach den drei Ebenen des Actual Impact Models (Abbildung 8.5), wobei das Potential der Automatisierung als Schlüsselfaktor in Ebene drei gesondert betrachtet wird.

In der **ersten Ebene** wird der Einfluss der vier Erfolgsfaktoren auf die Profitabilität anhand von Literatur und Beobachtung in der Forschungsumgebung diskutiert. Nach Hintzen, Laufenberg und Kurz (2000) sind kosteneffiziente und technisch ausgereifte Produkte notwendig für eine Gewinnoptimierung (#1). Da für Herstellkostenschätzungen aufgewendete Zeiten auf die Projektkosten des zu entwickelnden Produktes gebucht werden, führt ein reduzierter Zeitaufwand zu einem geringeren Overhead, der sich positiv auf die Profitabilität auswirkt (#2). Die Überwachung von Produktionskosten und Verkaufspreisen erhöht die Profitabilität strukturell. Da die Ziele in einem strukturierten Prozess festgelegt und eingehalten werden, sind genaue Herstellkostenschätzungen für die gegebene Funktionalität unerlässlich (Clifton, Townsend, Bird & Albano, 2019) (#3). Ein besseres Verständnis der Produktkosten in Verhandlungen kann nach Lysons und Farrington (2016) zu Einsparungen bei der Beschaffung führen (#4).

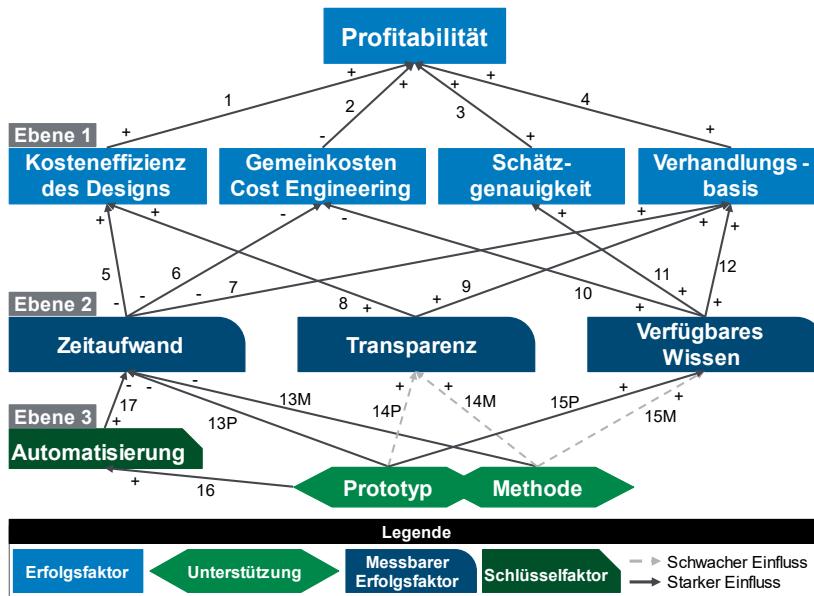


Abbildung 8.5: Actual Impact Model nach Blessing und Chakrabarti (2009). Übersetzte Darstellung aus Hellweg und Cacaj et al. (2023, S. 8).

In der **zweiten Ebene** wird der Einfluss der drei messbaren Erfolgsfaktoren auf die vier Erfolgsfaktoren anhand der Beobachtungen in dieser Studie, sowie der allgemeinen Situation in der Forschungsumgebung diskutiert. Eine Reduktion des Zeitaufwandes für eine Herstellkostenschätzung verringert die Zeit, bis Personen in der Konstruktion Kostenfeedback erhalten. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit für kosteneffiziente Konstruktionsänderungen, da Konstruierenden dafür ein größerer Zeitraum zur Verfügung steht. Zusätzlich können schnellere Entwicklungszyklen realisiert werden. Auch dies kann zu kosteneffizienteren Komponenten führen (#5). Eine Zeitaufwandsreduzierung bei Herstellkostenschätzungen gibt beteiligten Personen die Möglichkeit mehrere Produkte gleichzeitig zu betreuen, was wiederum zu geringeren anteiligen Kosten der einzelnen Produkte führt (#6). Der befähigende Effekt auf nicht im Cost Engineering erfahrene Personen erstreckt sich auch auf den Einkauf und schafft dort eine bessere Verhandlungsbasis, z. B. durch die Identifizierung einer alternativen Prozesskette (#7). Transparentere Herstellkostenschätzungen ermöglichen einen besseren Einblick, beispielsweise durch das Management oder den Einkauf. Werden Kostentreiber leichter identifiziert, können sie leichter bearbeitet und reduziert werden. Dies führt zu kosteneffizienteren Komponenten. Bei Verhandlungen mit Lieferanten führt die

Kenntnis der Kostentreiber zu einer besseren Verhandlungsbasis (#8, #9). Die Korrelationen #10, #11 und #12 können durch Beobachtung der Anwendenden und der Untersuchung des Softwareprototyps bestätigt werden. So kann der verwendete Wissensgraph als zentraler Wissensspeicher im Cost Engineering eingesetzt werden, wodurch die Kosten für ein komplexes Wissensmanagement reduziert werden können (#10). Insbesondere der modulare Aufbau des Softwareprototyps als Funktionsdemonstrator der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung ermöglicht hohe Detailgrade bei den prozessspezifischen Herstellkosten. Zwar wurden verschiedene Kostenmodelle für den Softwareprototypen in geringem Detailgrad umgesetzt, jedoch bestärkt der prinzipielle Aufbau die Entwicklung und konsequente Verwendung von detaillierten Kostenmodellen. Werden die prozessspezifischen Herstellkosten mit einem einheitlichen und hohen Detailgrad geschätzt, steigt damit die allgemeine Schätzgenauigkeit (#11). Zuletzt bietet der Softwareprototyp schnell aufbereitetes Kostenwissen und Hintergründe zu den Zusammenhängen von Komponenten mit deren Fertigung. Dadurch kann die Verhandlungsposition z. B. bei der Verhandlung mit Lieferanten gestärkt werden (#12).

In der **dritten Ebene** wird der Einfluss der entwickelten Unterstützung (Softwareprototyp und Methode) anhand der Ergebnisse der Studie diskutiert. Sowohl der Fragebogen als auch die Interviews zeigen einen positiven Einfluss des Softwareprototyps und der Methode auf den Zeitaufwand (#14P und #14M). Der Softwareprototyp zeigt zeitgleich eine mögliche Realisierung des Funktionsdemonstrators (#16) und die positive Auswirkung der Automatisierung auf den Zeitaufwand (#17). Das Potenzial der Methode hängt jedoch von der Datenverfügbarkeit ab. Im Umfeld dieser Studie wird dafür ein 3D-Mastermodell mit integrierten Produkt- und Fertigungsinformationen konsequent genutzt. Dies ist in der Praxis jedoch noch selten verfügbar.

Transparenz ist ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Nutzerakzeptanz. Alle Teilnehmenden haben ein ähnliches Verständnis von Transparenz. Es gibt Teilnehmende, die einen Transparenzgewinn durch die Methode sehen und Teilnehmende, die explizit keinen Transparenzgewinn durch den Softwareprototyp angeben. Daher wird der Transparenzgewinn durch die Methode als wahrscheinlich angesehen, kann aber nicht formal verifiziert werden (#14M), während der Einfluss des Softwareprototyps weiterhin unklar ist (#14P). Eine Interpretation für die schwache Bewertung des Softwareprototyps ist der Entwicklungsstatus mit entsprechenden Schwierigkeiten bei der Userinteraktion.

Eine der Intentionen der Methode ist die Identifizierung passender Referenzsystemelemente. Der positive Einfluss der Methode auf das vorhandene

Wissen kann jedoch nicht bestätigt werden (#15M). Beim Softwareprototyp deuten die Studienergebnisse auf eine positive Auswirkung hin (#15P). Dies ist zwar eine positive Nachricht für die prototypische Umsetzung, zeigt aber auch den großen Lösungsraum für die Implementierung der Methode.

Das **Automatisierungspotenzial** der Methodenschritte lässt sich in drei Cluster einteilen. Auch wenn in der Studie explizit nach dem Potenzial der Methode gefragt wurde, kann eine Verwechslung mit dem Potenzial des Softwareprototyps durch die Teilnehmenden nicht ausgeschlossen werden. Die Schritte S4 und S6 weisen das höchste Potenzial auf, da die computergestützte Berechnung und das Hochladen der Ergebnisse in den Wissensgraphen für die Teilnehmenden leicht umsetzbar erscheinen. Dies passt aus Sicht des Autors, da diese Schritte im Softwareprototyp bereits weitgehend automatisiert sind. Das Potenzial der Schritte S1, S2 und S3 wird aufgrund des vorgesehenen Implementierungsaufwandes als mittel eingeschätzt. Hier hat der Softwareprototyp noch Verbesserungspotenzial und Grundvoraussetzungen wie der 3D-Master und eine grundlegende Wissensbasis müssen noch in einem größeren Umfang für eine adäquate Nutzung geschaffen werden. Der Schritt S5 *Ergebnisse prüfen* erfordert noch eine manuelle Prüfung, was mit der geringen Potenzialbewertung korrespondiert. Schließlich zeigt die Studie unterschiedliche Automatisierungspotenziale innerhalb verschiedener Methodenschritte und damit die Notwendigkeit eines gezielten statt eines pauschalen Ansatzes für zukünftige Automatisierung im Cost Engineering.

8.4 Fazit zur Evaluation

Diese Studie zeigt grundsätzlich eine positive Wirkung der entwickelten Unterstützung auf die Profitabilität. Die Wirkungskette durch reduzierten Zeitaufwand wird verifiziert, während eine positive Wirkung auf die Transparenz und die Wissensbasis nur eingeschränkt beobachtet werden. Die Automatisierung zeigt ein hohes Potenzial zur weiteren Reduzierung des manuellen Zeitaufwands. Da jedoch Aufwand und Nutzen der verschiedenen Methodenschritte sehr unterschiedlich sind, sollte hier ein gezielter Ansatz verfolgt werden. Insgesamt wird der Nutzen der Unterstützung gesehen, es sind jedoch weitere Verbesserungen erforderlich.

Insbesondere zukünftige Unterstützungen benötigen eine verbesserte Transparenz, einen intelligenten Automatisierungsgrad und die Integration von Herstellbarkeits-Expertenwissen für eine breite Akzeptanz der Nutzenden. Die Umsetzung hängt zudem stark von Digitalisierungsvoraussetzungen ab, wie der Verfügbarkeit eines 3D-Masters mit Produkt- und Fertigungsinformationen und der Qualität der

Wissensbasis. Da diese Informationen oft nicht verfügbar sind, sind weitere Arbeiten an kontinuierlich verfügbaren Produkt- und Fertigungsinformationen erforderlich. Die Komplexität von Produkten und Produktionssystemen nimmt zu, so dass ein Unterstützungsbedarf nicht nur auf Komponenten-, sondern auf Systemebene besteht. Hier sind weitere Forschungen zur Verbindung von Produktfunktionen und Herstellkosten, z. B. mit Methoden des Advanced Systems Engineering (ASE), erforderlich.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der vorangegangenen Kapitel strukturiert nach den Forschungsfragen (FF) zusammengefasst. Abschließend wird ein Ausblick auf offene Forschungsarbeiten gegeben, die mit dieser Arbeit in Zusammenhang stehen.

