

Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf

- Konzeptionierung und Realisierung in der Automobilindustrie -

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Kristofer Hell
geb. am 12.04.1987 in Hannover

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote

Promotionskolloquium am 14.03.2018

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen.

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Kurzfassung

Kürzer werdende Produktlebenszyklen und weltweite Nachfrage nach Mobilitätslösungen, verbunden mit Fabrikneubauten oder -umbauten sind Gründe dafür, dass Effizienzsteigerungen von Entwurfsprozessen für automobiler Produktionssysteme wichtig sind, um den Anforderungen gerecht zu werden. Eine Möglichkeit die Effizienz von Entwurfsprozessen zu steigern, ist die Methode der Wiederverwendung von Entwurfsartefakten, wie sie in der *VDI-Richtlinie 3695* für das industrielle Lösungsgeschäft beschrieben ist.

In dieser Arbeit wird der Ansatz der *VDI-Richtlinie 3695* aufgegriffen, an die Anforderungen des Entwurfes von Produktionssystemen für den Automobilbau, speziell den Karosseriebauentwurf, angepasst, für diesen Anwendungszusammenhang ausdetailliert und mit unterstützenden Methoden erweitert. Ziel ist dabei die Konzeptionierung und Realisierung eines Vorgehens zur projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf, das heißt die Übertragung von Artefakten zwischen zeitlich gestaffelten Projekten. Grundlage des Lösungskonzeptes dieser Arbeit bildet das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente*, der Definition eines mechatronischen Objektes mit allen relevanten Artefakten, die auch für die projektübergreifende Wiederverwendung verfügbar ist.

Im ersten Teil der Arbeit werden Grundlagen des automobilen Anlagenentwurfes inkl. der digitalen Werkzeugketten beschrieben. Ebenso werden Ansätze und Modelle der Wiederverwendung in Entwurfsprozessen und das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente* wiedergegeben. Im ersten Teil werden besonders die offenen Fragestellungen in Bezug auf die Übertragung, Ausdetaillierung und Anwendung im automobilen Entwurfsprozess herausgearbeitet.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Lösungskonzept präsentiert, das wiederverwendbare Einheiten in Bezug auf das Fertigungsgewerk, die Hierarchieebene der Einheiten im Produktionssystem und der Entwurfsphase klassifiziert. Anschließend wird dieses Konzept durch die Analyse des Entwurfsprozesses eines einzelnen Projektes und der projektübergreifenden Wiederverwendung zwischen Projekten inhaltlich ausdetailliert. Die Anwendbarkeit und die positiven Effekte der Konzeptrealisierung werden mithilfe von repräsentativen Fallstudien gezeigt, in denen in der Praxis häufig auftretende Prämissen angenommen werden.

Abstract

Reduced product life cycles and worldwide demand for mobility solutions, related to the building of new factories or their reconfiguration, mean that the increased engineering efficiency of automotive production systems is gaining in importance in order to meet these requirements. One way to increase the engineering efficiency is the method of artifact reuse in the field of industrial solutions business, as described in the *VDI guideline 3695*.

In this thesis, the *VDI guideline 3695* concepts are taken up, adapted to the requirements of automotive production system engineering, especially body shop engineering, specified for this scope of application, and expanded on using supporting methods. The aim is the conceptual design and the realization of an approach for cross-project artifact reuse in the factory engineering process, i.e. the transfer of artifacts between projects in various phases of implementation. The implementation concept in this thesis is based on the concept of the *Industrie 4.0 Component*, the definition of a mechatronical object with all relevant artifacts, which are then also available for cross-project reuse.

In the first part of this thesis, basic considerations regarding automotive factory engineering including about the digital tool chains are presented. Likewise, approaches and models of reuse in engineering processes and the concept of the *Industrie 4.0 Component* are described. Here, the focus is on the identification of key questions related to the transfer, specification, and implementation in the automotive factory engineering process.

In the second part of this thesis, an implementation concept is presented, with which reusable units are classified based on the manufacturing discipline, the production system hierarchy of units and the engineering phase. Then, this concept is further illustrated by the analysis of the engineering process involved in a single project as well as of the cross-project reuse. The applicability and the positive effects of implementing this concept are shown in representative case studies reflecting situations which are typically encountered in practice.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
Symbolverzeichnis	XV
Glossar	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	7
2 Stand der Wissenschaft	10
2.1 Themenkomplex Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern.....	11
2.1.1 Allgemeine Entwurfsprozesse	11
2.1.2 Produktionsplanung bei Automobilherstellern	14
2.1.3 Karosseriebauentwurf bei Automobilherstellern	17
2.1.4 Sichtweisen auf Objekte im Entwurfsprozess.....	20
2.1.5 Werkzeuge der Digitalen Fabrik im Karosseriebauentwurf	23
2.1.6 Multikriterielle Charakterisierung des Anlagenentwurfsprozesses	25
2.1.7 Offene Fragestellungen im Themenkomplex Anlagenentwurf	26
2.2 Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf.....	27
2.2.1 Wiederverwendung, Standardisierung und Modularisierung	28
2.2.2 Wiederverwendung nach VDI-Richtlinie 3695	33
2.2.3 Projektunabhängiger Entwurfsprozess.....	40
2.2.4 Mechatronische Objekte	41
2.2.5 Verwaltungsschale einer Industrie-4.0-Komponente.....	43
2.2.6 Konzepte zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf	45

2.2.7	Hierarchien eines Produktionssystems.....	48
2.2.8	Offene Fragen im Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf...51	
3	Forschungsbedarf	53
3.1	Lücke und Forschungsfragen	53
3.2	Untersuchungsrahmen	59
3.3	Methodisches Vorgehen zur Konzeptionierung des Lösungskonzeptes.....	64
4	Lösungskonzept zur Wiederverwendung von Artefakten im automobilen Anlagenentwurf	67
4.1	Allgemeine Absprungbasis.....	67
4.2	Relevante Hierarchieebenen des Produktionssystems	71
4.3	Relevante Phasen im Entwurfsprozess	79
4.4	Relevante Organisationseinheiten im Entwurfsprozess	83
4.5	Zusammenfassung des Lösungskonzeptes	86
5	Ausdetaillierung des Konzeptes am Beispiel Karosseriebauentwurf.....	89
5.1	Referenzfall A: Wiederverwendung innerhalb eines Projektes.....	89
5.1.1	Entwurfsprozess am Beispiel Karosseriebau.....	90
5.1.2	Beschreibungsmittel der digitalen Werkzeuge	95
5.1.3	Abdeckungsgrad einer Karosseriebauanlage.....	96
5.1.4	Gütekriterien für ein Entwurfsergebnis.....	104
5.1.5	Zuordnung von Artefakten zu Ebenen.....	108
5.1.6	Zusammenfassung Wiederverwendung innerhalb eines Projektes.....	114
5.2	Referenzfall B: Projektübergreifende Wiederverwendung.....	117
5.2.1	Ebenen und relevante Informationen	118
5.2.2	Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte.....	124
5.2.3	Auswahl der Artefakte	129
5.2.4	Projektübergreifende Dokumentation der Wiederverwendung.....	135
5.2.5	Durchführung	141
5.2.6	Erfolg und Nutzen	143

5.3	Zusammenfassung der Ausdetaillierung des Wiederverwendungskonzeptes.....	147
6	Validierung und Diskussion der Ergebnisse.....	151
6.1	Wiederverwendung bei Neuprojekt im Karosseriebau	151
6.2	Wiederverwendung bei Integrationsprojekt im Karosseriebau	157
6.3	Wiederverwendung im Presswerkzeugentwurf.....	161
6.4	Diskussion der projektübergreifenden Wiederverwendung und Anforderungen an eine Bibliothek	164
7	Zusammenfassung und Ausblick	171
7.1	Beantwortung der Forschungsfragen.....	171
7.2	Ausblick	175
	Literaturverzeichnis	178
	Anhang A: 4D-Analyse Konzeptphase	191
	Anhang B: 4D-Analyse Grobplanung	192
	Anhang C: 4D-Analyse Detailplanung	193
	Anhang D: 4D-Analyse Konstruktionsphase	194

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herausforderungen und Chancen zukünftiger industrieller Produktion [Abele und Reinhart 2011].....	1
Abbildung 2: Weltweite Fertigungsstandorte der <i>Volkswagen AG</i> (Stand Ende 2015).....	4
Abbildung 3: Beispielhafte Investitionskostenverteilung für die Realisierung einer Automobilfertigung	5
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit in Verbindung mit dem anwendungsorientierten Forschungsansatz nach Ulrich [Ulrich 1981] (rechte Seite)	8
Abbildung 5: Allgemeiner Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach <i>VDI-Richtlinie 2221</i> [VDI 1993]	12
Abbildung 6: V-Modell des Entwicklungsprozesses mechatronischer Systeme [VDI 2004].....	13
Abbildung 7: Grundsätzlicher Fertigungsablauf im PKW-Bau und zugleich Gewerke der Fertigung	15
Abbildung 8: Verzahnung von Produkt- und Fabrikentstehungsprozess durch Informationsaustausch in Anlehnung an [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015] und [VDI/VDE-Gesellschaft 2014]	17
Abbildung 9: Beispielhafter Fertigungsfluss in einem Karosseriebau eines Automobilherstellers in Anlehnung an [Kiefer 2007], [Wemhörner 2005]	18
Abbildung 10: Beispiel der Teilaufgaben eines Karosseriebauentwurfes der Automobilproduktion [VDI 2008], ergänzt um Phaseneinteilung.....	18
Abbildung 11: <i>Münchener Produktkonkretisierungsmodell</i> nach [Ponn und Lindemann 2011].....	20
Abbildung 12: Sichtweisen auf ein mechatronisches Objekt in Anlehnung an [DIN EN 2010] und [Hady 2013].....	21
Abbildung 13: Hierarchische Strukturierung eines Objektes nach [DIN 2011]	22
Abbildung 14: Unterstützungsfelder durch die <i>Digitale Fabrik</i> in der Karosseriebauplanung in Anlehnung an [Bracht, Geckler und Wenzel 2011].....	24
Abbildung 15: Klassifikation der Werkzeuge der <i>Digitalen Fabrik</i> in Anlehnung an [Bracht, Geckler und Wenzel 2011].....	24
Abbildung 16: Verwendungszeiträume der Werkzeuge der <i>Digitalen Fabrik</i> in Anlehnung an [Dombrowski und Tiedemann 2005].....	25

Abbildung 17: Phasen und Teilergebnisse des Anlagenentwurfs beim Automobilbau-OEM, basierend auf [Gepp 2014], [Höffken und Schweitzer 1991], [Urbas und Krause 2012], [Reschke und Svoboda 1984], [NAMUR 2003], [Lüder et al. 2017b]	26
Abbildung 18: Auswirkung der Anforderungserfüllung auf die Wiederverwendung von Lösungen, basierend auf [Thoben 1990], [Hady 2013], [Knabe 2015]	32
Abbildung 19: Zusammenhängende Zielzustände der <i>VDI-Richtlinie 3695</i> bezüglich Wiederverwendung [VDI und VDE 2010a], [VDI und VDE 2010b], [VDI und VDE 2010c], [VDI und VDE 2010d], [VDI und VDE 2010e]	35
Abbildung 20: Zusammenhängende Zielzustände der <i>VDI-Richtlinie 3695</i> bezüglich Wiederverwendung mit Beschreibung [VDI und VDE 2010a], [VDI und VDE 2010b], [VDI und VDE 2010c], [VDI und VDE 2010d], [VDI und VDE 2010e]	38
Abbildung 21: Nutzen der Wiederverwendung in Abhängigkeit der Wiederverwendungshäufigkeit [Pohl, Böckle und van der Linden, F. 2005]	39
Abbildung 22: Schaffung wiederverwendbarer Artefakte durch einen projektunabhängigen Entwurfsprozess [Jazdi et al. 2010]	41
Abbildung 23: Notwendige Informationen zur vollständigen Repräsentation eines mechatronischen Objektes [Kiefer 2007], [Lüder et al. 2010]	42
Abbildung 24: Modell einer <i>Industrie-4.0-Komponente</i> [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]	44
Abbildung 25: Modell der räumlich getrennten <i>I4.0-Verwaltungsschale</i> mit relevanten Lebenszyklusdaten [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]	45
Abbildung 26: <i>Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)</i> [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]	50
Abbildung 27: Erfüllte Zielstände im ausgewählten Untersuchungsrahmen nach <i>VDI-Richtlinie 3695</i> (Darstellungsform in Anlehnung an [VDI und VDE 2010a])	62
Abbildung 28: Referenzfälle der Wiederverwendung klassifiziert anhand unterschiedlicher Informationsflüsse, basierend auf [Lüder et al. 2017b]	63
Abbildung 29: Modulare Fabrikarchitektur nach [Waltl und Wildemann 2014]	68
Abbildung 30: Strukturierung von Produktionsressourcen nach Kiefer [Kiefer 2007]	69
Abbildung 31: Abgeleitetes initiales Lösungskonzept als Ausgangspunkt für die weiterführenden Untersuchungen	70