9.1 Zusammenfassung

Insbesondere in schwierigen Marktsituationen und mit zunehmendem internationalem Wettbewerb ist die Profitabilität von fertigenden Unternehmen ein zentraler Erfolgsfaktor. Herstellkostenschätzungen helfen dabei Produktkosten zu analysieren, Kostentreiber zu identifizieren und Herstellkosten zu senken (VDI-Richtlinie 2235).

Die KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung beschreibt den Produktentstehungsprozess als für jedes Produkt einzigartig und individuell. Zusätzlich steht der Mensch im Mittelpunkt der Produktentstehung (Albers, 2010). Eine Herstellkostenschätzung im Sinne der KaSPro muss somit individuell für jedes Produkt mit dem Menschen im Mittelpunkt geschehen.

Die Frühe Phase der SGE endet mit einer ökonomisch bewerteten technischen Lösung (Albers et al., 2017). Das Arbeiten in der Frühen Phase der SGE impliziert dabei Unsicherheit und Beeinflussbarkeit (Bursac, 2016). Herstellkostenschätzungen sollten somit möglichst früh in der Produktentwicklung gestartet werden, um die Kosten bestmöglich beeinflussen zu können.

Herausforderungen bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen bestehen in einer eingeschränkten Informationsverfügbarkeit bei geringer Datenqualität, einem hohen manuellen Zeitaufwand für Datenakquise und Kalkulation, sowie einer disziplinübergreifenden Arbeit. Die notwendigen Informationen existieren häufig nur als implizites Wissen oder liegen unstrukturiert ab. Der manuelle Zeitaufwand entsteht zu einem großen Teil durch die persönliche Suche nach Informationen oder vergleichbaren, bereits betrachteten Komponenten. Die Beschaffung dieser Referenzen wird weiter erschwert durch Disziplingrenzen, an denen zahlreiche Informationssysteme und Organisationsstrukturen enden. So werden detaillierte

Produktinformationen aus der Entwicklung, Fertigungsinformationen aus der Produktion und Prozessknowhow z. B. aus der Prozessentwicklung benötigt.

Dies erfordert eine methodische Unterstützung, welche an den Bedarfen und Randbedingungen der Menschen orientiert ist. Um die Verfügbarkeit von Informationen und Wissen für Studien sicherzustellen, wird als Forschungsumgebung die Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH ausgewählt. Da für Getriebekomponenten von elektrischen Achsen Herstellkostenschätzungen von großer Bedeutung sind, werden diese als Komponenten in dieser Arbeit verwendet. Auch in der Forschungsumgebung sollen Menschen methodisch bei Herstellkostenschätzungen unterstützt werden. Es wird das Ziel der Arbeit abgeleitet:

Ziel der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, die Herstellkostenschätzung durch die Verwendung von semantischen Technologien zur Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen (RSE) für Getriebekomponenten der Elektromobilität zu unterstützen. Dafür soll eine Unterstützung entwickelt und deren Einfluss auf die Profitabilität durch den benötigten Zeitaufwand, die Transparenz und das verfügbare Wissen in der Herstellkostenschätzung untersucht werden.

Das Ziel der Arbeit basiert auf einer Forschungsthese. Diese stellt eine zentrale Annahme dar, auf der diese Arbeit aufbaut und lautet wie folgt:

Forschungsthese

Die gezielte Verwendung von semantischen Technologien zur Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE führt zu einer Steigerung der Profitabilität bei Getriebekomponenten der Elektromobilität.

Aufbauend auf dem Forschungsbedarf und der Forschungsthese werden sechs Forschungsfragen formuliert. Diese strukturieren die Forschungsthese in drei Abschnitte mit je zwei Fragen und operationalisieren damit das Ziel der Arbeit. Zugleich wird das Forschungsvorgehen nach den Stadien der Design Research Methodology (DRM) (Blessing & Chakrabarti, 2009) strukturiert (Abbildung 9.1).

Forschungsvorgehen			
Klärung des For- schungsgegenstands	Deskriptive Studie I	Präskriptive Studie	Deskriptive Studie II
Kapitel 1 Einleitung	Kapitel 5 FF 1.1 Welche Informationen?	Kapitel 6 FF 2.1 Wie unterstützen?	Kapitel 8 FF 3.1 Wie validieren?
Kapitel 2 Grundlagen und Stand der Forschung	Kapitel 5 FF 1.2 Wie modellieren?	Kapitel 7 FF 2.2 Wie umsetzen?	Kapitel 8 FF 3.2 Welche Erkenntnisse?
Kapitel 3 Zielsetzung			Kapitel 9 Zusammenfassung und Ausblick
Kapitel 4 Forschungsmethodik			

Abbildung 9.1: Forschungsvorgehen dieser Arbeit nach den Stadien der DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009).

Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden anhand der sechs Forschungsfragen zusammengefasst.

FF1.1: Welche Informationen werden für die Herstellkostenschätzung in der Frühen Phase der SGE benötigt?

In einer Interviewstudie und durch eine teilnehmende Beobachtung in der Forschungsumgebung werden verschiedene für die Herstellkostenschätzung relevante Informationen identifiziert. So werden Fertigungs- und Kosteninformationen von Referenzsystemen von einer Mehrheit der Teilnehmenden als vorteilhaft gesehen. Insbesondere die Prozesskette und detaillierte Prozessinformationen, aber auch absolute Komponentenkosten sowie Kostentreiber auf Komponentenebene sind relevant.

Zusätzlich wird ein Defizit beim Wissenstransfer identifiziert. Von einem Entwickler bereits definierte Informationen sind anderen Beteiligten am Produktentstehungsprozess nicht verfügbar. So werden das Material und die Toleranzen einer Komponente von Konstruierenden festgelegt. Im Cost Engineering steht diese Information jedoch häufig nicht mehr zur Verfügung und muss erneut erarbeitet oder erfragt werden. Zudem sind nicht nur die eigentlichen Informationen sondern auch deren Zusammenhänge relevant. So werden die verwendeten Prozessschritte häufig durch die definierten Toleranzen bestimmt. Diese Verknüpfung ist jedoch nur im Kopf der Fertigungsplanung und nicht digital oder maschinenlesbar gespeichert.

FF1.2: Wie können für die Herstellkostenschätzung notwendige Informationen und Zusammenhänge modelliert werden?

Aktuell werden für die Herstellkostenschätzung benötigte Informationen meist in verschiedenen domänen spezifischen Datenbanken gespeichert. Ein Zugriff der Informationskonsumenten ist nur sehr eingeschränkt möglich. Auch existiert nur selten eine semantische Verknüpfung der notwendigen Informationen, sodass keine komplexen Abfragen möglich sind. Ein Beispiel sind abgelegte CAD-Daten in der Entwicklung, Informationen zum Produktionssystem in der Fertigung und Preisinformationen im Einkauf. Die einzige Querverbindung ist eine Teilenummer und eine technische Zeichnung. Inhaltliche Verknüpfungen, wie das Bedingen eines Fertigungsschrittes durch eine Toleranz, werden nicht gespeichert.

Eine integrierte Betrachtung der Produktentwicklung und Produktion wird auch im Produkt-Produktions-CoDesign (Abschnitt 2.1.7) angestrebt. Hier sind semantische Technologien wie Ontologien und Wissensgraphen geeignet, komplexe Zusammenhänge mit Graphen abzubilden. In Abschnitt 5.2 wird eine Ontologie für das Cost Engineering entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Komponenten und Fertigung in einem für Herstellkostenschätzungen notwendigem Detailgrad modellieren kann. Für die Beschreibung von Komponenten stehen die Konzepte Wirkfläche, Elementgruppe, Komponente und Komponentenattribute im Mittelpunkt. Für die Beschreibung der Fertigung werden unter anderem die Konzepte Prozessschritt und Prozesskette verwendet.

Funktionen in Produkten werden unter Mitwirkung von Wirkflächenpaaren realisiert. Auf Komponentenebene sind deshalb Wirkflächen von großer Bedeutung für die Erfüllung von Produktfunktionen. Aufbauend auf Anforderungen an die Wirkflächen werden Fertigungsanforderungen abgeleitet, die die Herstellkosten entscheidend beeinflussen können.

FF2.1: Wie können semantische Technologien die Identifikation und Nutzung von Referenzsystemelementen für die Herstellkostenschätzung unterstützen?

Eine manuelle Herstellkostenschätzung erfordert einen hohen Zeitaufwand, wenn im Cost Engineering keine passende Referenz zur Verfügung steht. Insbesondere das Sammeln von Informationen und Diskussionen mit Fachleuten zu bestimmten Prozessschritten oder Komponententypen benötigen viel Zeit. Dazu kommt das größtenteils manuelle Aufstellen der Prozesskette und detaillierte Berechnen der Herstellkosten.

Die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung integriert die Konzepte der Referenzsystemelemente mit semantischen Technologien in die

Herstellkostenschätzung. So wird ein Vorgehen vorgeschlagen, in dem Produktinformationen möglichst automatisiert erfasst werden. Abfragen, z. B. mit SPARQL auf einem Wissensgraph, ermöglichen nun ein einfaches Identifizieren von Referenzsystemelementen. Im Wissensgraph können Produktinformationen verknüpft mit Fertigungsinformationen abgelegt werden. Dies vereinfacht die Ableitung von Prozessketten. Ein zweistufiger modularer Ansatz mit prozessspezifischen Modulen ermöglicht eine effiziente Überführung der Prozesskette in Herstellkosten. Das Ergebnis sollte abschließend geprüft werden und bei guter Eignung als neue Referenz in den Wissensgraphen eingefügt werden. Durch einen solchen Ansatz erweitert sich der Wissensgraph immer weiter in der Nutzungsphase, wodurch die Güte und der allgemeine Informationsumfang weiter steigen.

FF2.2: Wie können Menschen bei der Anwendung der Methode in der Praxis am Beispiel von Getriebekomponenten für die Elektromobilität unterstützt werden?

Softwarelösungen eignen sich als Unterstützung bei manuell aufwändigen Tätigkeiten, bieten Möglichkeiten der automatisierten Datenverarbeitung und der Implementierung semantischer Technologien. Deshalb wird für die Unterstützung in Kapitel 7 ein Softwareprototyp entwickelt. Der Softwareprototyp unterstützt die Methodenschritte in unterschiedlichem Ausmaß. Die Erfassung von Produktinformationen erfolgt mit Hilfe des STEP-Formates basierend auf 3D-Daten inkl. Produkt- und Fertigungsinformationen. Die Identifikation funktioniert mittels einer Search-Query in einem Wissensgraphen, der auf der Cost Engineering Ontologie basiert. Die Prozesskette von Referenzsystemelementen wird initial automatisiert angepasst, mit der zusätzlichen Möglichkeit manuelle Änderungen vorzunehmen. Für die Überführung in Herstellkosten stehen für die einzelnen Prozessschritte Berechnungsmodule zur Verfügung. Der Detailgrad ist abhängig von dem Kostenanteil und dem verfügbaren Wissen in der Forschungsumgebung. So werden einige Prozessschritte mit hohem Detailgrad berechnet (z. B. Wälzfräsen) andere Prozessschritte werden grob abgeschätzt (z. B. Reinigen).