Abbildung 32: Abgleich der Ebenen des Referenzhierarisierungsmodells mit denen bestehender Modelle.....	72
Abbildung 33: Referenzmodell zur Hierarchisierung der Objekte eines Produktionssystems anhand funktionaler Identifikationskriterien [Röpke et al. 2016].....	75
Abbildung 34: Referenzprozess der Produktentstehung im Untersuchungsrahmen, basierend auf [Kerber 2016].....	81
Abbildung 35: Strukturkonzept zur Identifizierung und Charakterisierung von Informationsartefakten zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf.....	87
Abbildung 36: 2-dimensionales Strukturkonzept durch Fokussierung auf die Analyse im Karosseriebauentwurf.....	88
Abbildung 37: Darstellungsschema der <i>4D-Methode</i> zur Analyse von Entwurfsprozessen nach [Schäffler et al. 2013]	91
Abbildung 38: Ergebnis der Prozessanalyse mithilfe der <i>4D-Methode</i> des Karosseriebauentwurfes im Untersuchungsrahmen auf Basis von [Hillmann 2016]	92
Abbildung 39: Digitale Platzhalter während der Phase der Grob- und Detailplanung	100
Abbildung 40: Untersuchung des Abdeckungsgrades einer Karosseriebauanlage.....	102
Abbildung 41: Grafische Auswertung der Güten zweier Karosseriebauanlagenentwürfe in Anlehnung an [Reinhard 2015].....	108
Abbildung 42: Zuordnung von identifizierten Artefaktklassen zu Entwurfsphasen und Hierarchieebenen	110
Abbildung 43: Zeitlich-logische und inhaltlich-logische Abhängigkeiten zwischen identifizierten Artefakten [Hell et al. 2016]	113
Abbildung 44: Beziehungen zwischen ineinander geschachtelten <i>I4.0-Komponenten</i> , basierend auf [Plattform Industrie 4.0 2017]	117
Abbildung 45: „Befülltes“ Lösungskonzept als Ausgangsbasis der Entwicklung eines Erklärungsmodells für die projektübergreifende Wiederverwendung, in Anlehnung an [Hell und Lüder 2016].....	119
Abbildung 46: Abgeleitete Informationspakete für die projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf, basierend auf [Hell und Lüder 2016].....	122
Abbildung 47: Ablauf der projektübergreifender Wiederverwendung bei teilweise überlappenden Projekten, basierend auf [Hell und Lüder 2016].....	126

Abbildung 48: Auswahlverfahren für die Wiederverwendung von Entwurfsartefakten für den Karosseriebauanlagenentwurf in Anlehnung an [Knabe 2015]	134
Abbildung 49: Dokumentation und Potenzialabschätzung der Wiederverwendung in der frühen Entwurfsphase	136
Abbildung 50: Fall a): Wiederverwendung eines Artefaktes ohne Änderung b): Wiederverwendung eines Artefaktes mit zwingendem Änderungsbedarf in Anlehnung an [Hillmann 2016]	139
Abbildung 51: Integration des Lösungskonzeptes in das <i>Domain Engineering</i> nach [Jazdi et al. 2010] einschließlich Adaption	142
Abbildung 52: Beispielhafte, anteilige Investitionen zur Realisierung von betriebsbereiten Karosseriebauanlagen	145
Abbildung 53: Beispielhafte, anteilige Investitionen zur Realisierung von betriebsbereiten Montageanlagen	147
Abbildung 54: Überführung des Service- und Rollenmodells für die <i>Industrie 4.0</i> nach [Baums 2016] in ein spezifisches Modell für die Wiederverwendung im industriellen Anlagenentwurf	148
Abbildung 55: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 1	155
Abbildung 56: Ökonomischer Effekt durch Anwendung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 1	156
Abbildung 57: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 2	159
Abbildung 58: Reale Anfragen (Pull-Prinzip) nach Datenpaketen aus Initialprojekt von Projekten mit unterschiedlichem Entwurfsfortschritt	161
Abbildung 59: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 3	163
Abbildung 60: Prototyp einer Modulbibliothek für die Wiederverwendung von Entwurfsartefakten im Untersuchungsrahmen	166
Abbildung 61: Spezifische Beschreibungsattribute zur initialen Abschätzung der Wiederverwendbarkeit der immateriellen Artefakte	167
Abbildung 62: Einordnung der Bibliothek in den bestehenden Systemverbund der spezifischen <i>Digitalen Fabrik</i> am Beispiel Karosseriebauentwurf	168
Abbildung 63: Dupliziert, zusammengeführte Artefakte zur Unterstützung der projektübergreifenden Wiederverwendung, basierend auf [Lüder et al. 2017a]	169

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale angewandter Wissenschaft nach Ulrich [Ulrich 1981], [Ulrich 1982]	7
Tabelle 2: Beschreibungsmittel von Objekten in Abhängigkeit des Strukturierungskriteriums	21
Tabelle 3: Übersicht über offene Fragestellungen im Themenkomplex Anlagenentwurf bei Automobilherstellern	27
Tabelle 4: Hauptaktivitätsfelder und Aspekte der Entwurfsoptimierung aus der <i>VDI-Richtlinie 3695</i> [Schertl et al. 2008], [VDI und VDE 2010a]	33
Tabelle 5: Nutzen der Wiederverwendung in Abhängigkeit des Zielzustandes der <i>VDI 3695</i> , abgeleitet aus [Tomer et al. 2004] und [Schröck 2016]	40
Tabelle 6: Identifizierte Ansätze zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf unter Einbeziehung der Ergebnisse aus [Schröck 2016]	46
Tabelle 7: Ausgewählte bestehende Modelle für die Hierarchisierung physischer Ressourcen innerhalb eines Produktionssystems.....	49
Tabelle 8: Übersicht über offene Fragestellungen im Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf.....	51
Tabelle 9: Praxisrelevante Anforderungen und Umsetzungsempfehlungen für die systematische Wiederverwendung im Entwurfsprozess in Anlehnung an [Maga, Jazdi und Göhner 2011].....	54
Tabelle 10: Erfüllungsgrad der Anforderungen an ein Wiederverwendungskonzept im industriellen Lösungsgeschäft	55
Tabelle 11: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Konzeptphase	92
Tabelle 12: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Grobplanung.....	93
Tabelle 13: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Detailplanung.....	93
Tabelle 14: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Konstruktionsphase.....	93
Tabelle 15: Datenformate der Artefakte nach Entwurfsphase geordnet [Lüder et al. 2017a]	95
Tabelle 16: Anzahl der internen Betriebsmittelrichtlinien für die Grob- und Detailplanung im Karosseriebauentwurf.....	98
Tabelle 17: Untersuchungskriterien für Ermittlung des Abdeckungsgrades.....	101

Tabelle 18: Vorbereitende Maßnahmen für die optimale projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakte einer Karosseriebauanlage.....	103
Tabelle 19: Ausgewählte Kennzahlen zur Bewertung der Güte von Karosseriebauentwürfen unter Nutzung des <i>Balanced-Scorecard</i> -Konzeptes [Reinhard 2015].....	106
Tabelle 20: Als relevant identifizierte Artefaktklassen je Hierarchieebene eines Karosseriebau-Produktionssystems aus Sichtweise der Entwurfsphase [Hell et al. 2016].....	111
Tabelle 21: Projektprämissen der Fallstudie 1	152
Tabelle 22: Projektprämissen der Fallstudie 2	157

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Ausgeschrieben
HMI	Human Machine Interface
I4.0	Industrie 4.0
I4.0-Komponente	Industrie-4.0-Komponente
IT	Informationstechnik
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt. Erstausrüster)
PKW	Personenkraftwagen
PLM	Product Lifecycle Management
RL	Richtlinie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
<i>AHN</i>	m^2	Anlagenhauptnutzungsfläche
<i>EK</i>	-	Anzahl der erfüllten Kriterien
<i>FÄ</i>	-	Fügeäquivalent
<i>FL</i>	$1/h$	Fügeleistung
<i>FLL</i>	$1/m^2 h$	Flächenleistung
<i>GK</i>	-	Gesamtanzahl der Kriterien
<i>IÄ</i>	$€ h$	Investitionsäquivalent
<i>jph</i>	$1/h$	jobs per hour
<i>KI</i>	$€$	Kalkulatorischer Investitionsbedarf
<i>MBB</i>		Anzahl manuell bewegter Teile
<i>MR</i>	-	Anzahl der Messroboter
<i>R</i>	-	Anzahl der Roboter
<i>SG</i>	$\%$	Standardisierungsgrad
<i>W</i>	-	Anzahl Werker
<i>WL</i>	$1/h$	Werkerleistung

Glossar

Anlagenentwurf	Hier verwendet für den speziellen Entwurf mit dem Ziel eine Anlage eines Produktionssystems zu entwerfen.
Artefakt	In dieser Arbeit als Synonym für Engineering-Artefakt entsprechend der VDI-Richtlinie 3695 verwendet. Damit gemeint sind: „Alle materiellen und immateriellen Projektergebnisse“ [VDI und VDE 2010a] darunter „[...] materielle Artefakte, z. B. Motoren, Pumpen, Funktionsbausteine, [...] immaterielle Artefakte, z. B. Pläne, Architekturen und Spezifikationen [...]“ [VDI und VDE 2010c]
Entwurf	Der Begriff Entwurf wird in dieser Arbeit als Synonym für den Begriff Engineering verwendet. Der Entwurf bezeichnet die Gesamtheit aller notwendigen Aktivitäten, um auf Basis von wissenschaftlichen Prinzipien durch Planen, Entwickeln und Konstruieren Produkte zu entwerfen. (vgl. [ECPD 1941].)
Entwurfsprozess (Anlagenentwurfsprozess)	In dieser Arbeit verwendet für einen konkreten Anwendungsfall in der Praxis eines Entwurfes bzw. einer Planung nach [VDI 2011] mit individuellem Ablauf sowie speziellen Zielen und Rahmenbedingungen.
Fahrzeugbaukasten	In dieser Arbeit wird mit dem Begriff Fahrzeugbaukasten ein spezieller Modulbaukasten bezeichnet, der ausschließlich Module für den Entwurf bzw. die Entwicklung eines Automobils enthält. „Mit einem Modulbaukasten hat man die Möglichkeit, verschiedene Produkte zu schaffen.“ [Hüttenrauch und Baum 2008] Ziel ist dabei, eine große Produktvarianz zu generieren, die Komplexität zu verringern und die Effizienz zu steigern durch die projektübergreifende Abdeckung gleicher funktionaler Anforderungen mit einem Modul. (vgl. [Miller und Elgard 1998] und [Feldhusen und Grote 2013])
Lebensphasen eines Produktionssystems	In dieser Arbeit werden zu den Lebensphasen eines Produktionssystems die drei Phasen Entwurf, Betrieb/Wartung und End-of-Life verstanden (vgl. [Lüder et al. 2017b]). Die Lebensphase des Entwurfs wird im Rahmen der Arbeit in weitere Phasen gegliedert.
Einheit	In dieser Arbeit verwendet für ein mechatronisches Objekt mit einem Teil seiner zugehörigen beschreibenden Informationen bzw. für ein Datenpaket, das eine Teilbeschreibung eines mechatronischen Objektes ist.
Mechatronisches Objekt	In dieser Arbeit verwendet für die Einheit aus mechatronischem Objekt und den zugehörigen Informationen, die dieses Objekt vollständig beschreiben und repräsentieren (in anderen Arbeiten auch als mechatronische Einheit bezeichnet).
Objekt	Physische Gegenstände, in dieser Arbeit bezogen auf Objekte des automobilen Produktionssystems, die für eine funktionierende Produktion eines Produktes notwendig sind.

Prämissen	Wird als Synonym für <i>Anforderungen</i> entsprechend der VDI-Richtlinie 2221 verwendet und bezeichnet: "Qualitative und/oder quantitative Festlegung von Eigenschaften oder Bedingungen für ein Produkt." [VDI 1993] Im Entwurf von Produktionssysteme des Automobilbaus wird der Begriff (<i>Projekt-Prämisse</i>) in der Praxis anstatt des Begriffes <i>Anforderungen an das Projekt</i> verwendet und wird aus diesem Grund in dieser Arbeit primär genutzt.
Produkt	In der Arbeit für das Ergebnis eines Entwurfsprozesses verwendet, insbesondere für die entworfenen Objekte eines Produktionssystems. Damit analog zur VDI-Richtlinie 2221: „Erzeugnis, das als Ergebnis des Entwickelns und Konstruierens hergestellt und angewendet wird“ [VDI 1993].
Produktion	Die Produktion ist "die Gesamtheit wirtschaftlicher, technologischer und organisatorischer Maßnahmen, die unmittelbar mit der Be- und Verarbeitung von Stoffen zusammenhängen" [Eversheim 1992]. In dieser Arbeit werden primär die technologischen Maßnahmen der Produktion adressiert und der Begriff Produktion dementsprechend verwendet.
Produktionssystem	Eine Produktionssystem beinhaltet „alle Elemente und Relationen zwischen Elementen, die zur vollständigen Erstellung eines Produktes erforderlich sind“ [Eversheim 1992]. In dieser Arbeit werden primär die technischen Elemente und Relationen betrachtet und der Begriff Produktionssystem dementsprechend verwendet.
Produktionssystementwurf	„Umfasst alle Aktivitäten, die durchgeführt werden, um eine Produktion bzw. ein Produktionssystem zu entwickeln und aufzubauen“ [VDI 2004]
Projekt	„Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, z.B. Zielvorgabe, zeitliche, finanzielle, personelle und andere Begrenzungen, Abgrenzung gegenüber anderen Vorhaben, projektspezifische Organisation“. [DIN 2009]
Prozess	"Satz von in Wechselbeziehungen oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt." [DIN EN ISO 2015]
Wiederverwendung	Hier im Sinne der VDI-Richtlinie 3695 verwendet: „Wiederverwendung zielt in die Richtung, ein Artefakt in möglichst vielen Kundenprojekten einsetzen zu können“ [VDI und VDE 2010c].

1 Einleitung

Die gesamte Arbeit ist in drei Gliederungsebenen strukturiert, die mit Kapitel (z. B. Kapitel 1), Unterkapitel (z. B. Unterkapitel 2.1) und Abschnitt (z. B. Abschnitt 2.2.1) bezeichnet werden.

Die Einleitung gliedert sich in zwei Unterkapitel. In Unterkapitel 1.1 wird aus einer Makro- und einer Mikroperspektive die Motivation hergeleitet, die zu dieser Arbeit geführt hat. Anschließend wird im Unterkapitel 1.2 der Aufbau der Arbeit präsentiert. Auf diese Weise sind die logischen Zusammenhänge der Kapitel dieser Arbeit ersichtlich, um eine Orientierung beim Lesen zu geben und einen roten Faden herzustellen.

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

In Anlehnung an die in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts formulierten Megatrends der Zukunftsforschung in [Naisbitt 1982] wurden 2011 in [Abele und Reinhart 2011] speziell für die Produktionsarbeit aktuelle Herausforderungen bzw. Megatrends abgeleitet (siehe Abbildung 1).

Neue Rahmenbedingungen (wie wird produziert?)	Neue Bedarfssfelder (was wird produziert?)
Globalisierung	Mobilität und Logistik
Durchdringung mit neuen Technologien	Digitalisierung und digitale Produkte
Ressourcenverknappung	Automatisierungstechnik
Kürzere Produktlebenszyklen	Energiewende und Klimawandel
Wissensgesellschaft	Wachstumsmarkt Lebensqualität
Risiko der Instabilität/ Terroranschläge	
Demografischer Wandel	

Abbildung 1: Herausforderungen und Chancen zukünftiger industrieller Produktion [Abele und Reinhart 2011]

Dabei sind die einzelnen Trends zwei grundsätzlichen Fragestellungen zugeordnet – „Was wird produziert?“ und „Wie wird produziert?“. Die Nachfrage nach Mobilität und Logistik behält demnach auch zukünftig eine herausragende Stellung. Das heißt, die Automobilindustrie als Garant für Mobilität, wird auch zukünftig eine bedeutende Branche bleiben. Die Rahmenbedingungen in dieser Branche, insbesondere der Produktion, werden sich jedoch ändern und damit das „Was wird produziert?“ und das „Wie wird produziert?“. Die Frage nach dem veränderten „Was?“ äußert sich in der weltweiten Diskussion um strengere Emissionsgrenzwerte und den damit zu erwartenden Einschränkungen für Verbrennungsmotoren, also Benzin- und Dieselmotoren, besonders in Großstädten. Von politischer Seite werden vor diesem Hintergrund weltweit zunehmend Elektroautos gefördert [Die Zeit 2017], [Handelsblatt 2017]. Die Automobilhersteller reagieren darauf und planen einen Ausbau des entsprechenden Angebots an Elektrofahrzeugen [Grundhoff 2017]. Es bedarf in der Folge neuer bzw. einem Umbau der vorhandenen Fabriken, um Elektroautos fertigen zu können und um die notwendigen Bauteile wie Batterien und Elektromotoren produzieren und verbauen zu können.

Die Frage nach dem „Wie?“ – und damit die Anforderungen an das Produktionssystem steigen [Abele und Reinhart 2011]. Schlagwörter wie *Globalisierung, neue Technologien, kürzere Produktlebenszyklen, Wissensgesellschaft und Instabilität* sind dabei Trends, die im 21. Jahrhundert großen Einfluss auf die Gestaltung von Produktionssystemen ausüben (vgl. [Abele und Reinhart 2011], [Ganschar et al. 2013], [Plattform Industrie 4.0 2015]).

Eine der großen Herausforderungen für die Automobilindustrie ist die zunehmende Durchdringung der Produktionstechnik mit neuen Technologien und der Nachfrage nach digitalen Mobilitätsdienstleistungen. Neue Wettbewerber treten in die Automobilbranche ein. Zum einen sind die neuen Wettbewerber große IT-Unternehmen aus dem Consumer Bereich, wie *Apple* und *Google*, die in hohem Maße in Mobilitätsplattformen, -dienstleistungen und in autonomes Fahren investieren [Balsler und Fromm 2016]. Zum anderen tritt mit *Tesla* ein neuer Wettbewerber in den Markt ein, der auf rein elektrische Antriebe setzt und das Automobil stark an die Konsumelektronik heranrückt [Bratzel 2016].

Etablierte Automobilhersteller wie *Volkswagen, Daimler* oder *BMW* geraten folglich unter einen verschärften Wettbewerbsdruck (vgl. [Balsler und Fromm 2016] und [Bratzel

2016]). Dennoch haben sie im Vergleich zu den neuen Wettbewerbern den Vorteil, dass alle von ihnen ein vorhandenes, weltweites Produktionsnetzwerk für die Automobilfertigung besitzen. Wohingegen neue Wettbewerber nur wenige Fabriken haben (z. B. *Tesla*) und erst die notwendigen Produktionskapazitäten aufbauen müssen bzw. keine Erfahrung in der Massenherstellung von Automobilen besitzen (z. B. *Apple* und *Google*).

Die Abbildung 2 zeigt das bestehende Produktionsnetzwerk der *Volkswagen AG* mit 118 Standorten (Stand Ende 2015). Dieser Automobilhersteller hat im Gegensatz zu den neuen Wettbewerbern ein nahezu lückenloses über die Welt verteiltes Automobil-Produktionsnetzwerk. Der Trend zu immer kürzeren Produktlebenszyklen und zu einer zunehmenden Anzahl an Varianten führt zu vielen Anpassungen bzw. Neuplanungen in den bestehenden Standorten. Bei optimaler Zusammenarbeit der 118 Standorte müssten sich Synergien zwischen den einzelnen Fabrikprojekten ergeben, da einige Fahrzeugmodelle an mehreren Standorten gebaut werden. Laut der Daimler AG machte der Anteil der Entwurfskosten im Jahr 2005 20 bis 25 Prozent der Gesamtinvestition in neue Anlagen aus [Sauer und Ebel 2007]. Eine Effizienzsteigerung im Anlagenentwurf führt demnach zu deutlich verringerten Investitionen. Eine Methode für die Effizienzsteigerung im Entwurf wäre nach der *VDI-Richtlinie 3695* die Wiederverwendung von Artefakten, siehe [VDI und VDE 2010c]. Unter dem Begriff Artefakt sind sowohl materielle Gegenstände, z. B. Betriebsmittel, als auch immaterielle Gegenstände, z. B. Informationen über diese Anlage, unter einem Begriff zusammengefasst, vgl. [VDI und VDE 2010c]. Die immateriellen Artefakte sind von großer Bedeutung für die Effizienzsteigerung im Anlagenentwurf, da sie durch menschliche Arbeit entstehen und das Handling oft manuell erfolgt. Im Falle der Beschaffung von neuer Anlagensteuerungstechnik machen der Entwurf und das Handling der immateriellen Artefakte aufgrund des hohen Anteils an menschlicher Arbeit, nach einer Studie in der Automobilindustrie, über 50% der Investitionskosten aus [Hirzle 2012]. Die Reduzierung der menschlichen Arbeit im Entwurf durch Automatisierung des Datenaustausches und durch Wiederverwendung der vorhandenen immateriellen Artefakte in Folgeprojekten sind demnach zwei Ansätze, um die Investitionen in neue Anlagen zu senken [Hirzle 2012]. In dieser Arbeit wird dabei ausschließlich der Ansatz der Wiederverwendung von Artefakten untersucht.

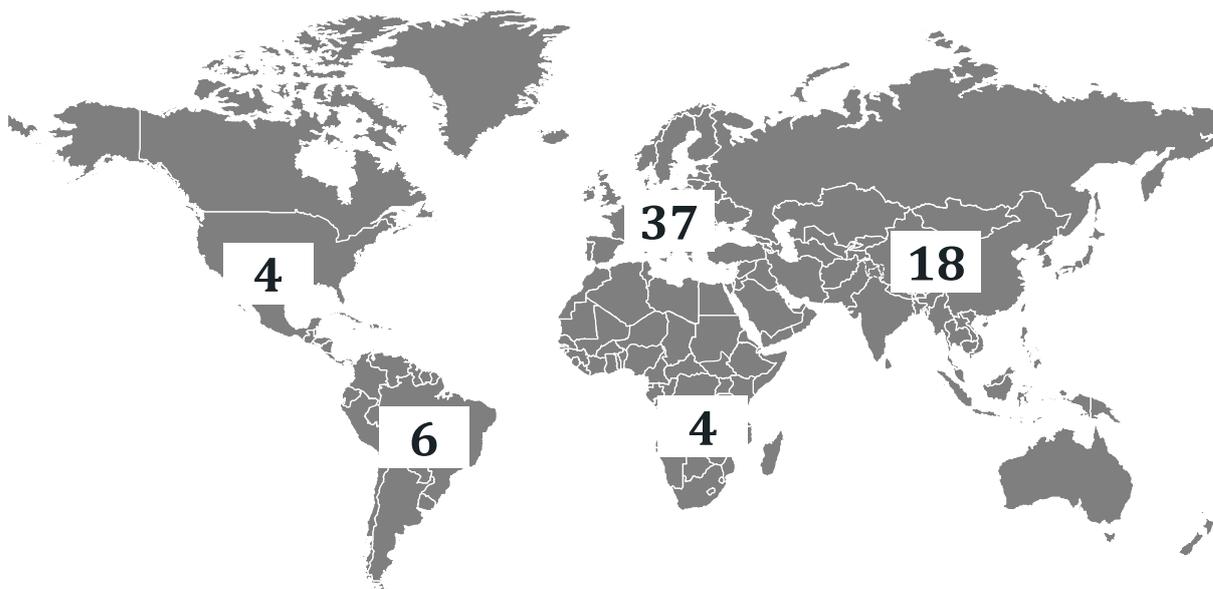


Abbildung 2: Weltweite Fertigungsstandorte der Volkswagen AG (Stand Ende 2015)

Es wäre denkbar, dass standortunabhängige Betriebsmittel entworfen und anschließend von mehreren Standorten genutzt werden. Auch wäre es denkbar, die Informationen über die Anlage, die während des Entwurfs entstehen, bei einem erneuten Entwurf einer gleichen oder ähnlichen Anlage wiederzuverwenden. Bei einem Produktionsnetzwerk mit zahlreichen Fabriken, wie dem der *Volkswagen AG*, müssten sich bei diesem Vorgehen erhebliche Potenziale zur Senkung der Investitionskosten ergeben.