In einem Workshop wurden Defizite des Softwareprototyps identifiziert und bewertet und ein erheblicher Zeitaufwand für eine unternehmensweit nutzbare Lösung identifiziert. Dabei existieren zum einen Probleme mit unbekanntem Lösungsweg (z. B. konvergente Vorschläge). Zum anderen umfassende Aufgaben mit bekanntem Lösungsweg (z. B. die Einschränkung auf Getriebewellen). Die Defizite existieren unter anderem aufgrund der Zielstellung als initialer Prototyp und beschränkter Entwicklungressourcen.

In einer initialen Evaluation werden Abweichungen der Herstellkostenschätzungen des Softwareprototyps von ausführlichen manuellen Herstellkostenschätzungen festgestellt. Größere Abweichungen entstehen unter anderem durch unpräzise Kostenmodelle und abweichende Prozessketten.

FF3.1: Wie kann die entwickelte Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) validiert werden?

Um geeignete Methoden für die Validierung auszuwählen, wird die Question-Method-Matrix (Tabelle 8.2) nach Blessing und Chakrabarti (2009) verwendet. Dazu wird die Eignung und der Zeitaufwand bewertet. Ausgewählt werden Beobachtung, Fragebogen und Interview. Diese werden kombiniert in einer Studie in der Entwicklungsumgebung der Robert Bosch GmbH angewendet.

FF3.2: Welchen Effekt hat die Unterstützung (Methode und Softwareprototyp) auf die Profitabilität durch Zeitaufwand, Transparenz und Wissensverfügbarkeit?

Die Evaluation in Kapitel 8 bestätigt grundsätzlich eine positive Wirkung der Unterstützung auf die Profitabilität. Die Wirkungskette mittels eines reduzierten Zeitaufwands wird verifiziert. Eine positive Wirkung auf die Transparenz und die Wissensbasis wird nur eingeschränkt bestätigt. Insbesondere durch Automatisierung kann der manuelle Zeitaufwand bei der Erstellung von Herstellkostenschätzungen reduziert werden. Ein gezielter Einsatz ist jedoch zu empfehlen, da das Aufwand-Nutzen-Verhältnis sich für die Methodenschritte stark unterscheidet.

Zukünftige Unterstützungen erfordern insbesondere eine verbesserte Transparenz, einen angemessenen Automatisierungsgrad und die Integration von Herstellbarkeitswissen für eine breite Nutzerakzeptanz. Die Umsetzung hängt zudem stark von dem Stand der Digitalisierung in Unternehmen ab. Dazu gehören unter anderem die Verfügbarkeit eines 3D-Masters mit Produkt- und Fertigungsinformationen sowie die Qualität und Quantität der Wissensbasis. Da diese Grundlagen im Unternehmenskontext häufig nicht vorliegen, sind weitere Arbeiten zur durchgängigen Verfügbarkeit von Produkt- und Fertigungsinformationen erforderlich. Die Komplexität von Produkten und Fertigungssystemen nimmt zu, so dass eine Unterstützung nicht nur auf Komponentenebene, sondern auch auf Systemebene erforderlich ist. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Verknüpfung von Produktfunktionen und Herstellkosten, z. B. mit Methoden des Advanced Systems Engineering (ASE).

Zusammenfassend wird eine Steigerung der Profitabilität durch die Unterstützung von Herstellkostenschätzungen bei Getriebekomponenten der Elektromobilität

gesehen und die Forschungsthese damit bestätigt. Weitere Verbesserungen sind jedoch notwendig, um den Mehrwert zu steigern und die Unterstützung in geeigneter Weise in Unternehmensprozesse einzubinden. Zusätzlich ist die Übertragbarkeit auf andere Prozesse und Produkte außerhalb der Fertigung von Getriebekomponenten der Elektromobilität zu untersuchen.

9.2 Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen und Erkenntnissen dieser Arbeit ergeben sich Anknüpfungspunkte für weitere Forschungsarbeiten, die in diesem Kapitel beschrieben werden. Der Ausblick ist in die drei übergeordneten Forschungsfelder dieser Arbeit: 9.2.1 *Frühe Phase der SGE*, 9.2.2 *Cost Engineering* und 9.2.3 *Semantische Technologien* unterteilt (Abbildung 1.1).

9.2.1 Frühe Phase der SGE

Die Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung wird in dieser Arbeit im Kontext der Frühen Phase der SGE betrachtet. Eine Übertragbarkeit auf spätere Phasen der SGE wird vermutet, sollte jedoch in folgenden Arbeiten untersucht werden. In späteren Phasen reduzieren sich Unsicherheiten und der Umfang an produktbeschreibenden Informationen steigt. Gleichzeitig wird der Lösungsraum für das Produktionssystem weiter konkretisiert. Dabei gilt es Produktspezifika mit vorhandenen Produktionssystemen oder neuen parallel entwickelten Produktionssystemen zu synchronisieren.

Neben Informationen zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung werden über den gesamten Produktlebenszyklus relevante Informationen und Wissen zwischen Produktentwicklung und Produktion transferiert. Wichtig ist dabei der bidirektionale Wissenstransfer. Nicht nur die Fertigung benötigt Entwicklungsinformationen, auch die Entwicklung kann von Fertigungsinformationen profitieren. Dieser Wissenstransfer steht allerdings vor verschiedenen Problemen und Herausforderungen, wie beispielsweise fehlendem Fachwissen oder mangelnder Bereitschaft zum Wissensaustausch. Folglich können beispielsweise späte Änderungen hohe Kosten verursachen. So ist ein Lernen aus diesen Problemen und Herausforderungen entscheidend für den Erfolg zukünftiger Produktgenerationen und Produktionssystemevolutionen. Hierfür sollte der Wissenstransfer zwischen Produktentwicklung und Produktion detailliert beschrieben und untersucht werden, wie die Verbesserung dieser Wissenstransfers methodisch unterstützt werden kann. Auch die Erweiterbarkeit des Wissensgraphen gilt es in diesem Kontext zu untersuchen.

Dem *Leitbild Advanced Systems Engineering* folgend, sollte die Produktion und damit Herstellkosten bereits frühzeitig im Anforderungsmanagement und der Architektur von Systemen betrachtet werden (Albers, 2023). In dieser Arbeit wird lediglich die Modellierung von Fertigungs- und Kostenzusammenhängen in der technischen Umsetzung mittels 3D-Master bearbeitet. Ist eine durchgängige Modellierung von Anforderung, Funktion, logische Architektur und technischer Umsetzung gegeben, lassen sich Kosten z. B. auf Funktionen oder Anforderungen verteilen, was in der Frühen Phase der SGE den Kostenfokus weiter stärken kann. Zusätzlich ist eine ganzheitliche Betrachtung auf Systemebene von großer Bedeutung (Albers, 2023). So können die Herstellkosten des Gesamtsystems anstatt der einzelnen Komponenten optimiert werden. Hier besteht eine Verbindung zu Forschungsaktivitäten am IPEK – Institut für Produktentwicklung hinsichtlich der Systemgenerationsentwicklung (SGE) und des Advanced Systems Engineering (ASE).

9.2.2 Cost Engineering

Die Frühe Phase der SGE endet mit einem bewerteten Konzept. Das Cost Engineering stellt dabei Herstellkostenschätzungen als ökonomische Bewertung zur Verfügung. Eine große Herausforderung ist die Verfügbarkeit und Unsicherheit von Produkt- und Fertigungsinformationen. Insbesondere häufige Änderungen des Ist-Standes verursachen bei manuellen Tätigkeiten einen hohen Zeitaufwand. Hier bietet eine Steigerung des Automatisierungsgrades weiteres Potential. Unsicherheiten hinsichtlich der Abweichung können wiederum z. B. mit Konfidenzintervallen beschrieben werden. Eine derartige Beschreibung gilt es für Herstellkostenschätzungen zu erarbeiten und den vermuteten positiven Einfluss auf die Transparenz zu evaluieren.

Die bei der Evaluation festgestellte Abweichung der Herstellkostenschätzung des Softwareprototyps wird zu einem großen Teil auf unzureichend detailliert umgesetzte, prozessspezifische Berechnungsmodule zurückgeführt (Abschnitt 7.4). Für die Berechnung der Materialkosten stehen im Softwareprototyp nur wenige Rohstoffpreise zur Verfügung und auch die Berechnung des Bruttogewichts, ausgehend von Netto-Komponentengewichten, basiert auf groben Schätzungen. Hier besteht somit ein Bedarf den Softwareprototyp, z. B. durch detaillierte Berechnungsmodule, zu verbessern.

Die Evaluation des Softwareprototyps und der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung wird in der vorliegenden Arbeit auf Getriebekomponenten der Elektromobilität beschränkt. Die Übertragbarkeit der Methode auf andere Komponenten wird vermutet und sollte tiefergehend untersucht werden. Dafür sind

Produkt- und Fertigungsinformationen verschiedener Komponenten und Fertigungsknowhow der Prozesse notwendig.

Auch im Einkauf kann die Methode zur Unterstützung eingesetzt werden. Anforderungen an den Einkauf sind unter anderem die schnelle Reaktion auf Lieferantenanfragen und das Prüfen und Hinterfragen von Angeboten. Hier können modellierte Zusammenhänge zwischen Wirkflächen und Prozessschritten schnell einen Überblick schaffen und Wissen vermitteln. Zusätzlich können generierte Prozessketten und grobe Herstellkostenschätzungen als Gesprächsgrundlage für Preisverhandlungen dienen. Weitere Anforderungen des Einkaufs an die Methode und eine eventuelle Anpassung der Methode sind vor einer Einführung im Detail zu untersuchen.

Ein weiterer Bedarf besteht in der Prüfung der Fertigbarkeit. Die referenzbasierte Methode sieht einen Prüfschritt vor, der im Funktionsdemonstrator vollständig manuell erfolgt. Eine automatisierte Prüfung der Fertigbarkeit kann hier untersuchen, ob eine, basierend auf Referenzsystemelementen erstellte, Prozesskette geeignet ist. Hier können z. B. Ansätze des Constraint-Satisfaction-Problems wie von Herrmann, Plappert, Gembarski und Lachmayer (2023) angewendet werden.

9.2.3 Semantische Technologien

In dieser Arbeit werden semantische Technologien verwendet, um Zusammenhänge zwischen Produkt und Fertigung basierend auf Wirkflächen zu modellieren und Referenzsystemelemente automatisiert zu identifizieren. Neben Herstellkostenschätzungen wird dieser Zusammenhang auch für weitere Aktivitäten im Entwicklungsprozess benötigt. So gewinnen Nachhaltigkeitsbetrachtungen von Produkten an Bedeutung. Aufgrund zunehmender regulatorischer Anforderungen und steigender Kundenbedürfnisse werden vermehrt Lebenszyklusanalysen (engl. Lifecycle Assessments, LCA) und CO₂-Fußabdrücke (engl. Product Carbon Footprint, PCF) von Produkten erstellt. Auch hier werden Wissensgraphen bereits verwendet (z. B. Y. Wang et al., 2022). Eine Methode zur referenzbasierten Lebenszyklusanalyse kann in folgenden Arbeiten tiefergehend untersucht werden.