Ein Konzept zur Operationalisierung der systematischen Wiederverwendung von Betriebsmittelplanungen und -konstruktionen ist näher beschrieben in [Jazdi et al. 2010] und wird in Abschnitt 2.2 behandelt. Entscheidend ist dabei wiederverwendbare Artefakte zu entwerfen und die Informationen darüber dem Anwender für das anstehende Projekt zur Verfügung zu stellen.

In der *VDI-Richtlinie 3695* sind dazu ein Vorgehen zur Etablierung der Wiederverwendung in die Unternehmensprozesse und die notwendigen Voraussetzungen beschrieben [VDI und VDE 2010c].

Auch aus den Visionen zur *Industrie 4.0* (I4.0) lässt sich ein Konzept für die Wiederverwendung von Artefakten im Entwurf ableiten. Ein zentraler Gedanke ist dabei das Vorhandensein von Gegenständen, die von Verwaltungsschalen umgeben sind, auf denen alle relevanten Informationen zu den Gegenständen gespeichert und verfügbar sind. Diese

speziellen Gegenstände werden *Industrie-4.0-Komponenten (I4.0-Komponenten)* genannt [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]. Auf der Verwaltungsschale sollen alle relevanten Informationen der *I4.0-Komponente* über ihre gesamten Lebensphasen abgelegt werden, d. h. vom Entwurf bis zur Verwertung im End-of-Life. Diese Informationen stehen während allen Lebensphasen zur Verfügung und können durch Nutzungsberechtigte, z. B. durch unternehmensinterne Konstrukteure, Instandhalter etc., entsprechend der individuellen Zugangs- und Nutzungsrechte verarbeitet und wiederverwendet werden (vgl. [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]). Die Informationsidentifikation, -ablage und lebensphasenübergreifende Wiederverwendung dieser Artefakte gewinnt folglich auch durch die Vision *I4.0* an Bedeutung.

Für die Umsetzung bei Automobilherstellern und die Etablierung der Wiederverwendung in den Abläufen der Produktionsplanung lohnt sich zunächst eine Betrachtung der Investitionskostenverteilung, die zur Realisierung einer Fertigung für ein neues Fahrzeug üblicherweise auftritt und in der Abbildung 3 präsentiert wird.



Abbildung 3: Beispielhafte Investitionskostenverteilung für die Realisierung einer Automobilfertigung

Da der Investitionsanteil im Gewerk Karosserierohbau (kurz: Karosseriebau) im Vergleich zu den anderen Fertigungsgewerken besonders hoch ist, sind die zu erwartenden absoluten Effekte dort am höchsten. Deshalb konzentriert sich diese Arbeit auf diesen Bereich. Der Produktionsplanungsprozess, d. h. der Entwurfsprozess, zur Realisierung eines Karosseriebaus dauert etwa drei Jahre (vgl. [Kerber 2016]). Entsprechend viele Artefakte entstehen, sind viele Personen involviert und die Verantwortung und Durchführung etli-

cher Teilaufgaben ist innerhalb der Organisation stark verteilt. Eine weitere Herausforderung der Produktionsplanung ist die hohe Einbindung von Fremdfirmen und Vergabe vieler Teilaufgaben an diese Firmen. Die Vergabe von Teilaufgaben an externe Firmen und die internen Zuständigkeiten variieren zwischen den Projekten stark. All dies sind besondere Herausforderungen, die bei der Bearbeitung des Themas „Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung“, insbesondere bei der Konzeptionierung und den Untersuchungen, berücksichtigt werden müssen.

Aus bestehenden Konzepten und Richtlinien in Verbindung mit den realen Anforderungen von Automobilherstellern beim Entwurf ihrer Fertigungsanlagen soll ein Lösungskonzept für die Wiederverwendung sinnvoller Artefakte im Entwurf entwickelt werden. Dabei sollen bisher ungelöste Fragestellungen identifiziert und bearbeitet werden, die für die Umsetzung einer systematischen Wiederverwendung im Anlagenentwurfsprozess von Automobilherstellern förderlich sind.

Das Potenzial ist bei Automobilherstellern wie beschrieben durch die große Anzahl an Fertigungsstandorten, sich verkürzenden Produktlebenszyklen [Waltl und Wildemann 2014] und den hohen Investitionskosten, hier vor allem im Gewerk Karosseriebau, vorhanden. Neue Fertigungsanlagen müssen in Abhängigkeit der Produktlebenszyklen der Automobile in komplexen Prozessen geplant und weltweit realisiert werden. Daher ist die Automobilindustrie als Forschungsgebiet für die Wiederverwendung vielversprechend, vgl. [Kiefer 2007], [Waltl und Wildemann 2014].

Die dazu allgemeine Forschungsfrage dieser Arbeit lautet: „Welche Methoden unterstützen die systematische, projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurfsprozess der Automobilindustrie?“

Es folgt der Unterkapitel 1.2, in dem der logische Aufbau dieser Arbeit umrissen wird. Dazu werden die Ziele jedes Kapitels präsentiert.

1.2 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Zur Untersuchung der Forschungsfrage können unterschiedliche wissenschaftlich anerkannte Vorgehensweisen gewählt werden. Es kann grundsätzlich zwischen theoretischer Wissenschaft und angewandter Wissenschaft unterschieden werden, für die jeweils unterschiedliche Vorgehensweisen genutzt werden. In der Tabelle 1 sind die Merkmale der angewandten Wissenschaft aufgelistet und denen der theoretischen Wissenschaft vergleichend gegenübergestellt. Die Forschungsfrage dieser Arbeit ist als angewandte Wissenschaft zu klassifizieren.

Tabelle 1: Merkmale angewandter Wissenschaft nach Ulrich [Ulrich 1981], [Ulrich 1982]

Merkmale	Theoretische Wissenschaft	Angewandte Wissenschaft
Entstehung der Probleme	in der Wissenschaft	in der Praxis
Forschungsziel	Erklärung der bestehenden Wirklichkeit Theorieentwicklung Theorieprüfung	Entwerfen möglicher Wirklichkeit
Art der Aussagen	deskriptiv wertfrei	normativ wertend
Forschungsregulativ	Wahrheit	Nützlichkeit
Forschungskriterium	Bestätigungsgrad, Erklärungskraft, Allgemeingültigkeit, Prognosekraft von Theorien	Praktische Problemlösungskraft von Modellen und Regeln

Der in der Motivation in Unterkapitel 1.1 beschriebene Forschungsgegenstand ist der Praxis entnommen. Die in dieser Arbeit präsentierte Lösung soll eine praktische Problemlösungskraft für den der Praxis entnommenen Forschungsgegenstand besitzen. Folglich bietet sich für den Aufbau der Arbeit das von *Ulrich* in [Ulrich 1981] vorgeschlagene Vorgehen für die anwendungsorientierte Forschung an, das im weiteren Verlauf dieser Arbeit genutzt wird (siehe Abbildung 4).

In **Kapitel 1** wurde die grundlegende Motivation dargelegt und erläutert, dass die Optimierung des Anlagenentwurfsprozesses bei Automobilherstellern lohnenswert ist. Darauf aufbauend wurde die allgemeine Zielsetzung und der Aufbau dieser Arbeit zum Thema *Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf* vorgestellt.

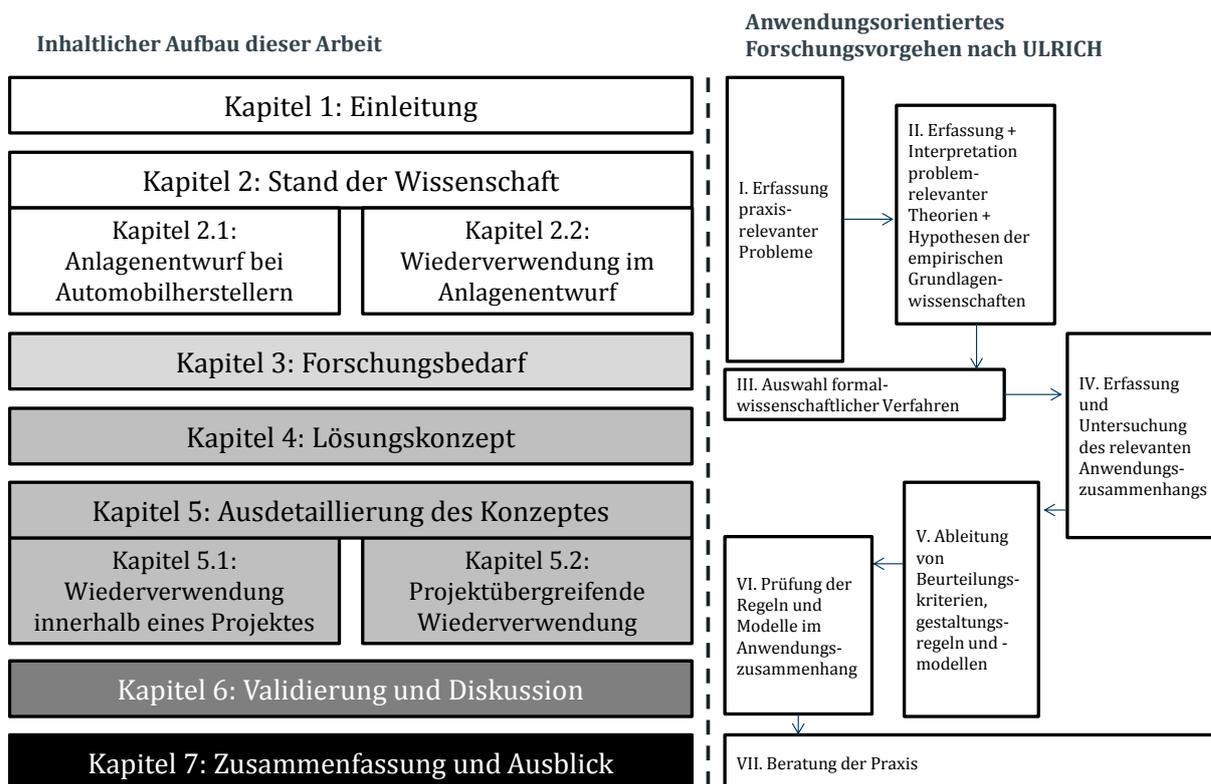


Abbildung 4: Aufbau der Arbeit in Verbindung mit dem anwendungsorientierten Forschungsansatz nach Ulrich [Ulrich 1981] (rechte Seite)

Das **Kapitel 2** beinhaltet die Wiedergabe bzw. Zusammenstellung des Standes der Wissenschaft. Dazu wird zunächst in Abschnitt 2.1 der allgemeinere von zwei relevanten Themenkomplexen mit Aspekten zum *Anlagenentwurf bei Automobilherstellern* erschlossen. Anschließend wird im Abschnitt 2.2 auf den spezielleren Themenkomplex *Wiederverwendung im Anlagenentwurf* eingegangen. Die Methode „Wiederverwendung“ wird als eine Methode zur Effizienzsteigerung eines Anlagenentwurfsprozesses vorgestellt, einschließlich mitgeltender Aspekte, wie z. B. mechatronischer Einheiten oder Phasen des Anlagenentwurfs.

Jeder der zwei Themenkomplexe schließt mit dem Aufzeigen offener Fragestellungen ab.

In **Kapitel 3** werden die aufgezeigten, offenen Fragen des vorangegangenen Kapitels zusammengefasst, sinnvoll eingegrenzt und daraus vier konkrete Forschungsfragen formuliert. Der ausgewählte Untersuchungsrahmen zur Erarbeitung von Lösungen wird beschrieben. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung des Untersuchungsvorgehens und einer Übersicht der verwendeten Methoden ab.

Das **Kapitel 4** umfasst die Präsentation eines Lösungskonzeptes für eine Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern. Zunächst wird ein initiales Lösungskonzept erarbeitet, das im Folgenden für eine strukturierte Identifikation von wiederverwendbaren Artefakten dient. Es bildet somit die Basis für das Forschungsvorgehen in dieser Arbeit und die weitere Vertiefung.

In **Kapitel 5** wird das zuvor präsentierte Lösungskonzept mithilfe von Untersuchungen im zuvor definierten Untersuchungsrahmen ausdetailliert. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen in Abhängigkeit der Anwendungsfälle der Wiederverwendung im Anlagenentwurf wird zwischen zwei Fällen unterschieden, im weiteren Verlauf Referenzfälle genannt. So wird das Konzept in Abschnitt 5.1 anhand der Analyse der Wiederverwendung innerhalb eines Projektes erweitert und in Abschnitt 5.2 schließlich für die projektübergreifende Wiederverwendung ausdetailliert. Die zu untersuchenden, relevanten Aspekte unterscheiden sich dabei je nach Referenzfall.

In **Kapitel 6** wird das ausdetaillierte Lösungskonzept mithilfe von mehreren Fallstudien validiert und die Ergebnisse werden diskutiert.

Die Arbeit schließt mit **Kapitel 7** ab. Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung, die Beantwortung der Forschungsfragen und einen Ausblick auf in Beziehung stehende, offene Forschungsthemen.

2 Stand der Wissenschaft

Das Kapitel 2 gibt den Stand der Wissenschaft wieder, in den für diese Arbeit relevanten Themenkomplexen. Die identifizierten, relevanten Themenkomplexe sind:

- **Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern**
- **Wiederverwendung im Anlagenentwurf**

Der erste Themenkomplex zum Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern ist in dieser Arbeit enthalten, um die Besonderheit von Entwurfsprozessen des Typs *engineered-to-order* nach der Klassifikation von *Wortmann* [Wortmann 1983] zu beschreiben, zu denen der Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern gehört. Im Fall *engineered-to-order* werden die Produkte (hier: Ergebnisse des Entwurfsprozesses, z. B. Produktionsanlagen) individuell nach Wünschen eines Kunden entworfen und gefertigt, für einen individuellen Einsatzzweck. Der Fall des *engineered-to-order* Produktes tritt daher im Sondermaschinenbau auf. Es können zwar innerhalb des Entwurfes Standardkomponenten verwendet werden, z. B. Industrieroboter, der Gesamtentwurf, also die Gesamtanlage, ist jedoch ein Einzelentwurf (individuell). Die Produkte sind demnach Einzellösungen, deren Artefakte in Nachfolgeprojekten nicht eins-zu-eins wiederverwendet werden müssen. Der Entwurfsprozess steht damit im Gegensatz zu dem Typ *engineered-to-stock*, bei dem ein Produkt „auf Lager“ (engl. Stock) entworfen wird und in gleicher Art und Weise wiederholt angefertigt wird [Wortmann 1983]. Die einmal entworfenen Anfertigungsinformationen lassen sich demnach unverändert zur Anfertigung des gleichen Produktes wiederverwenden. Die Erläuterung des Entwurfstyps *engineered-to-order* ist folglich essentiell für die Anforderungen, die sich aus dem Untersuchungsumfeld dieser Arbeit ergeben.

Der zweite Themenkomplex *Wiederverwendung im Anlagenentwurf* ist wichtig, um die vorhandenen wissenschaftlichen Ansätze und Richtlinien zu erläutern, die für den Entwurfstyp *engineered-to-order* und dessen spezielle Anforderungen bereits vorhanden sind. Aus diesem zweiten Themenkomplex lassen sich die offenen Fragen und damit der

Forschungsbedarf ableiten, für die *Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf*. Die beiden Themenkomplexe werden innerhalb dieses Kapitels 2 in zwei aufeinanderfolgenden Unterkapiteln behandelt.

Der Anlagenentwurf in der Automobilfertigung in Unterkapitel 2.1 bildet die Basis für das Forschungsthema. Zum einem wird in diesem Abschnitt eine Übersicht über die Automobilfertigung gegeben, zum anderen speziell auf die Fabrik- und Anlagenplanung des Werkes Karosseriebau eingegangen, inkl. der verwendeten digitalen Werkzeuge.

Im Unterkapitel 2.2 werden darauf aufbauend Methoden und Ansätze zur Optimierung des Anlagenentwurfs mit Bezug zur Wiederverwendung vorgestellt, wie Modularisierung, Baukästen, mechatronische Objekte und die *VDI-Richtlinie 3695*.

Zusätzlich wird eine Verbindung zwischen den Inhalten der Vision *I4.0* und der Wiederverwendung hergestellt. Dabei ist das Ziel, die Beiträge der *I4.0* zur Optimierung des Entwurfs deutlich zu machen und dabei vor allem auf die angedachten Informationsflüsse sowie auf die anvisierte Informationsverfügbarkeit einzugehen, die das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente* beinhaltet. Dieses Konzept hat eine direkte Anwendbarkeit für die Methode „Wiederverwendung“.

Am Ende eines jeden Themenkomplexes werden die jeweiligen Forschungslücken in Bezug auf die Zielsetzung der Arbeit herausgestellt. Die Gesamtheit der offenen Fragen in Kapitel 2 bildet die Grundlage für das Kapitel 3, in dem die konkreten Forschungsfragen dieser Arbeit formuliert werden sowie der Untersuchungsrahmen abgesteckt wird.

2.1 Themenkomplex Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern

2.1.1 Allgemeine Entwurfsprozesse

Der deutsche Begriff „Entwurfsprozess“ wird in dieser Arbeit gleichgesetzt mit dem englischen Begriff „Engineering“. Nach einer englischen Definition von 1941 ist das Engineering: *„The creative application of scientific principles to design or develop structures, machines, apparatus, or manufacturing processes, or works utilizing them singly or in combination; or to construct or operate the same with full cognizance of their design; or to*

forecast their behavior under specific operating conditions; all as respects an intended function, economics of operation and safety to life and property" [ECPD 1941]. Das Engineering ist demnach phasenübergreifend vom Fertigungsprozessentwurf bis hin zur Inbetriebnahme disziplinübergreifend. Folglich beinhaltet das Engineering mehr als den Konstruktionsprozess und umfasst konstruktionstechnische, funktionale und ökonomische Aspekte der Anlagenrealisierung [Fay 2009].

Auch im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff Engineering verwendet, wenn alle zur Anlagenrealisierung notwendigen Tätigkeiten umfassend einbezogen werden sollen. In dieser Arbeit sollen die Begriffe „Entwurf“ sowie „Anlagenentwurf“ als synonym für das „Engineering“ dienen, da sie dem englischen Begriff „Engineering“ am nächsten kommen. Ein konkretes Vorgehensmodell für den Entwurfsprozess ist in der *VDI-Richtlinie 2221* [VDI 1993] beschrieben (siehe Abbildung 5). Diese Richtlinie unterteilt den Prozess in vier Phasen, die insgesamt sieben Teilaufgaben mit definierten Teilergebnissen enthalten.

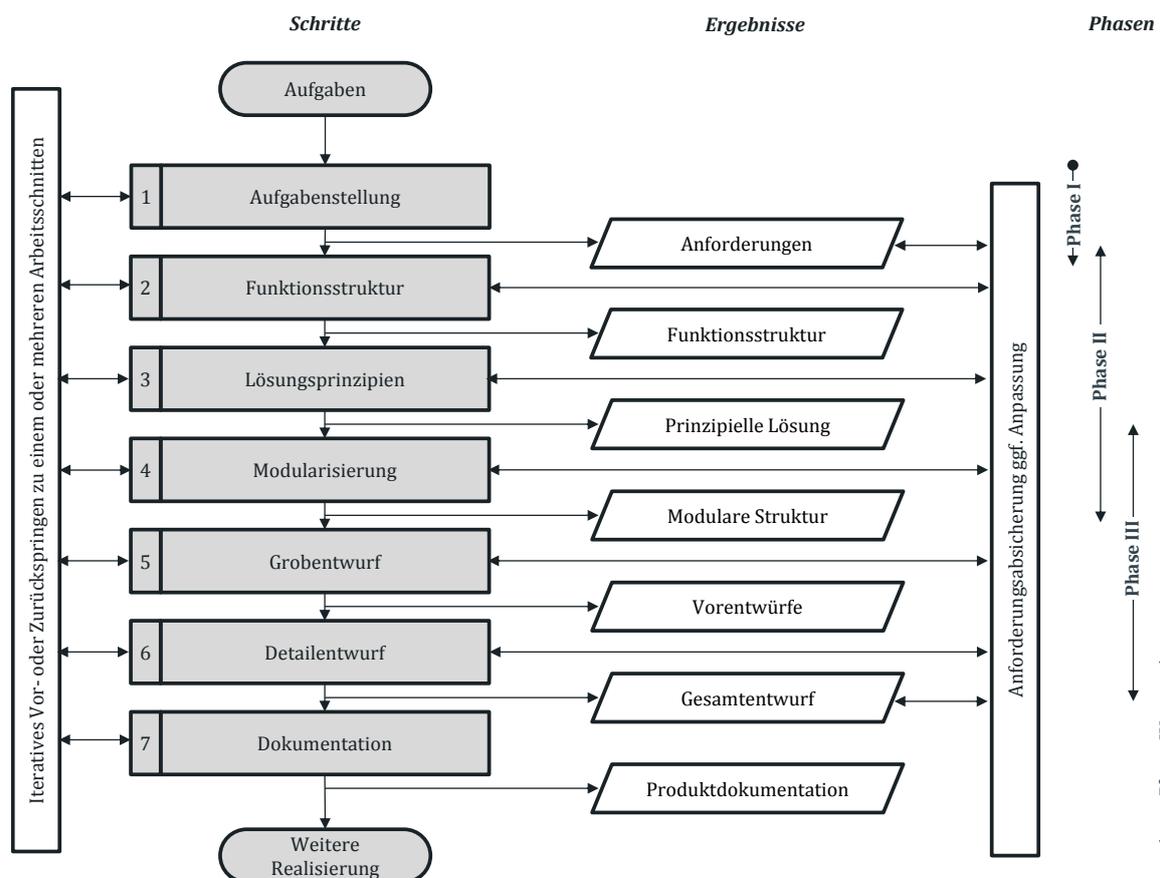


Abbildung 5: Allgemeiner Entwicklungs- und Konstruktionsprozess nach *VDI-Richtlinie 2221* [VDI 1993]

Ausgehend von Anforderungen werden Funktionsstrukturen abgeleitet, das gesamte Entwicklungsprojekt in realisierbare Module zerlegt und für diese Module physisch realisierbare Entwurfslösungen erarbeitet, die die geforderten Funktionen erfüllen. Aus den Modullösungen ergibt sich dann durch Zusammensetzung der Teillösungen der Gesamtentwurf.

Eine weitere Richtlinie erschien ein Jahr nach der *VDI 2221* als *VDI 2422* [VDI 1994], die die besonderen Anforderungen von Produktentwicklungen von Geräten mit Mikroelektronik berücksichtigt. So werden die parallelen Teilaufgaben Softwareentwicklung und elektromechanischer Entwurf explizit unterschieden.

Ein neuerer Ansatz für einen allgemeinen Entwicklungsprozess ist der *VDI-Richtlinie 2206* [VDI 2004] zu entnehmen (siehe Abbildung 6). Dieser Ansatz berücksichtigt den Entwurf mechatronischer Systeme bzw. Produkte. Daher wird in der Konstruktionsphase zwischen den Gebieten Mechatronik, Elektronik und Informationstechnik (IT) unterschieden. Die einzelnen Teillösungen der drei Gebiete werden anschließend in der Integrationsphase zusammengesetzt zu einem fertigen mechatronischen Gesamtprodukt. Diese Tatsache lässt sich in der Praxis ebenfalls beobachten, zum Beispiel anhand von organisatorischen Gliederungen oder anhand von unterschiedlichen Software-Werkzeugen, die nur speziell in einem Bereich zum Einsatz kommen, vgl. [Weidemann und Drath 2010].

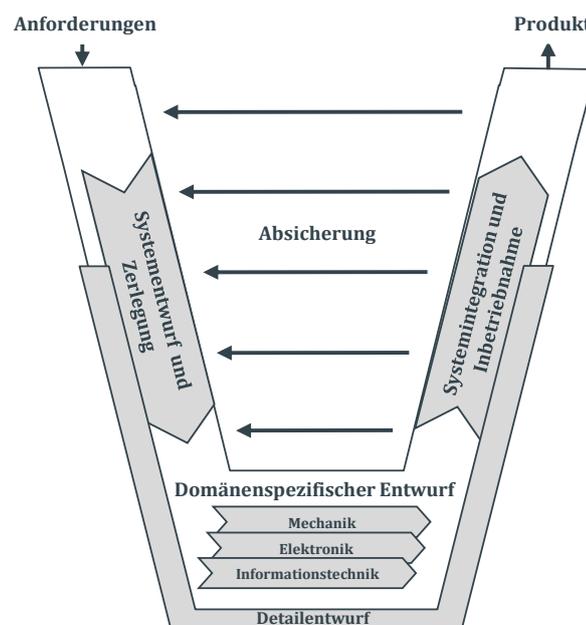


Abbildung 6: V-Modell des Entwicklungsprozesses mechatronischer Systeme [VDI 2004]

Nach Art des zu entwerfenden Objektes können Entwurfsprozesse unterschieden werden nach Produktgeschäft, Komponentengeschäft, Lösungsgeschäft bzw. Mischformen aus den drei Kategorien [Lüder et al. 2011]. Beispiele für Entwurfsprozesse im Produktgeschäft bietet [Ulrich und Eppinger 2011] oder [Lindemann 2016]. Aus diesen Prozessen entstehen Produkte für einen Endkunden. Fließen die Produkte in einen anderen Entwurfsprozess als Komponente ein, dann ist es aus Sicht des anfordernden Kunden ein Komponentengeschäft. Ein Beispiel hierzu kann in [Foehr 2013] gefunden werden. Im Gegensatz zum Produkt- und Komponentengeschäft fokussiert das Lösungsgeschäft auf die Realisierung von Produktionsanlagen und Fabriken zur Fertigung der Produkte bzw. Komponenten. Das industrielle Lösungsgeschäft kann folglich als Fabrikplanung bezeichnet werden [Foehr 2013]. Weitere Beispiele für Projekte und Vorgehensweisen im industriellen Lösungsgeschäfts sind u. a. in [Wagner et al. 2010], [Jazdi et al. 2010] und [Schäffler et al. 2014] zu finden.