Die Arbeit mit semantischen Technologien in der Produktentwicklung hat sich durch neue Methoden und Tools, sowie verbesserte Rechenleistung und Netzwerkarchitekturen seit der Betrachtung von Schmalenbach (2013) verbessert. Jedoch benötigt die Umsetzung von semantischen Technologien weiterhin eine tiefe Einarbeitung und Hintergrundwissen. Dies erhöht zusammen mit zusätzlich benötigten Tools den Umsetzungsaufwand. Insbesondere für kleine und mittlere

Unternehmen ist die Einstiegshürde in semantische Technologien nach wie vor hoch. Der potenzielle Nutzen und die Vielseitigkeit möglicher Einsatzszenarien sprechen wiederum für die Auseinandersetzung mit semantischen Technologien. Hier gibt es einen Bedarf für weitere Methoden für den Einsatz semantischer Technologien in der Produktentstehung, bei denen der Mensch im Mittelpunkt steht.

Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2003). Produktentwicklung - Heute und Morgen. *Konstruktion*, 55(11/12), 3–5.
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In I. Horvath, F. Mandorli & Z. Rusak (Hrsg.), *Proceedings of the TMCE 2010 Symposium* (S. 343–356). Ancona, Italy.
- Albers, A. (Hrsg.). (2023). *Engineering neu denken und gestalten. Herausforderungen, Anwendungsszenarien und das neue Leitbild Advanced Systems Engineering (acatech IMPULS)*. München.
https://doi.org/10.48669/aca_2023-7
- Albers, A., Behrendt, M. & Ott, S. (2010). Validation - Central Activity to Ensure Individual Mobility. In *33rd FISITA 2010 World Automotive Congress* (Bd. 30). Budapest, Hungary.
- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2013). X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. In U. Lindemann, S. Venkataraman, Y. Kim, S. Lee, A. Dong & Y. Lin (Hrsg.), *19th International Conference on Engineering Design (ICED13). Design for Harmonies, Vol.6: Design Information and Knowledge* (pp. 391–400). Seoul, Korea: The Design Society.
- Albers, A. & Braun, A. (2011a). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International journal of product development*, 15(1/2/3), 6–25.
<https://doi.org/10.1504/IJPD.2011.043659>
- Albers, A. & Braun, A. (2011b). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau* (S. 3–30). Hanser Verlag.
- Albers, A., Braun, A. & Muschik, S. (2010). Uniqueness and the Multiple Fractal Character of Product Engineering Processes. In P. Heisig, P. J. Clarkson & S.

- Vajna (Hrsg.), *1st International Conference on Modelling and Management Engineering Processes* (S. 15–26). Cambridge, United Kingdom: Springer.
- Albers, A., Burkardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN problem solving methodology in the product development. In A. Samuel & W. Lewis (Hrsg.), *15th International Conference on Engineering Design (ICED05)*. Melbourne, Australia.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2015*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Lindow, K., Riedel, O. & Stark, R. (Hrsg.). (2022). *Strategie Advanced Systems Engineering – Leitinitiative zur Zukunft des Engineering und Innovationsstandorts Deutschland*. München.
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Richter, T. [Thilo], Reiß, N., Maier, A. et al. (2018). Managing systems of objectives in the agile development of mechatronic systems by ASD – Agile Systems Design. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *Proceedings of the 13th NordDesign: Design in the Era of Digitalization 2018*. Linköping, Sweden.
- Albers, A., Kürten, C., Rapp, S., Birk, C., Hünemeyer, S. & Kempf, C. (2022). *SGE – Systemgenerationsentwicklung: Analyse und Zusammenhänge von Entwicklungspfaden in der Produktentstehung*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000151151>
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. In S. J. Culley, B. J. Hicks, T. C. McAlloone, T. J. Howard & J. Clarkson (Hrsg.), *18th International Conference on Engineering Design (ICED11)* (Bd. 2). Copenhagen, Denmark.
- Albers, A. & Matthiesen, S. (2002). Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zur Analyse und Synthese technischer Systeme. *Konstruktion*, 54(7-8), 55–60.
- Albers, A. & Meboldt, M. (2007). IPPEMM – Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic

- Problem Solving. In J. C. Bocquet (Hrsg.), *16th International Conference on Engineering Design (ICED07)* (537). Paris, France: The Design Society.
- Albers, A. & Rapp, S. (2022). Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In D. Krause & E. Heyden (Hrsg.), *Design Methodology for Future Products* (S. 27–46). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2017*. Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Rapp, S., Fahl, J., Hirschter, T., Revfi, S., Schulz, M. et al. (2020). PROPOSING A GENERALIZED DESCRIPTION OF VARIATIONS IN DIFFERENT TYPES OF SYSTEMS BY THE MODEL OF PGE – PRODUCT GENERATION ENGINEERING. In Design Society (Hrsg.), *16th International Design Conference (DESIGN)* (Proceedings of the Design Society, Bd. 1, S. 2235–2244). Cavtat, Croatia.
- Albers, A., Rapp, S., Klippert, M., Lanza, G. & Schäfer, L. (2022). Produkt-Produktions-CoDesign: Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg. *News / Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung, WiGeP, Berliner Kreis & WGMK, 01/2022*, 3.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T. [Thilo], Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. In S. Wartzack & B. Schleich (Hrsg.), *22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)* (Bd. 1, S. 1693–1702). Delft, The Netherlands: The Design Society.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2016*. Trondheim, Norway: The Design Society.
- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N. & Richter, T. [Thilo] (2016). iPeM - integrated Product engineering Model in context of Product Generation Engineering. In L.

- Wang & T. Kjellberg (Hrsg.), *26th CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 50, 100-105). Stockholm, Schweden.
- Albers, A., Saak, M. & Burkardt, N. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In *47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (S. 83–84). Ilmenau.
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C²-A): relating a system's physical structure to its functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Hrsg.), *An Anthology of Theories and Models of Design: Philosophy, Approaches and Empirical Explorations* (S. 151–171). London: Springer.
- Baader, F., Horrocks, I. & Sattler, U. (2009). Description Logics. In S. Staab & R. Studer (Hrsg.), *Handbook on Ontologies* (S. 21–43). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_1
- Baumann, P., Krammer, M., Driussi, M., Mikelsons, L., Zehetner, J., Mair, W. et al. (2019). Using the Distributed Co-Simulation Protocol for a Mixed Real-Virtual Prototype. In *2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (S. 440–445). Ilmenau: IEEE.
- Ben-Arieh, D. & Qian, L. (2003). Activity-based cost management for design and development stage. *International Journal of Production Economics*, 83(2), 169–183. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00323-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00323-7)
- Bender, B., Feldhusen, J., Krause, D., Beckmann, G., Paetzold, K. & Hövel, A. (2020). Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens. In B. Bender & D. Göhlich (Hrsg.), *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen* (S. 3–63). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2_1
- Berners-Lee, T., Fielding, R. & Masinter, L. (2005). *Uniform Resource Identifier (URI): Generic syntax*. Zugriff am 09.03.2023 unter: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3986>
- Berners-Lee, T., Hendler, J. & Lassila, O. (2001). The Semantic Web: A New Form of Web Content That is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities. *Scientific American*, 284(5), 34-43.
doi:10.1038/scientificamerican052001-yL7Vw7HIOZ4iSjlneEeVsJ

- Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a design research methodology*. London, United Kingdom: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bodendorf, F. [Frank], Dehmel, K. & Franke, J. (2022). Scientific Approaches and Methodology to Determine the Value of Data as an Asset and Use Case in the Automotive Industry. In T. Bui (Hrsg.), *Proceedings of the 55th Hawaii International Conference on System Sciences*. Honolulu, Hawaii.
- Bodendorf, F. [Frank], Merkl, P. & Franke, J. (2021). Intelligent cost estimation by machine learning in supply management: A structured literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107601. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2021.107601>
- Bodendorf, F. [Freimut]. (2006). *Daten- und Wissensmanagement* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-28682-9>
- Boothroyd, G. (1994). Product design for manufacture and assembly. *Computer-Aided Design*, 26(7), 505–520. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5)
- Borst, W. (1997). *Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse*. Dissertation. Centre for Telematics and Information Technology, Enschede.
- Brabec, D., Reißler, L. & Stenzel, A. (2021). *ISO GPS. Einführung in die geometrische Produktspezifikation* (1. Auflage). Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Brandmeier, M. (2020). Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. In J. Franke, N. Hanenkamp, M. Merklein, M. Schmidt & S. Wartzack (Hrsg.), *FAU Studien aus dem Maschinenbau* (Bd. 337). Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg: FAU University Press. <https://doi.org/10.25593/978-3-96147-276-5>
- Budiono, H. D. & Lassandy, M. (2018). Cost estimation model in early stage of design through implant miniplate complexity process index. *E3S Web of Conferences*, 67. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186701030>

- Buede, D. M. (2016). *The engineering design of systems. Models and method* (Wiley Series in Systems Engineering and Management, 3rd ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Bursac, N. (2016). Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 93). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000054484>
- Cabasino, M. P., Giua, A. & Seatzu, C. (2013). Introduction to Petri Nets. In C. Seatzu, M. Silva & J. H. van Schuppen (Hrsg.), *Control of Discrete-Event Systems: Automata and Petri Net Perspectives* (S. 191–211). London: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4276-8_10
- Campi, F., Mandolini, M., Favi, C., Checcacci, E. & Germani, M. (2020). An analytical cost estimation model for the design of axisymmetric components with open-die forging technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(7-8), 1869–1892. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05948-w>
- Charpentier, F. (2014). *Leitfaden für die Anwendung der Normen zur geometrischen Produktspezifikation (GPS). ISO-GPS-Normen (Praxis Messwesen, 1. Aufl.)*. Berlin: Beuth.
- Clifton, M. B., Townsend, W. P., Bird, H. M. & Albano, R. E. (2019). *Target Costing*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781482276343>
- Codd, E. F. (2001). A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. In M. Broy & E. Denert (Hrsg.), *Pioneers and Their Contributions to Software Engineering* (S. 61–98). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_4
- Cornelsen Verlag (Hrsg.). (2023). "Domäne" auf Duden online. Zugriff am 24.06.2023 unter: <https://www.duden.de/node/33952/revision/1312442>
- Demarest, M. (1997). Understanding knowledge management. *Long Range Planning*, 30(3), 374–384. [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(97\)90250-8](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(97)90250-8)

- Dengel, A. (2012). *Semantische Technologien*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2664-2>
- DIN ISO, 2768-1:1991-06. *Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzteintragung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN, 586-3:2002-02. *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schmiedestücke - Teil 3: Grenzabmaße und Formtoleranzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN, 8580:2022-12. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 22081:2022-10. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Allgemeine geometrische und Größenmaßspezifikationen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 8015:2011-09. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 17450-1:2012-04. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 1: Modell für die geometrische Spezifikation und Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 17450-2:2013-04. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Teil 2: Grundsätze, Spezifikationen, Operatoren, Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 8062-1:2008-01. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile - Teil 1: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO, 22432:2012-03. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Zur Spezifikation und Prüfung benutzte Geometrieelemente*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN, 10243-1:2000-06. *Gesenkschmiedeteile aus Stahl - Maßtoleranzen - Teil 1: Warm hergestellt in Hämtern und Senkrech-Pressen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN, 10243-2:2000-06. *Gesenkschmiedeteile aus Stahl - Maßtoleranzen - Teil 2: Warm hergestellt in Waagerecht-Stauchmaschinen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN, 40680-1:1983-08. *Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik; Allgemeintoleranzen für Maße*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN, 6930-2:2011-10. *Stanzteile aus Stahl - Teil 2: Allgemeintoleranzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dienes, Z. & Perner, J. (1999). A theory of implicit and explicit knowledge. *The Behavioral and Brain Sciences*, 22(5), 735-808.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X99002186>
- Dumitrescu, R., Albers, A., Riedel, O., Stark, R. & Gausemeier, J. (Hrsg.). (2021). *Engineering in Deutschland - Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering*. Paderborn: Fraunhofer IEM.
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 85). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Hundal, M. S. (2007). *Cost-Efficient Design*. New York, USA: ASME. <https://doi.org/10.1115/1.802507>
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (2014). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-41959-1>
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (2020). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung* (8. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-62591-0>
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013). *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit* (5. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.