Der Fabrikplanungsprozess lässt sich in verschiedene Phasen gliedern, wobei eine trennscharfe Gliederung nicht möglich ist. Je nach Quelle, Branche und Zweck unterscheiden sich die Anzahl von Phasen, die Benennung der Phasen sowie die Zeitpunkte der Phasenübergänge. Beispiele hierfür sind u. a. zu finden in [VDI und VDE 2010a], [VDI 2011], [VDI 2008], [Bernecker 2001], [Bindel und Hofmann 2009], [Große und Schorn 2004], [PAS 2006], [Schenk, Wirth und Müller 2014] oder [NAMUR 2003].

Im nächsten Abschnitt erfolgt die Eingrenzung des allgemeinen Entwurfprozesses auf die Produktionsplanung bei Automobilherstellern mit den hier geltenden Anforderungen und Abläufen.

2.1.2 Produktionsplanung bei Automobilherstellern

Die Automobilfertigung eines Personenkraftwagens (PKW) ist bei bekannten Herstellern wie Daimler, BMW, Volkswagen etc. (auch OEMs genannt für Original Equipment Manufacturer) aus Sicht des Fertigungsablaufes in gleicher Art und Weise gegliedert. Die Fertigung ist in die Hauptgewerke Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage unterteilt (siehe Abbildung 7). Die aufgezählte Reihenfolge bildet zugleich den chronologischen Fertigungsablauf eines PKW. Die Unterteilung der Automobilfertigung in vier Gewerke

lässt sich leicht an den unternehmensinternen, organisatorischen Prozessen, den betreuenden, organisatorischen Einheiten sowie den oft vereinzelt Fertigungsgebäuden erkennen, da in diesen Bereichen deutliche Abgrenzungen zwischen den Gewerken festzustellen sind.

Neben den vier erwähnten Gewerken sind weitere Fertigungseinrichtungen für die Automobilfertigung notwendig, aus denen die vier Gewerke im operativen Betrieb mit vorgefertigten Fahrzeugkomponenten gespeist werden. Das trifft insbesondere für das Gewerk Montage zu, das unter anderem mit Fahrwerken, Motoren, Sitzen, Glasdachsystemen, Getrieben und Anbauteilen aus Kunststoff versorgt wird. Die Produkte können vom Automobil-OEM in Eigenfertigung entstehen oder von externen Zulieferbetrieben bezogen werden. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Karosseriebau liegt, werden die Fertigungsstätten der erwähnten Fahrzeugkomponenten nicht weiter betrachtet. Bei Fokussierung des Gewerkes Montage hingegen, wäre zu definieren, ob die Produktionssysteme der Komponentenherstellung mit in die jeweilige Betrachtung einbezogen werden.

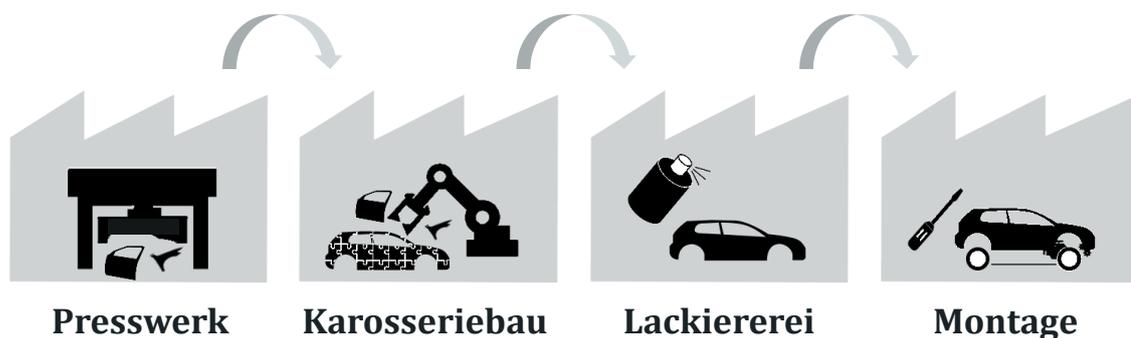


Abbildung 7: Grundsätzlicher Fertigungsablauf im PKW-Bau und zugleich Gewerke der Fertigung

Die vier Gewerke besitzen aufgrund der sehr unterschiedlichen technischen und organisatorischen Inhalte bzw. der zu realisierenden technischen Anlagen eigene Fabrikplanungsabteilungen, die für die Neu-, Um- oder Erweiterungsplanung zuständig sind.¹ Die *„Planung ist die gedankliche Vorwegnahme eines angestrebten Ergebnisses einschließlich der zur Erreichung als erforderlich erachteten Handlungsabfolge. Dabei sind in befristeter*

¹ Im Untersuchungsumfeld (siehe Unterkapitel 3.2) beobachtbar. Es können keine Rückschlüsse auf organisatorische Gliederung in anderen Unternehmen außerhalb des Untersuchungsrahmens geschlossen werden.

Zeit mit vorgegebenen Kosten unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen die dazu notwendigen Entscheidungen vorzubereiten“ [VDI 2011]. Die „Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI 2011].

In Abgrenzung zum Begriff der Fabrikplanung ist der Entwurfsprozess (auch Engineering genannt), der in dieser Arbeit betrachtet wird, ein konkreter Anwendungsfall der Fabrikplanung in der Praxis.

Von Interesse für diese Arbeit ist der Fabrikplanungsprozess nach *VDI-Richtlinie 5200* [VDI 2011], der von der Fabrikplanungsabteilung durchgeführt wird. Nach *DIN EN ISO 9000* [DIN EN ISO 2015] ist „[e]in Prozess [...] eine Tätigkeit oder ein Satz von Tätigkeiten, der bzw. die Ressourcen verwendet, um Eingang (Input) in Ergebnisse (Output) umzuwandeln.“ Dabei soll der eigentliche Fabrikplanungsprozess nach *VDI 5200* von einem Projektmanagement nach *DIN 69901-1* [DIN 2009] unterstützt werden. Die *VDI 5200* bezieht sich sowohl auf Fabrikneuplanungen (Green Field) als auch auf die Umplanung bestehender Fabriken (Brown Field). Die Planungsphasen werden dort untergliedert in Zielfestlegung, Grundlagenermittlung, Konzeptplanung, Detailplanung, Realisierungsvorbereitung, Realisierungsüberwachung und Hochlaufbetreuung [VDI 2011].

Der Fabrikplanungsprozess lässt sich weiter untergliedern in zwei Bereiche. Dabei beinhaltet die Produktionsplanung ausschließlich die Planung und Auslegung der Fertigungsanlagen, wobei die Gebäudeplanung nicht dazuzählt [Dangelmaier 2001]. Der Bereich der Produktionsplanung wird in dieser Arbeit weiter vertieft.

Bei Automobilherstellern ist der Produktionsplanungsprozess eng verzahnt mit dem Produktentstehungsprozess des Fahrzeuges. Beispiele für Produktentstehungsprozesse bei Automobilherstellern inkl. der Einteilung von Entwurfsphasen und teilweise inkl. zugehöriger Produktionsplanungsprozesse sind zu finden bei [Klug 2010], [Hab und Wagner 2010], [Wildemann 2004] sowie bei [Kerber 2016]. In allen erwähnten Quellen sind die Phasenbezeichnungen, -längen und die Phasenanzahl unterschiedlich. Für diese Arbeit wird daher ein Referenzprozess definiert, der sich an die Quellen anlehnt und zu einer

eindeutigen Verwendung in dieser Arbeit führt. Die Abbildung 8 zeigt den hier verwendeten Referenzprozess. Dieser Produktionsplanungsprozess ist in Anlehnung an [VDI/VDE-Gesellschaft 2014] und [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015] in Verbindung mit dem Produktentstehungsprozess des Fahrzeuges dargestellt.

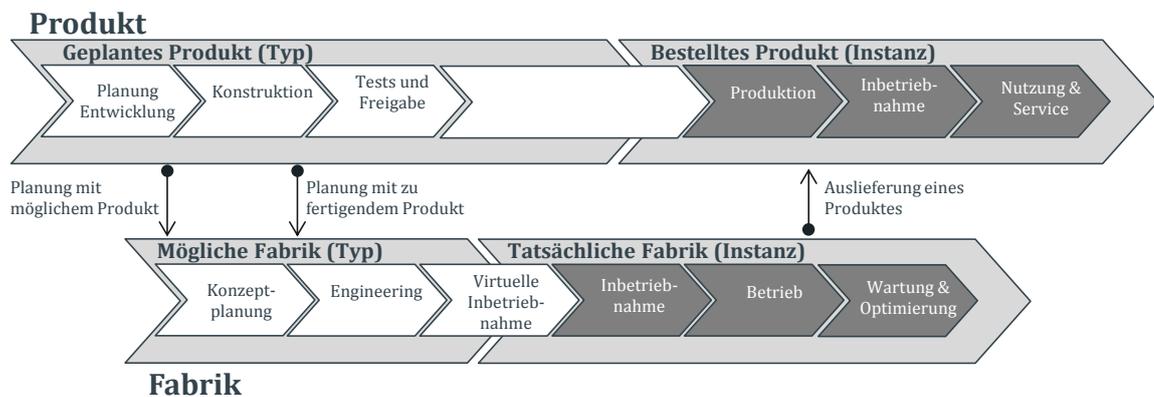


Abbildung 8: Verzahnung von Produkt- und Fabrikentstehungsprozess durch Informationsaustausch in Anlehnung an [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015] und [VDI/VDE-Gesellschaft 2014]

Die Produktplanung und die Produktionsplanung können als zwei voneinander abhängige Entwurfsprozesse dargestellt werden, die auf wechselseitigen Informationsaustausch zur Erfüllung der jeweiligen Teilaufgaben angewiesen sind. In Abbildung 8 ist dieses angedeutet durch die drei Pfeile zwischen den Prozessen als Beispiele für benötigte Informationsflüsse. Während des realen Prozessablaufs sind zahlreiche Informationsaustausche zwischen den Phasen innerhalb eines Prozesses und prozessübergreifend zur Verknüpfung beider Prozesse notwendig. Die Informationsaustausche und die damit verbundenen Abhängigkeiten zwischen dem Produktentstehungsprozess und dem Produktionsplanungsprozess müssen besondere Berücksichtigung finden, insbesondere bei der Methode „Wiederverwendung“ (siehe Unterkapitel 2.2).

2.1.3 Karosseriebauentwurf bei Automobilherstellern

Nachdem allgemeine Entwurfsprozesse sowie davon abgeleitet die Produktionsplanung bei Automobilherstellern beschrieben worden sind, folgt eine Beschreibung der konkreten, beispielhaften Ausgestaltung des Prozesses für den Karosseriebauentwurf in der Automobilindustrie. Ziel ist hierbei die Realisierung einer funktionsfähigen, verketteten Karosseriebaufertigung.

Der Karosseriebau eines OEMs besteht in der Regel aus einer Hauptlinie bzw. Kernfertigung und Nebenlinien bzw. Untergruppen [Wemhörner 2005]. Dabei versorgt das Presswerk die Nebenlinien mit umgeformten, mechanisch bearbeiteten, oft gehärteten Blechen (z. B. Türenaußenteile, Seitenteilbleche, A-Säule-Innenteil), in denen diese Einzelteile zu Baugruppen zusammengefügt werden. Diese Baugruppen werden anschließend in die Hauptlinie geliefert und zu einer fertigen Rohkarosse gefügt [Kiefer 2007] (siehe Abbildung 9).

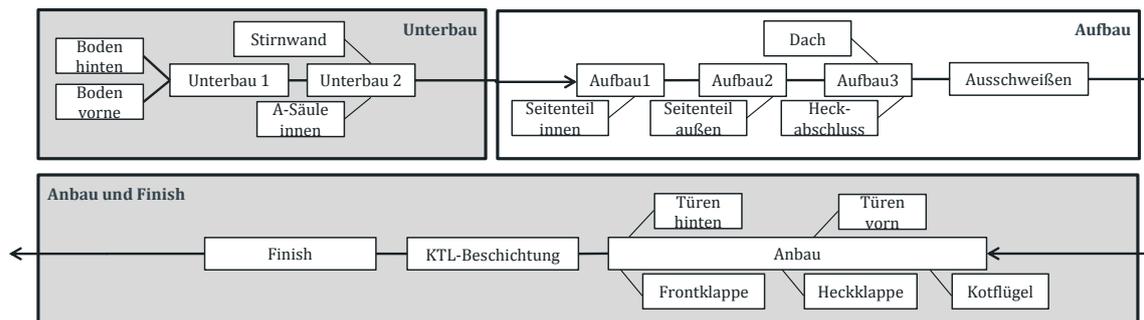


Abbildung 9: Beispielhafter Fertigungsfluss in einem Karosseriebau eines Automobilherstellers in Anlehnung an [Kiefer 2007], [Wemhörner 2005]

Ein Ausschnitt der notwendigen Teilaufgaben im Rahmen des Entwurfsprozesses zur Realisierung eines Karosseriebaus sind in der Abbildung 10 abgebildet. Diese sind entsprechend ihrer Abhängigkeiten chronologisch geordnet.

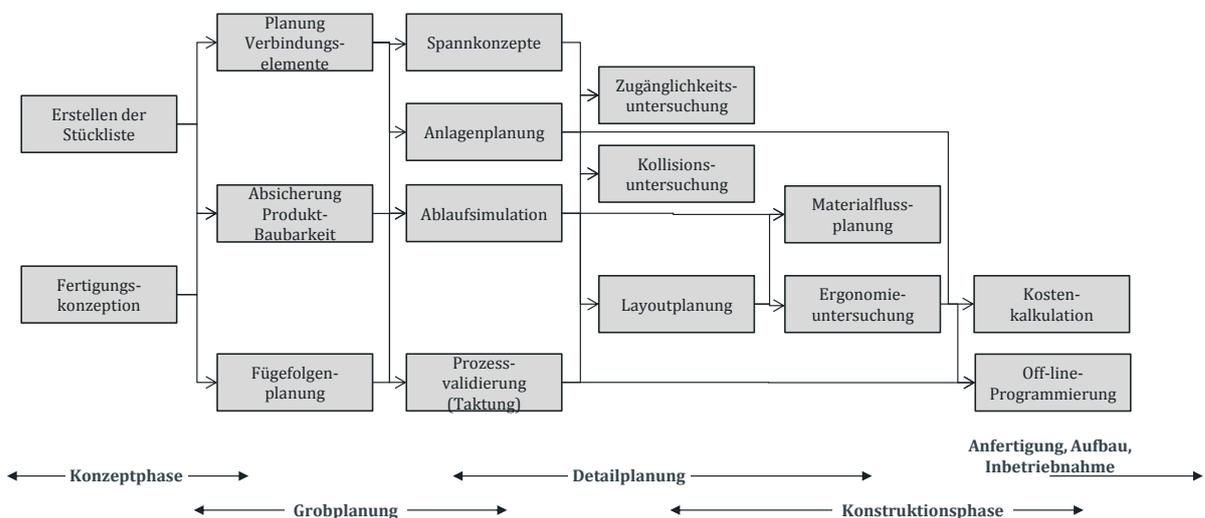


Abbildung 10: Beispiel der Teilaufgaben eines Karosseriebauentwurfes der Automobilproduktion [VDI 2008], ergänzt um Phaseinteilung

Die Teilaufgaben lassen sich den Phasen des Referenzprozesses (Abbildung 8) zuordnen, wobei sich die Phasen in der Abbildung überlappen. Einige Teilaufgaben werden in einem

iterativen Vorgehen über mehrere Phasen ausgeführt und fertiggestellt, so dass ohne klare Definition von Meilensteinen und ohne eine deutlich detailliertere Darstellung des Karosseriebauentwurfes keine eindeutige Phaseneinteilung definiert werden kann. Je nach Literaturquelle und dortigem Fokus unterscheiden sich die Anzahl sowie die Benennungen der Phasen. Durch eine Ableitung der in [Kiefer 2007], [Bracht, Geckler und Wenzel 2011], [VDI 2011], [VDI 2008] und [VDI 1993] gemachten Tätigkeitsbeschreibungen und Phasenzuordnungen lässt sich folgende Einteilung für diese Arbeit festlegen:

In der **Konzeptphase** werden in erster Linie ökonomische, rechtliche und grundsätzliche technische Fragestellungen entschieden und in den sogenannten Prämissen festgehalten. Darin enthalten sind u. a. Standortentscheidungen, Schichtpläne, Jahresausbringungsmenge, Investitionsschätzungen, geplante Fertigungstiefen und grobe Fabrikkonzepte.

In der Phase **Grobplanung** erfolgen die Planung der Fügefolgen und die Zuordnung der Fertigungsressourcen zu den Verbindungselementen. Des Weiteren werden Hallenlayouts angefertigt, Vorrichtungen geplant und erste Mengengerüste erstellt, die die benötigten Fertigungsressourcen mengenmäßig und technisch beschreiben.

In der **Detailplanung** erfolgen Überarbeitungen der ersten Konzepte aus der Grobplanung und eine weitere Detaillierung im Zuge der genaueren Produktbeschreibungen, die aus dem Produktentstehungsprozess in den Fabrikentstehungsprozess einfließen. Außerdem erfolgen erste Simulationen zur Absicherung der benötigten Ausbringungsmenge sowie die Konzeption der Spann- und Fixierkonzepte. Alle Planungen münden in Lastenheften zur Beauftragung von Anlagenkonstrukteuren bzw. -bauern.

In der **Konstruktionsphase** erfolgen u. a. die mechatronischen Konstruktionen, Kollisionsuntersuchungen, die Off-line-Programmierung der Roboter und die virtuelle Inbetriebnahme.

Die letzten Phasen sind **Anfertigung, Aufbau und Inbetriebnahme**, wobei am Ende der Phase Inbetriebnahme eine funktionsfähige, verkettete Karosseriebaufertigung vorhanden ist. Die drei Phasen Anfertigung, Aufbau und Inbetriebnahme stellen einen fließenden Übergang zwischen dem Anlagenentwurf und der operativen Betriebsphase dar.

2.1.4 Sichtweisen auf Objekte im Entwurfsprozess

Beim Durchlaufen der Produktionsplanung ändert sich die Sichtweise auf die zu entwerfenden Objekte vom groben Konzept, beschrieben in Text und mit ökonomischen Daten, bis hin zur physischen Realisierung. Dieser Umstand ist in Entwurfsmodellen, wie dem *Münchener Produktkonkretisierungsmodell* [Ponn und Lindemann 2011], dem *Modell des Konstruierens* nach Rude [Rude 1998], dem *Pyramidenmodell* nach Ehrlenspiel [Ehrlenspiel 2009], in [Feldhusen und Grote 2013] sowie bei [Rodenacker 1991] berücksichtigt. Es wird dort deutlich zwischen Abstraktionsebenen im Laufe des Entwicklungsprozesses unterschieden (siehe Abbildung 11). Die drei Abstraktionsebenen Bau-, Wirk- und Funktionsebene geben einen Hinweis auf die vorherrschende Art der Beschreibung des zu entwickelnden Produktes² zu einem jeweiligen Meilenstein. Mit Beschreibung ist die notwendige Sichtweise auf das Produkt im Rahmen der Entwicklung gemeint.

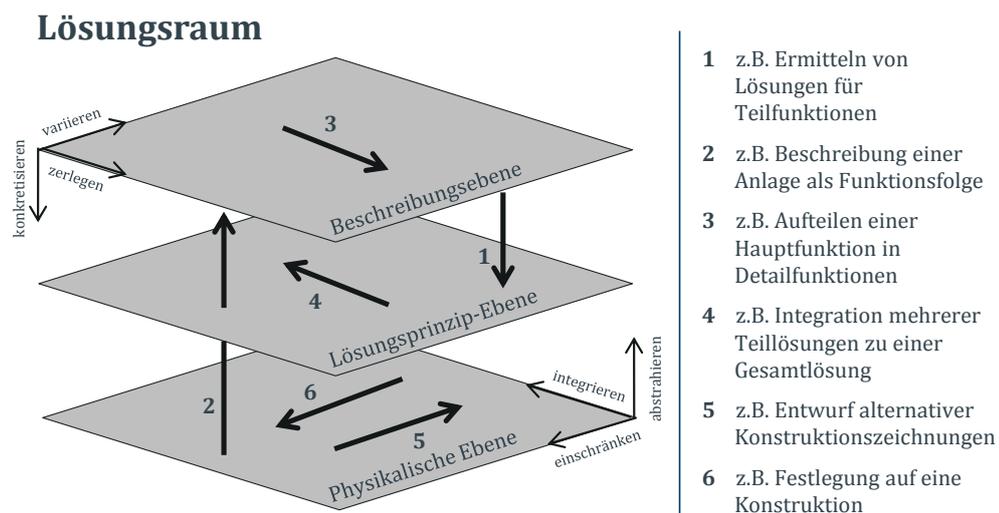


Abbildung 11: *Münchener Produktkonkretisierungsmodell* nach [Ponn und Lindemann 2011]

Diese unterscheidet sich, je nach Teilaufgabe im Entwurfsprozess und zugehöriger Abstraktionsebene, wobei nicht benötigte Informationen ausgeblendet werden. Ein Produkt kann mithilfe einer technischen Zeichnung mechanisch oder mithilfe eines Funktionsplans funktional bzw. eines Verkabelungsplans elektronisch beschrieben werden (siehe

² Der Begriff „Produkt“ meint hier eine Produktionsanlage, die entworfen wird. Es ist nicht das Produkt gemeint, das mithilfe der Produktionsanlagen im operativen Fabrikbetrieb gefertigt wird.

Abbildung 12). Diese Erkenntnis deckt sich mit den Teilaufgaben der allgemeinen Entwurfsprozesse aus Abschnitt 2.1.1.

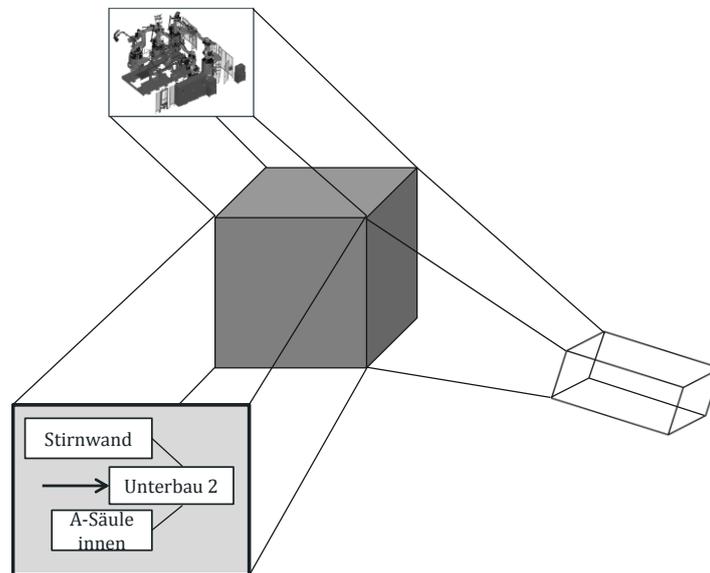


Abbildung 12: Sichtweisen auf ein mechatronisches Objekt in Anlehnung an [DIN EN 2010] und [Hady 2013]

Entsprechend der *DIN EN 81346-1* [DIN EN 2010] und der *DIN 6779-12* [DIN 2011] werden Objekte nach folgenden Kriterien strukturiert:

- Funktionale Beschreibung – Welche Funktion übt das Objekt aus?
- Produktionsbezogene Beschreibung – Aus welchen Teilen besteht das Objekt?
- Ortsbezogene Beschreibung – An welchem Ort ist das Objekt lokalisiert?