- Ehrlinger, L. & Wöß, W. (2016). Towards a Definition of Knowledge Graphs. In A. Fensel, A. Zaveri, S. Hellmann & T. Pellegrini (Hrsg.), *12th International Conference on Semantic Systems*. Leipzig.
- Eigner, M., Dickopf, T., Schneider, M. & Schulte, T. (2017). *mecPro2* - A holistic concept for the model-based development of cybertronic systems. In A. Maier, S. Skec, H. Kim, M. Kokkolaras, J. Oehmen, G. Fadel et al. (Hrsg.), *21st International Conference on Engineering Design (ICED17). Vol.3: Product, Services and Systems Design* (S. 379–388). Vancouver, Canada: The Design Society.
- Ertel, W. (2013). *Grundkurs Künstliche Intelligenz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2157-7>
- Fakhar Manesh, M., Pellegrini, M. M., Marzi, G. & Dabic, M. (2021). Knowledge Management in the Fourth Industrial Revolution: Mapping the Literature and Scoping Future Avenues. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68(1), 289–300. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2963489>
- Fallböhmer, M. (2000). Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. In W. Eversheim, F. Klocke, T. Pfeifer, G. Schuh, M. Weck, C. Brecher et al. (Hrsg.), *Berichte aus der Produktionstechnik* (Bd. 23). Aachen: Shaker.
- Feigenbaum, L., Herman, I., Hongsermeier, J., Neumann, E. & Stephens, S. (2009). *The Semantic Web in Action*. Scientific American. Zugriff am 09.03.2023 unter <https://www.scientificamerican.com/article/semantic-web-in-action/>
- Feng, C.-X., Kusiak, A. & Huang, C.-C. (1996). Cost evaluation in design with form features. *Computer-Aided Design*, 28(11), 879–885. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(96\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0010-4485(96)00009-7)
- Fensel, D., Şimşek, U., Angele, K., Huaman, E., Kärle, E., Panasiuk, O. et al. (2020). *Knowledge Graphs*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37439-6>
- Ficko, M., Drstvenšek, I., Brezočnik, M., Balič, J. & Vaupotic, B. (2005). Prediction of total manufacturing costs for stamping tool on the basis of CAD-model of

- finished product. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 1327–1335. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.013>
- Fleischer, J., Albers, A., Ovtcharova, J., Becker, J., Lanza, G., Zhang, W. et al. (2022). *Final Report Sino-German Industry 4.0 Factory Automation Platform*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000143693>
- Fürber, C. (2016). *Data Quality Management with Semantic Technologies* (1st ed.). Wiesbaden: Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12225-6>
- Gausemeier, J., Czaja, A. & Dülme, C. (2015). Innovationspotentiale auf dem Weg zu Industrie 4.0. In J. Gausemeier, R. Dumitrescu, F. Rammig, W. Schäfer & A. Trächtler (Hrsg.), *Wissenschafts- und Industrieforum Intelligente Technische Systeme 2015. Workshop: Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn.
- Gleadall, A., Vladov, N., Segal, J., Ratchev, S., Plasch, M., Kimmig, D. et al. (2016). A decision support methodology for embodiment design and process chain selection for hybrid manufacturing platforms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), 553–569. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8514-7>
- Grauberger, P., Heimicke, J., Nann, S., Albers, A. & Matthiesen, S. (2020). A guideline for modelling relations of embodiment and function in agile development. *SN Applied Sciences*, 2(9), 57. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03271-3>
- Greves, D. & Journier, H. (2003). Cost engineering for cost-effective space programmes. *ESA BULL-EUR SPACE AGENCY*, 115, 71–75.
- Grimm, S., Hitzler, P. & Abecker, A. (2007). Knowledge Representation and Ontologies. In R. Studer, S. Grimm & A. Abecker (Hrsg.), *Semantic Web Services* (S. 51–105). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-70894-4_3
- Gröger, C., Schwarz, H. & Mitschang, B. (2014). The Manufacturing Knowledge Repository - Consolidating Knowledge to Enable Holistic Process Knowledge Management in Manufacturing. In S. Hammoudi, L. Maciaszek & J. Cordeiro (Hrsg.), *Proceedings of the 16th International Conference on Enterprise Information Systems* (S. 39–51). Lisbon, Portugal: SCITEPRESS.

- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199–220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
- Guarino, N., Oberle, D. & Staab, S. (2009). What Is an Ontology? In S. Staab & R. Studer (Hrsg.), *Handbook on Ontologies* (S. 1–17). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_0
- Gupta, S. K., Nau, D. S., Regli, W. C. & Zhang, G. (1994). CHAPTER 8 - A Methodology For Systematic Generation And Evaluation Of Alternative Operation Plans. In J. J. Shah, M. Mäntylä & D. S. Nau (Hrsg.), *Manufacturing Research and Technology : Advances in Feature Based Manufacturing* (Bd. 20, S. 161–184). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-81600-9.50013-4>
- Häder, M. (2014). *Delphi-Befragungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01928-0>
- Herrmann, K., Plappert, S., Gembarski, P. C. & Lachmayer, R. (2023). Process Chain-Oriented Design Evaluation of Multi-Material Components by Knowledge-Based Engineering. *Algorithms*, 16(5), 247. <https://doi.org/10.3390/a16050247>
- Hintzen, H., Laufenberg, H. & Kurz, U. (2000). *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-93855-8>
- Hogan, A., Blomqvist, E., Cochez, M., D'amato, C., Melo, G. de, Gutierrez, C. et al. (2022). Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*, 54(4), 1–37. <https://doi.org/10.1145/3447772>
- Horsch, J. (2018). *Kostenrechnung: Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20030-5>
- Hoyningen-Huene, P. (1998). *Formale Logik. Eine philosophische Einführung*. Stuttgart: Reclam.
- ISO, 10303-242:2022-12. *Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange - Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Jacob, A. (2021). Hochiterative Technologieplanung. Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung. In J. Fleischer, G. Lanza & V. Schulze (Hrsg.), *Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation* (Bd. 246). Düren: Shaker.

Jean, S., Pierra, G. & Ait-Ameur, Y. (2007). Domain Ontologies: A Database-Oriented Analysis. In W. van der Aalst, J. Mylopoulos, N. M. Sadeh, M. J. Shaw, C. Szyperski, J. Filipe et al. (Hrsg.), *Web Information Systems and Technologies* (Bd. 1, S. 238–254). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-74063-6_19

Jetbrains (Hrsg.). (2023). *Pycharm*. Zugriff am 24.06.2023 unter:
<https://jetbrains.com/pycharm>

Ji, S., Pan, S., Cambria, E., Marttinen, P. & Yu, P. S. (2022). A Survey on Knowledge Graphs: Representation, Acquisition, and Applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(2), 494–514.
<https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3070843>.

Jorden, W. & Schütte, W. (2020). *Form- und Lagetoleranzen. Geometrische Produktspezifikationen (ISO GPS) in Studium und Praxis* (10. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Jung, J.-Y. (2002). Manufacturing cost estimation for machined parts based on manufacturing features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13(4), 227–238.
<https://doi.org/10.1023/A:1016092808320>

Kampker, A., Heimes, H. H., Dorn, B., Brans, F., Nankemann, M., Backes, T. et al. (2022). *ELEKTROMOTORENPRODUKTION. DIE WERTSCHÖPFUNGSKETTE IM SPANNUNGSFELD VON „MARKET PULL“ UND „TECHNOLOGY PUSH“* (1. Aufl.) (Production Engineering of E-Mobility Components, Hrsg.). Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Kang, M., Kim, G., Lee, T., Jung, C. H., Eum, K., Park, M. W. et al. (2016). Selection and sequencing of machining processes for prismatic parts using process ontology model. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(3), 387–394. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0048-2>

- Khosravani, M. R. & Nasiri, S. (2020). Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(4), 847–864. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01481-0>
- Kiritsis, D., Neuendorf, K.-P. & Xirouchakis, P. (1999). Petri net techniques for process planning cost estimation. *Advances in Engineering Software*, 30(6), 375–387. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00126-4)
- Klippert, M., Preißner, A., Rust, H. & Albers, A. (2022). Analysis of Factors Influencing Knowledge Transfer between the Product and Production System Development as well as Production. In N. Anwer (Hrsg.), *32nd CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 109, Bd. 109, S. 340–348). Paris, France.
- Knoche, K. (2005). Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. In W. Eversheim, F. Klocke, T. Pfeifer, G. Schuh, M. Weck, C. Brecher et al. (Hrsg.), *Berichte aus der Produktionstechnik*. Aachen: Shaker.
- Krause, D., Vietor, T., Inkermann, D., Hanna, M., Richter, T. [Timo] & Wortmann, N. (2021). Produktarchitektur. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 335–393). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_12
- Lemaignan, S., Siadat, A., Dantan, J.-Y. & Semenenko, A. (2006). MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain. In *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and its Applications (DIS'06)* (S. 195–200). Prague, Czech Republic: IEEE.
- Leo Kumar, S. P. (2019). Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4766–4790. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1424372>
- Lohmeyer, Q. (2013). Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 59). Karlsruhe:

- Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000035102>
- Ludwig von Bertalanffy. (1972). The History and State of General Systems Theory. *Academy of Management Journal*, 15, 407–426.
- Lundgren, M., Hedlind, M. & Kjellberg, T. (2014). MODEL-BASED INTERACTIVE LEARNING OF PROCESS PLANNING. In J. Stare (Hrsg.), *6th Swedish Production Symposium*. Gothenburg, Sweden.
- Lysons, K. & Farrington, B. (2016). *Procurement and supply chain management. Purchasing and supply chain management* (9. Aufl.). Boston, USA: Pearson.
- Mabkhot, M. M., Al-Samhan, A. M. & Hidri, L. (2019). An Ontology-Enabled Case-Based Reasoning Decision Support System for Manufacturing Process Selection. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1–18.
<https://doi.org/10.1155/2019/2505183>
- Mandel, C. (2024). Entwicklung einer Model-Based Systems Engineering Methodik zur Unterstützung der Validierung im Produktentstehungsprozess. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 175). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000175135>
- Mandolini, M., Campi, F., Favi, C., Germani, M. & Raffaeli, R. (2020). A framework for analytical cost estimation of mechanical components based on manufacturing knowledge representation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3-4), 1131–1151.
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05068-5>
- Mandolini, M., Favi, C., Campi, F. & Raffaeli, R. (2020). A Knowledge Formalization Approach for Manufacturing Cost Estimation. In C. Rizzi, A. O. Andrisano, F. Leali, F. Gherardini, F. Pini & A. Vergnano (Hrsg.), *Design Tools and Methods in Industrial Engineering* (S. 279–290). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31154-4_24
- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für*

- Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 74). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>
- Matthiesen, S. (2002). Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells Wirkflächenpaare & Leistützstrukturen zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau* (Bd. 6). Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH).
<https://doi.org/10.5445/IR/12092002>
- Matthiesen, S. (2021). Gestaltung – Prozess und Methoden. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 397–465). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_13
- Matthiesen, S., Grauberger, P., Hölz, K., Nelius, T., Bremer, F., Wettstein, A. et al. (2018). *Modellbildung mit dem C&C²-Ansatz in der Gestaltung - Techniken zur Analyse und Synthese*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000080744>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (12. Aufl.). Weinheim, Basel: Beltz.
- Moeser, G. (2016). *Kurzversion FAS4M Methodenguideline. Methodisches Vorgehen im FAS4M-Ansatz*. Karlsruhe: IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Moeser, G., Grundel, M., Weilkiens, T., Kümpel, S., Kramer, C. & Albers, A. (2016). Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf: Ergebnisse des FAS4M-Projektes. In S. Schulze & C. Muggeo (Hrsg.), *Tag des Systems Engineering* (S. 417–428). Herzogenaurach.
- Mörtl, M. & Schmied, C. (2015). Design for Cost—A Review of Methods, Tools and Research Directions. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95:4.
- Muschik, S. (2011). Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering, Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des*

IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse.

Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. & Seneviratne, L. (2006). Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(2), 563–575.

<https://doi.org/10.1115/1.2137750>

Nonaka, I. & Peltokorpi, V. (2006). Objectivity and subjectivity in knowledge management: a review of 20 top articles. *Knowledge and Process Management*, 13(2), 73–82. <https://doi.org/10.1002/kpm.251>

Ogden, C. K. & Richards, I. A. (1923). *The meaning of meaning. A study of the influence of language upon thought and of the science of symbolism*. New York: Harcourt Brace and World.

Oliveira, P., Bresnahan, J. & Nowell, S. (Read the Docs, Hrsg.). (2023). *pystardog*. Zugriff am 21.03.2023 unter: <https://pystardog.readthedocs.io/en/latest>

Object Management Group. (2019). *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML) - Version 1.6*. Zugriff am 06.03.2023 unter: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.6/PDF>

Pellegrini, T. (Hrsg.). (2006). *Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft; mit 4 Tabellen*. Berlin: Springer.

Pérez, J., Arenas, M. & Gutierrez, C. (2009). Semantics and complexity of SPARQL. *ACM Transactions on Database Systems*, 34(3), 1–45.

<https://doi.org/10.1145/1567274.1567278>

Python Software Foundation (Hrsg.). (2023a). *Python*. Zugriff am 21.03.2023 unter: <https://www.python.org>

Python Software Foundation (Hrsg.). (2023b, 21. März). *tkinter — Python interface to Tk/TK*. Zugriff am 21.03.2023 unter: <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>

Qian, L. & Ben-Arieh, D. (2008). Parametric cost estimation based on activity-based costing: A case study for design and development of rotational parts.

- International Journal of Production Economics*, 113(2), 805–818.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.08.010>
- Quintas, P., Lefrere, P. & Jones, G. (1997). Knowledge management: A strategic agenda. *Long Range Planning*, 30(3), 385–391. [https://doi.org/10.1016/S0024-6301\(97\)90252-1](https://doi.org/10.1016/S0024-6301(97)90252-1)
- Reinemann, J. (2021). Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung = Development of an Approach for the Validation of Interactive Products in Augmented Reality Environments in the Early Phase in the Model of PGE – Product Generation Engineering. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000128685>
- Rezaei, A., Xiao, C., Gao, J., Li, B. & Munir, S. (2018). *Application-driven Privacy-preserving Data Publishing with Correlated Attributes*. arXiv preprint.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.10193>
- Richter, T. [Thilo], Rapp, S., Kurtz, V., Romanov, V. & Albers, A. (2019). Creating innovative products with reference system elements - a case study on approaches in practice. In G. D. Putnik (Hrsg.), *29th CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 84, Bd. 84, S. 804–809). Povoa de Varzim, Portugal.
- Robert Bosch GmbH (Hrsg.). (2022). *Decoding Tomorrow. Bosch heute Zahlen und Fakten 2022*. Zugriff am 14.03.2023 unter:
https://assets.bosch.com/media/global/bosch_group/our_figures/pdf/bosch-heute-2022.pdf
- Robert Bosch GmbH (Hrsg.). (2023a). *Forschungsstandorte. Unsere weltweiten Forschungs- und Vorausentwicklungsstandorte*. Zugriff am 14.03.2023 unter:
<https://www.bosch.com/de/forschung/ueber-die-forschung/forschungsstandorte/>
- Robert Bosch GmbH (Hrsg.). (2023b). *Publikationen. Entdecken Sie einige der besten Publikationen und Dissertationen der Bosch Forschung*. Zugriff am 14.03.2023 unter: <https://www.bosch.com/de/forschung/know-how/publikationen/>

- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In G. Ropohl (Hrsg.), *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik* (3. Aufl.). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. Verfügbar unter: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000011529>
- Roy, R., Souchoroukov, P. & Shehab, E. (2011). Detailed cost estimating in the automotive industry: Data and information requirements. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 694–707. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.018>
- Schindler, S. (2015). *Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Dissertation, Technische Universität München* (1. Aufl.). München: Herbert Utz Verlag.
- Schmalenbach, H. H. (2013). Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000036526>
- Schneider, E. W. (1972). *Course Modularization Applied: The Interface System and Its Implications For Sequence Control and Data Analysis* (National Science Foundation, Hrsg.). Alexandria: Human Resources Research Organization.
- Schrader, B. (Enterprise Knowledge, Hrsg.). (2020). *What's the Difference Between an Ontology and a Knowledge Graph?* Zugriff am 09.03.2023 unter: <https://enterprise-knowledge.com/whats-the-difference-between-an-ontology-and-a-knowledge-graph/>
- Shehab, E. & Abdalla, H. (2001). Manufacturing cost modelling for concurrent product development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(4), 341–353. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(01)00009-6)
- Siemens Digital Industries Software (Hrsg.). (2023). *Teamcenter Product cost management*. Zugriff am 24.03.2023 unter: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/teamcenter/solutions/product-cost-management/>

- Singhal, A. (Google, Hrsg.). (2012). *Introducing the Knowledge Graph: things, not strings*. Zugriff am 09.03.2023 unter:
<https://www.blog.google/products/search/introducing-knowledge-graph-things-not/>
- Staab, S. & Studer, R. (Hrsg.). (2009). *Handbook on Ontologies*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stardog Union (Hrsg.). (2023). *Stardog*. Zugriff am 21.03.2023 unter:
<https://www.stardog.com>
- Stockton, D. J., Khalil, R. A. & Mukhongo, L. M. (2013a). Cost model development using virtual manufacturing and data mining: part II—comparison of data mining algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9-12), 1389–1396. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4416-5>
- Stockton, D. J., Khalil, R. A. & Mukhongo, L. M. (2013b). Cost model development using virtual manufacturing and data mining: part I—methodology development. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 741–749. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4362-2>
- Stryker GmbH (Hrsg.). (2020). *VariAx 2 Mini Fragment System*. Zugriff am 06.01.2025 unter: https://www.stryker.com/content/dam/stryker/trauma-and-extremities/products/variax-mini-fragment/resources/VAX_ST_64.pdf
- Studer, R., Benjamins, V. & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, 25(1-2), 161–197. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(97\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(97)00056-6)
- Studer, R., Grimm, S. & Abecker, A. (Hrsg.). (2007). *Semantic Web Services*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-70894-4>
- Stürner, F. M., Brenneis, A., Buck, T., Kassel, J., Rölver, R., Fuchs, T. et al. (2021). Integrated and Portable Magnetometer Based on Nitrogen-Vacancy Ensembles in Diamond. *Advanced Quantum Technologies*, 4(4), 2000111. <https://doi.org/10.1002/qute.202000111>

Topquadrant (Hrsg.). (2023, 21. März). *TopQuadrant*. Zugriff am 21.03.2023 unter:
<https://www.topquadrant.com/>

Trommer, G. (2001). Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. In W. Eversheim, F. Klocke, T. Pfeifer, G. Schuh, M. Weck, C. Brecher et al. (Hrsg.), *Berichte aus der Produktionstechnik* (Bd. 15). Aachen: Shaker.

Tröster, P. M., Klotz, T., Rapp, S., Wessels, H., Ott, S. & Albers, A. (2021). Modellierung einer Einscheibentrockenkupplung mithilfe des C&C2-Ansatzes zur Identifikation von kritischen Gestalt-Funktion-Zusammenhängen bezüglich des Schwingungsphänomens zwangserregtes Kupplungsrumfen. *Forschung im Ingenieurwesen*. <https://doi.org/10.1007/s10010-021-00560-0>

VDI-Richtlinie, 2235 (1987). *Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren*. Düsseldorf: VDI-Verl.

VDI-Richtlinie, 5610 Blatt 1:2009-03 (2009). *Wissensmanagement im Ingenieurwesen - Grundlagen, Konzepte, Vorgehen*. Düsseldorf: VDI-Verl.

Voltolini, R., Borsato, M. & Peruzzini, M. (2019). Cost Estimation in Initial Stages of Product Development – An Ontological Approach. In K. Hiekata, B. R. Moser, M. Inoue, J. Stjepandić & N. Wognum (Hrsg.), *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems (Advances in Transdisciplinary Engineering*, S. 583–592). IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE190167>

Voltolini, R., Vasconcelos, K., Borsato, M. & Peruzzini, M. (2018). Research and Analysis of Opportunities in Product Development Cost Estimation Through Expert Systems. In M. Peruzzini (ed.), *25th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering. Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4. 0 (Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 7, S. 381–390). Amsterdam, The Netherlands: IOS Press.

Voltolini, R., Vasconcelos, K., Borsato, M. & Peruzzini, M. (2019). Product development cost estimation through ontological models – a literature review. *Journal of Management Analytics*, 6(2), 209–229.
<https://doi.org/10.1080/23270012.2019.1598899>

- Wang, P.-W., Donti, P. L., Wilder, B. & Kolter, Z. (2019). *SATNet: Bridging deep learning and logical reasoning using a differentiable satisfiability solver*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.12149>
- Wang, Y., Tao, J., Liu, W., Peng, T., Tang, R. & Wu, Q. (2022). A Knowledge-enriched Framework for Life Cycle Assessment in Manufacturing. In W. Dewulf & J. R. Duflou (Hrsg.), *29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering* (Procedia CIRP, Bd. 105, S. 55–60). Leuven, Belgium.
- Weilkiens, T., Lamm, J. G., Roth, S. & Walker, M. (2015). *Model-Based System Architecture*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. Verfügbar unter: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119051930>
- Weustink, I., Brinke, E. ten, Streppel, A. & Kals, H. (2000). A generic framework for cost estimation and cost control in product design. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 141–148. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00405-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00405-2)
- Wright, S. E. (2003). From the semiotic trangle to the semantic web. *IITF Journal*, (14), 111–135.
- Xu, P., Mei, H., Ren, L. & Chen, W. (2017). ViDX: Visual Diagnostics of Assembly Line Performance in Smart Factories. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(1), 291–300. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2598664>
- Xu, Y., Elgh, F., Erkoyuncu, J., Bankole, O., Goh, Y. M., Cheung, W. et al. (2012). Cost Engineering for manufacturing: Current and future research. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(4-5), 300–314. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.542183>
- Zhang, Y., Luo, X., Zhang, H. & Sutherland, J. W. (2014). A knowledge representation for unit manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 1011–1031. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5864-x>
- Zhen, L., Wang, L. & Li, J.-G. (2013). A design of knowledge management tool for supporting product development. *Information Processing & Management*, 49(4), 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2013.01.008>

Zhu, Z., Dhokia, V. G., Nassehi, A. & Newman, S. T. (2013). A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(7), 596–615. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749530>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) oder anderen Hochschulen vom Autor co-betreut wurden:

Brückmann, H. (2021). *Entwicklung eines Ontologie-basierten Modells zur Verknüpfung von Produktinformationen*. Unveröffentlichte Masterthesis. Hochschule Aalen, Aalen.

Cacaj, A. (2022). *Validierung einer Methode zur automatisierten Herstellkostenschätzung am Beispiel von Getriebekomponenten für die E-Mobilität*. Unveröffentlichte Masterthesis. Technische Hochschule Ulm, Ulm.

Haneke, S. (2022). *Entwicklung eines auf Wissensgraphen basierenden Prozesskettengenerators*. Unveröffentlichte Masterthesis. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Des Weiteren wird auf nachfolgende studentische Arbeiten referenziert, die nicht durch den Autor dieser Arbeit co-betreut wurden:

Gängler, T. (2011). *Semantic Federation of Musical and Music-Related Information for Establishing a Personal Music Knowledge Base*. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Dresden.

Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Forschungsarbeit entstanden sind:

- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F. et al. (2022). Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles. In N. Anwer (Hrsg.), *32nd CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 109, S. 167–172). Paris, France.
- Hellweg, F. & Behrendt, M. (2021). Enabling Cost Efficient Product Design - An Interview Study on Relevant Manufacturing and Cost Information in Early Phases of Product Development. In *R&D Management Conference 2021 - Innovation in an Era of Disruption*. Glasgow, Scotland.
- Hellweg, F., Brückmann, H., Beul, T., Mandel, C. & Albers, A. (2022). Knowledge graph for manufacturing cost estimation of gear shafts - a case study on the availability of product and manufacturing information in practice. In N. Anwer (Hrsg.), *32nd CIRP Design Conference* (Procedia CIRP, Bd. 109, S. 245–250). Paris, France.
- Hellweg, F., Cacaj, A., Haneke, S. & Albers, A. (2023). METHOD FOR REFERENCE-BASED MANUFACTURING COST ESTIMATION - EVALUATION STUDY USING A PROTOTYPE. In Design Society (Hrsg.), *24nd International Conference on Engineering Design (ICED23)* (Proceedings of the Design Society, Bd. 3, S. 2625–2634). Bordeaux, France.
- Hellweg, F., Haneke, S., Cacaj, A., Rapp, S. & Albers, A. (2023). Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung – Semantische Technologien für die Prozesskettenplanung. In K. Hözle, M. Kreimeyer, D. Roth, T. Maier & O. Riedel (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2023* (S. 378–389). Stuttgart: Fraunhofer IAO.

Anhang A

DS-I: Interviewleitfaden

Geplanter Zeitrahmen: 45 min

Geteilter Aufbau aus offenen Fragen zu Beginn und geschlossenen Fragen im Fragebogen am Ende

Legende:

In Standardschrift die Fragen.

In kursiver Schrift die Begründung, warum die Frage im Fragebogen steht.

Persönliche Fragen

- 1 Beschreiben Sie Ihre Tätigkeit und Ihr Tätigkeitsfeld
 - *Verständnis der Tätigkeit und Möglichkeit der späteren Einordnung der Ergebnisse, lockerer Einstieg, Stakeholder Zuordnung*
- 2 Wie viel Erfahrung haben Sie in der Produktentwicklung und in ihrem aktuellen Tätigkeitsfeld?
 - *Bei Veröffentlichung von Interviewergebnissen relevant. (Zusammenhang von Erfahrung und Nutzen der Methode möglich)*

Inhaltliche Fragen

- 3 Mit welchen Komponenten beschäftigen Sie sich hauptsächlich?
 - *Sind die Bedarfe von den Komponenten abhängig?*
- 4 Wie häufig beschäftigen Sie sich mit neuen Komponenten?
 - *Sind die Bedarfe abhängig von der Verweildauer in einem Komponentengebiet/ Erfahrung?*
- 5 In welcher Phase des Entwicklungsprozesses befinden Sie sich?
 - *In welcher Phase befindet sich der Stakeholder? Hat die Phase einen Einfluss auf die Bedarfe?*
- 6 Inwieweit werden Sie von Produktherstellkosten beeinflusst?
 - *Relevanz der Produktherstellkosten evaluieren/ Inwieweit werden die Produktherstellkosten als relevanter Einfluss gesehen?*
- 7 Inwieweit beeinflussen Sie die Produktherstellkosten?
 - *Bewusstsein des eigenen Einflusses auf Produktherstellkosten?*
- 8 Inwieweit werden Sie von Kosten, die nicht bei Robert Bosch oder dem OEM anfallen, sondern den Endnutzer betreffen, beeinflusst?
 - *Frage nach LCC-Einfluss, Tür öffnen für weiteres Vorgehen in diese Richtung*
- 9 Inwieweit haben Sie Einfluss auf die Kosten, die nicht bei Robert Bosch oder dem OEM anfallen, sondern den Endnutzer betreffen?
 - *Frage nach LCC-Einfluss, Tür öffnen für weiteres Vorgehen in die Richtung*

- 10 Inwiefern beeinflusst die Verfügbarkeit von kostenspezifischen Informationen Ihre Ergebnisse?
- 11 Welche kostenspezifischen Informationen?
 - *FF1.2*
- 12 Inwiefern beeinflusst die Verfügbarkeit von fertigungsspezifischen Informationen Ihre Ergebnisse?
- 13 Welche fertigungsspezifischen Informationen?
 - *FF1.2*
- 14 Inwieweit orientieren Sie sich bei Ihrer Arbeit an bereits vorhandenen Produkten?
 - *Werden auch schon jetzt Referenzprodukte betrachtet?*
- 15 Inwieweit haben Sie in der Vergangenheit von neuen Fertigungsverfahren Gebrauch gemacht? Warum und was waren ihre Erfahrungen damit?
 - *Hypothese: Kenntnis von und Wissen über neue Fertigungsverfahren ist unzureichend*
- 16 Wie zufrieden sind sie mit dem Wissenstransfer, bezüglich neuer Fertigungsverfahren und neuen Trends in vorhandenen Fertigungsverfahren, zu Ihnen?
 - *Hypothese: Kenntnis von und Wissen über neue Fertigungsverfahren ist unzureichend*
- 17 Haben Sie in der Vergangenheit im Nachhinein eines Projektes von Fertigungsverfahren erfahren, die die Produktherstellkosten gesenkt hätten?
 - *Hypothese: Kenntnis von und Wissen über neue Fertigungsverfahren ist unzureichend*

Fragebogen (ausgedruckt)

- 18 Wie oft müssen Sie in der Regel aufgrund von Kostenanforderungen/Kostenentscheidungen Änderungen an Ihrem Arbeitsstand vornehmen?
 - Sehr häufig, häufig, manchmal, selten, sehr selten, nie
 - Jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, Jedes Jahr, nie
 - *Relevanz/Einfluss der Kosten*
- 19 Wie oft fehlen Ihnen kostenspezifische Informationen?
 - Sehr häufig, häufig, manchmal, selten, sehr selten, nie
 - Jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, Jedes Jahr, nie
 - *Relevanz/Einfluss der Kosten*
- 20 Wie oft fehlen Ihnen fertigungsspezifische Informationen?
 - Sehr häufig, häufig, manchmal, selten, sehr selten, nie
 - Jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, Jedes Jahr, nie
 - *Relevanz/Einfluss der Kosten*
- 21 Wie viel Zeit verwenden Sie durchschnittlich mit der fertigungsspezifischen Informationsbeschaffung?
 - Stunden pro Woche?
 - *Welcher Aufwand fällt durch Lösung weg?*
- 22 Wie viel Zeit verwenden Sie durchschnittlich mit der kostenspezifischen Informationsbeschaffung?
 - Stunden pro Woche?
 - *Welcher Aufwand fällt durch Lösung weg?*
- 23 Wie häufig Kontakt zu Kostenexperten
 - Sehr häufig, häufig, manchmal, selten, sehr selten, nie

- Jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, Jedes Jahr, nie
 - *Relevanz der Bereitstellung von Kontaktinformationen von Kosten-experten*
- 24 Wie häufig Kontakt zu Fertigungsprozessexperten
- Sehr häufig, häufig, manchmal, selten, sehr selten, nie
 - Jeden Tag, jede Woche, jeden Monat, Jedes Jahr, nie
 - *Relevanz der Bereitstellung von Kontaktinformationen von Prozess-experten*
- 25 **Inwiefern würden Ihnen folgende Informationen (Fragen 26-31) eines oder mehrerer ähnlicher Produkte helfen ein besseres Ergebnis bezüglich Herstellkosten zu erreichen:**
- *FF1.2*
- 26 Kostentreibende Komponenten des Produktes (nach Kostenanteilen Kategorisiert)
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 27 Prozessketten der Komponenten mit Kostentreibenden Prozessen (nach Kostenanteilen Kategorisiert)
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 28 Detailinformationen zu bestimmten Herstellprozessen, um Einflussparameter und Kostentreiber auf Designebene zu erhalten
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 29 Kontaktdaten von entsprechenden Prozess Experten/ Kosteningenieuren
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 30 Absolute Bauteilkosten
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 31 Antworten aus Frage 11 und 13 hier eintragen
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 32 Sonstiges/welche Informationen würden Ihnen noch weiterhelfen?
- Sehr hilfreich, hilfreich, wenig hilfreich, nicht hilfreich, Keine Aussage möglich
- 33

Anhang B

PS: Bewertete Defizite aus 2-stufiger Delphi Studie

Bewertungsergebnisse der Defizite aus der Delphi-Studie in Kapitel 7 unterteilt in die drei Abschnitte: Konzept, Umsetzung und Anwendung.

Tabelle B.1: Bewertung der Defizite bezüglich des Konzeptes basierend auf der Methode zur referenzbasierten Herstellkostenschätzung in einer Delphi Studie.

Defizit	Beschreibung	Mittelwert Tragweite	Mittelwert Lösungsnähe	Mittelwert Zeitaufwand
DK1	KG Technologie aufwendig umzusetzen, erfordert KG-Expertenwissen (Schulungsaufwand für alle beteiligten MitarbeiterInnen).	2,25	2	N.N.
DK2	Nicht im KG hinterlegte Prozesse können nicht automatisiert vorgeschlagen werden, (Durch KG keine Prozessinnovation, nur durch Cost Engineer)	2,5	3	N.N.
DK3	Knowledge Graph Technologie nicht vollständig ausgenutzt ("Kanone auf Spatzen" Weitere Aspekte von KG implementieren).	2,25	2,5	3
DK4	Konvergente Vorschläge; Was vorgeschlagen wird wird vermehrt eingefügt, führt zu Bias des Systems.	2,5	2,5	N.N.
DK5	Keine Brownfield Kalkulationen vorgesehen (Methode kennt nicht alle Optima, z. B. abgeschriebene Maschinen bei Lieferanten)	1,5	3,5	N.N.
DK6	Lieferanten nicht abbildungbar durch Methode.	2	3	3,5
DK7	Limitiertes Vokabular durch vorgegebene Ontologie (Konsistenz mit vorhandenen Ontologien gewährleisten, alle Stakeholder einbeziehen).	2	2,75	N.N.

Tabelle B.2: Bewertung der Defizite bezüglich der Umsetzung als Softwareprototyp in einer Delphi Studie.

Defizit	Beschreibung	Mittelwert Tragweite	Mittelwert Lösungsnähe	Mittelwert Zeitaufwand
DU1	Tool nicht optimiert auf Bedienung, Laufzeit, Design, Interaktion (professionell entwickeltes Tool mit gleicher Funktionalität).	1,75	1,5	3
DU2	“Hintergrundinformationen”; Maschinendatenbank, Lohnkosten, ... aus TcPCM nicht vorhanden, noch kein Konzept für Einbindung.	2,75	2	3
DU3	Python Entwicklungsumgebung wird für Programm benötigt (Umgehen).	2	1,5	2
DU4	Prozesse nur ungenau über CTC abgebildet (Zeitaufwand für eine angemessene Menge detaillierter CTCs).	2,25	1,75	2,75
DU5	Umsetzung nur auf Wellen für eAchsen begrenzt (Zeitaufwand für angemessene Menge an Produktgattung).	2,5	2,25	3,25
DU6	KG nicht in Produktiv Umgebung (KG in Produktiv Umgebung überführen).	1,5	1,75	2,5
DU7	KG/Ontologie nicht teil von RB Semantic Stack (Abstimmung und Integration in RB Semantic Stack).	2,25	1,75	2

Tabelle B.3: Bewertung der Defizite bezüglich der Anwendung des Softwareprototyps in einer Delphi Studie.

Defizit	Beschreibung	Mittelwert Tragweite	Mittelwert Lösungsnähe	Mittelwert Zeitaufwand
DA1	Geringer Umfang der hinterlegten Referenzteile (Zeitaufwand für angemessene Anzahl Referenzteile); Mehrwert nicht direkt da, erst "füttern"; Für Referenzteile benötigte Informationen in der Regel für Bauteile nicht verfügbar, deshalb manueller Zeitaufwand notwendig.	2,5	2,25	3,25
DA2	Semantik ist durch Konstruierende einzuhalten; zusätzliche Anforderungen an Konstruierende (Zeitaufwand + Schulung); Einschränkung in Kreativität.	3,25	2,75	3,5
DA3	Tool nicht flexibel für andere Inputs als STEP und .ttl; (Zeitaufwand jt Schnittstelle).	1,5	1,5	2,25
DA4	Infrastruktur & Kosten skaliert KG incl. Betreuung	2,5	2,25	3
DA5	Anwender und KeyUser Fortbildung für Konzept notwendig.	1,5	1,5	2,5
DA6	IdM Rollenkonzept für Zugriff zu implementieren.	1,75	1,75	2,75

Anhang C

DS-II: Interview Leitfaden aus Cacaj (2022, S. 86)

Interviewleitfaden		
		
Einführung	<ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung • Persönliche Vorstellung (ppt) • Set-up (ppt) • Aufklärung des Befragten (ppt) • Vorstellung des Themas (ppt) 	15 min
Vorstellung der Methode und des Entwicklungsprototyps	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der Methode anhand ppt • Aufstellen Prozesskette <p><u>Zeit stoppen!</u> Beginn: _____ Ende: _____ Total: _____</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prototyp vorstellen ➔ Auf Umfang eingehen (nur eAchse) 	15 min
Anwendung des Entwicklungsprototyps	<p><u>Zeit stoppen!</u> Beginn: _____ Ende: _____ Total: _____ (Anzahl) Rückfragen, Anmerkungen, etc. notieren.</p> <p>➔ Vergleich der Prozessketten:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wie beurteilen Sie die vorgeschlagenen Prozessketten? 	30 min
Interview	<ul style="list-style-type: none"> • Wo sehen Sie Stärken der Methode? • Wo sehen Sie Schwächen der Methode? • Sehen Sie Risiken bei der Verwendung der Methode? • Was verstehen Sie unter Transparenz in Bezug auf die Kostenkalkulation? • Wie würden Sie die Akzeptanz eines weiterentwickelten Tools aus Ihrer Sicht und evtl. aus der Sicht von anderen Nutzern bewerten? • Wie würden Sie Ihre Bereitschaft einschätzen, an der Weiterentwicklung des Knowledge Graphen beizutragen? 	15 min
Fragebogen		15 min

DS-II: Fragebogen aus Cacaj (2022, S. 80–83)

 **BOSCH**

Validierungsstudie MSO-023 „Automated Design to Cost“

1. Fragen zur Person:

Alter: < 29 Jahre 30–39 Jahre 40–49 Jahre > 50 Jahre

Geschlecht: Männlich Weiblich Divers

Berufserfahrung in Jahren: _____

Funktion / Themenfeld: _____

Kalkulationserfahrung in den Gebieten/Produkten: NE-Metalle, Edelmetalle, Kristalle
 NE-Metallhalbzeuge und Edelmetall-Halbzeuge
 Gussteile
 Stahl
 Stanz-, Zieh-, Biegeteile und Federn, Ätzteile aus Metall
 Zerspanung
 Verbindungselemente
 Schmiede-, Fließpress-, Sinterteile
 Kunststoffe, Elastomere, Kunststoff- und Gummiteile
 Nichtmetallische Stoffe, Teile + Erzeugnisse, Verpackung aller Art
 Chemikalien, Klebstoffe, Farbe, Lacke, Energie, Schmierstoff
 Nachrichten- (Kommunikations-) Daten-, Informations-, Unterhaltungstechnik
 Elektronische, elektrische, elektromechanische Bauelemente und Baugruppen, E-technik, Elektronik allgemein
 Mechanische Halbfertig- und Fertigerzeugnisse, Motore, Magnete
 Werkzeug
 Maschinen, Anlagen und Einrichtungen, KFZ und Zubehör



2. Fragen zur Methode

Wie bewerten Sie folgende Aussagen:

Wie bewerten Sie folgende Aussagen:	Stimme nicht zu 1	Stimme wenig zu 2	Stimme mittelmäßig zu 3	Stimme überwiegend zu 4	Stimme vollkommen zu 5
Die Methode senkt den Zeitaufwand für die Kalkulation.					
Die Methode senkt das Potenzial, Erfahrungen mit einfließen zu lassen.					
Die Methode ist für Kosteningenieure schwer anzuwenden.					
Die Methode ist in sinnvole Arbeitsschritte gegliedert.					
Die Methode verkompliziert die Kostenkalkulation in frühen Phasen der Produktentwicklung					
Die Methode berücksichtigt das vorhandene Wissen.					
Die Rückverfolgbarkeit der Berechnung wird durch die Methode verhindert.					
Die Methode kann auf andere Produkte angewendet werden					
Die Rückverfolgung der Kalkulation wird durch die Methode erschwert.					
Die Methode ist einfach zu handhaben.					
Die Methode hat keine nachvollziehbar unterlegbaren Arbeitsschritte.					
Die Methode hat einen positiven Einfluss auf die Transparenz der Kostenkalkulation					
Die Methode erschwert die Übertragung auf andere Erzeugnisse.					
Die Methode hat einen positiven Einfluss auf die Nachvollziehbarkeit der Kostenkalkulation.					



3. Fragen zum Prototyp



Wie bewerten Sie folgende Aussagen:	Stimme nicht zu 1	Stimme wenig zu 2	Stimme mittelmäßig zu 3	Stimme überwiegend zu 4	Stimme vollkommen zu 5
Der Prototyp verhindert Klarheit über die Berechnung der Kosten					
Der Prototyp gibt dem Kosteningenieur einen nachvollziehbaren Einblick in den errechneten Kostenwert					
Der Prototyp ist nicht auf weitere Produkttypen übertragbar					
Der Prototyp gibt Einblick in den berechneten Kostenwert					
Der Prototyp beeinträchtigt die Nutzung für den Kosteningenieur					
Der Prototyp ermöglicht es, die einzelnen Bearbeitungsschritte nachzuverfolgen					
Der Prototyp sorgt für eine aufwändigerere Berechnung der Herstellungskosten					
Der Prototyp knüpft vorhandenes Wissen in die Kalkulation mit ein					
Der Kosteningenieur wird durch den Prototyp an der Übersichtlichkeit der Kostenberechnung gehindert					
Der Prototyp ist einfach auf andere Produkte anwendbar					
Der Prototyp erschwert es, Erkenntnisse aus früheren Produkten einzubeziehen					
Die Bedienung des Prototypen ist positiv zu bewerten					
Der Prototyp hat keine nachvollziehbar unterliegenden Arbeitsgänge					
Der Prototyp reduziert den Zeitaufwand im Vergleich zum "klassischen" Ansatz					

4. Fragen zum Automatisierungspotenzial

Wie bewerten Sie das Automatisierungspotenzial (Nutzen durch Automatisierung) der folgenden Schritte:

	Kein Automatisierungspotenzial 1	2	3	4	großes Automatisierungspotenzial 5
Das Erfassen von Bauteilinformationen (PMI, Teileattribute und Wirkflächen)					
Die Identifikation von Referenzen bzw. von ähnlichen Bauteilen und Funktionen					
Die Optimierung und die Anpassung der Prozesskette					
Das Überführen der Prozesskette in Herstellkosten					
Die Überprüfung der Prozesskette und der Herstellkosten auf Fehler und Plausibilität					
Das Einfügen der Ergebnisse in den Knowledge Graph					



5. Fragen zum Automatisierungsaufwand

Wie bewerten Sie den Aufwand für die Automatisierung der folgenden Schritte:

	Niedrig 1	2	3	4	Hoch 5
Das Erfassen von Bauteilinformationen (PMI, Teileattribute und Wirkflächen).					
Die Identifikation von Referenzen bzw. von ähnlichen Bauteilen und Funktionen.					
Die Übernahme und die Anpassung der Prozesskette.					
Das Überführen der Prozesskette in Herstellketten.					
Die Überprüfung der Prozesskette und der Herstellketten auf Fehler und Plausibilität.					
Das Einfügen der Ergebnisse in den Knowledge Graph.					

6. Fragen zur Qualität

Wie beurteilen Sie die Qualität der folgenden Punkte:

	Niedrig 1	2	3	4	Hoch 5
Vorgeschlagene Prozessketten					
Taktzeitrechner im Gesamten					
Taktzeitrechner Wälzfräsen					
Kalkulationslogik					
Gesamtergebnis					