In der Tabelle 2 sind beispielhafte Beschreibungsmittel je Strukturierungskriterium nach der *DIN 6779-12* [DIN 2011] aufgelistet:

Tabelle 2: Beschreibungsmittel von Objekten in Abhängigkeit des Strukturierungskriteriums

Strukturierungskriterium	Mögliches Beschreibungsmittel
Funktional	z. B. Prozessbeschreibung, Fließschema, Funktionsschema und Stromlaufschema
Produktionsbezogen	z. B. Produktbeschreibung, Konstruktionszeichnung, Anordnungszeichnung, Klemmenzeichnung, Wartungsanweisung, d. h. Dokumente zur konkreten physikalischen Beschreibung des Objektes
Ortsbezogen	z. B. Lagekarte, Gebäudegrundrisszeichnung, Aufstellungszeichnung, Installationszeichnung, Fluchtwegzeichnung, Rettungswegzeichnung oder Schrankaufbauzeichnung, d. h. maßstäbliche Zeichnungen

Branchen- oder unternehmensbezogene Kriterien können nach der *DIN 6779-12* bei komplexen Systemen zusätzlich hinzugezogen werden. Durch Strukturierung eines Objektes entsprechend der Kriterien entsteht bei komplexen Objekten eine hierarchische Struktur (siehe Abbildung 13).

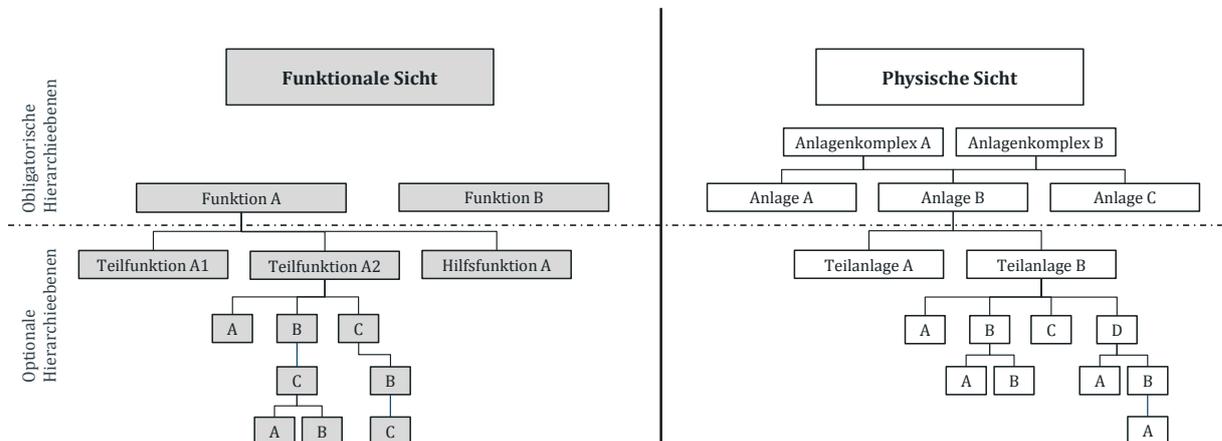


Abbildung 13: Hierarchische Strukturierung eines Objektes nach [DIN 2011]

Denkbar ist ebenfalls die Kombination der Strukturierungskriterien für ein Objekt. So könnte z. B. ein Objekt zunächst funktional strukturiert werden und auf einer untergeordneten Hierarchieebene aus produktbezogener Sicht. Diese Kombination ist dann im Einklang mit den Annahmen, u. a. des V-Modells zur mechatronischen Entwicklung (Abbildung 6), des *Münchener Produktkonkretisierungsmodells* (Abbildung 11) sowie jenen, in den bereits erwähnten Quellen zu strukturierten Entwicklungsprozessen. Diese Modelle haben die Gemeinsamkeit, dass sie in frühen Entwicklungsphasen von einer abstrakten, funktionalen Beschreibung der Objekte ausgehen und spätestens in der Konstruktionsphase von produktionsbezogenen Beschreibungsmitteln bzw. Sichtweisen auf das Objekt ausgehen. Das bedeutet, dass sich für die Strukturierung von Objekten zunächst funktionale Kriterien anbieten und auf unteren Hierarchieebenen produktionsbezogene Kriterien genutzt werden sollten. Damit ändern sich mit der Granularität der Objekte das Kriterium der Strukturierung und die Sichtweise auf das Objekt. An die Stelle der funktionalen Sicht rückt auf unteren Ebenen die konkrete physische Objektbeschreibung. Die Sichtweisen haben großen Einfluss auf die benötigten Informationen zur jeweiligen Beschreibung der Objekte zu einem gewissen Entwurfszeitpunkt. Dieser Sachverhalt wird in den eingesetzten digitalen Werkzeugen berücksichtigt, die den Anwender während des

Entwurfsprozesses unterstützen. Die Werkzeugkette bildet durch die Auswahl spezifischer Werkzeuge, deren Schnittstellen untereinander und den, zu den Informationen passenden Datenformaten, die geforderten Sichtweisen auf Objekte ab. Mehr zu den digitalen Werkzeugen folgt im Abschnitt 2.1.5.

2.1.5 Werkzeuge der Digitalen Fabrik im Karosseriebauentwurf

Ein weiteres Kriterium zur Charakterisierung des Anlagenentwurfs sind die eingesetzten Werkzeuge der *Digitalen Fabrik*, siehe [VDI 2008], die in der Automobilindustrie und in weiteren Industriebranchen zum Einsatz kommen [Ebner 2004], [Schulze 2000]. Zur *Digitalen Fabrik* existieren zahlreiche, verwandte Definitionen, u. a. in [Bley und Franke 2001], [Dombrowski, Tiedemann und Bothe 2001], [Bracht 2002], [Wiendahl 2002], [Westkämper, Bierschenk und Kuhlmann 2003], [Wenzel, Hellmann und Jessen 2003], [Wenzel 2006]. Nach [Marczinski 2006] bilden den Kern der *Digitalen Fabrik* rechnergestützte Entwurfs-Werkzeuge, was vor allem aus Sicht von Automobil-OEMs zutrifft [Bracht, Geckler und Wenzel 2011]. Eine allgemeine Definition lässt sich in der *VDI-Richtlinie 4499* finden und lautet wie folgt:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ [VDI 2008]

Aufgrund dieser umfassenden Verankerung der *Digitalen Fabrik* im Fabrikplanungsprozess charakterisieren ihre eingesetzten Modelle, Methoden und Werkzeuge den jeweiligen Entwurfsprozess. Die Werkzeuge sind ein Beschreibungsmittel der Objekte in den jeweiligen Entwurfsphasen und geben damit Auskunft über den Abstraktionsgrad bzw. die Sichtweise auf die Objekte, den Zerlegungsgrad der Objekte und allgemein auf die jeweiligen Aufgaben in den jeweiligen Entwurfsphasen sowie deren Teilergebnisse. Zum ganzheitlichen Verständnis des Entwurfsprozesses sind das genaue Verständnis und eine detaillierte Analyse der *Digitalen Fabrik* im jeweiligen Untersuchungsumfeld ein sinnvoller Ansatzpunkt.

Für den Bereich der Karosseriebauplanung unterstützen die Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* u. a. die Absicherung der Baubarkeit des Produktes, die anschließende Prozessplanung und Visualisierungen, wie Layouts und Simulationen [Bracht, Geckler und Wenzel 2011] (siehe Abbildung 14).

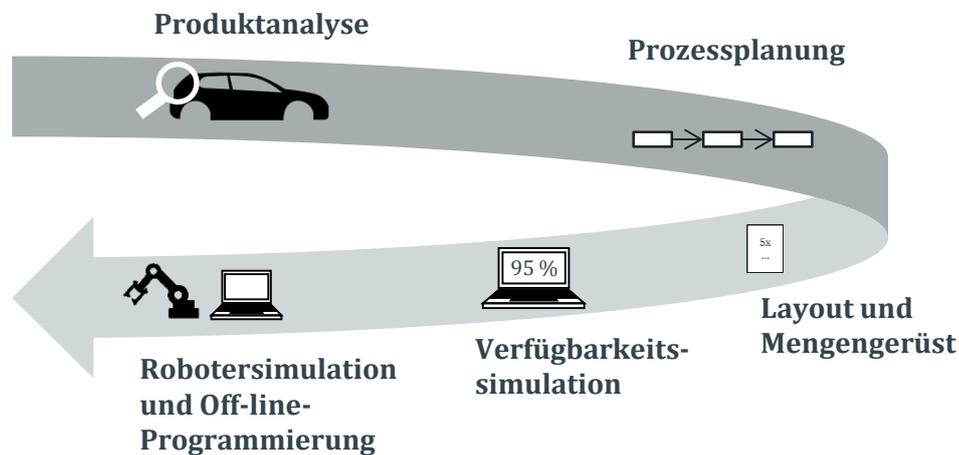


Abbildung 14: Unterstützungsfelder durch die *Digitale Fabrik* in der Karosseriebauplanung in Anlehnung an [Bracht, Geckler und Wenzel 2011]

In den einzelnen Unterstützungsfeldern können einzelne Werkzeuge, aber auch mehrere Werkzeuge mit unterschiedlichem Fokus zum Einsatz kommen. In der Abbildung 15 ist eine Klassifikation dieser Werkzeuge gegeben. Es wird deutlich, dass die Werkzeuge eine weite Bandbreite von reinen Kollaborationshilfsmitteln bis hin zu komplexen Simulations- und Analysewerkzeugen beinhalten.

Klassifikation der Werkzeuge der Digitalen Fabrik

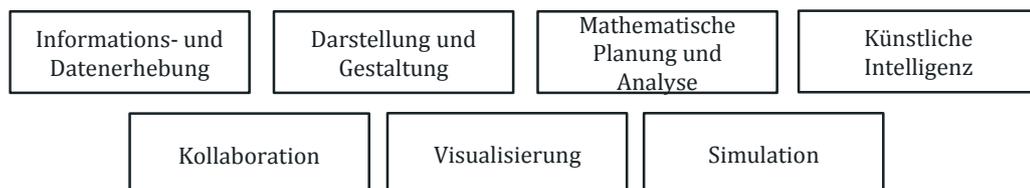


Abbildung 15: Klassifikation der Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* in Anlehnung an [Bracht, Geckler und Wenzel 2011]

Aufgrund der definierten Abfolge der Teilaufgaben, die im Laufe der Karosseriebauplanung bearbeitet werden müssen, unterstützt durch die Werkzeuge der *Digitalen Fabrik*, ergeben sich charakteristische Verwendungszeiträume für die eingesetzten Werkzeuge (siehe Abbildung 16).

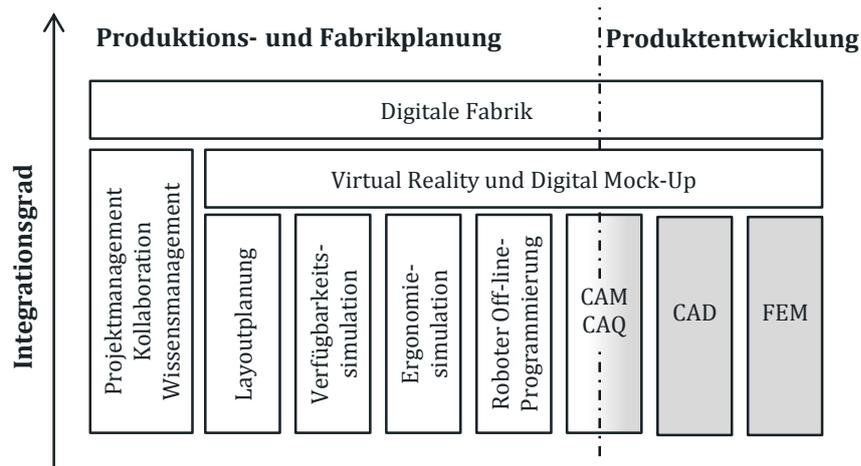


Abbildung 16: Verwendungszeiträume der Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* in Anlehnung an [Dombrowski und Tiedemann 2005]

In den ersten Phasen erfolgt ein Einsatz von vornehmlich Office- und Projektverwaltungswerkzeugen, gefolgt von Layoutwerkzeugen. Erst später werden Simulations- und Konstruktionswerkzeuge verwendet. Die Abgrenzungen sind in der Realität nicht so eindeutig auszumachen. Einige Werkzeuge werden phasenübergreifend verwendet, jedoch zeigt die Abbildung 16 die Verwendungsschwerpunkte. Das heißt, dass der jeweilige Entwurfsprozess, sei es für die Karosseriebauplanung oder andere Produkte, durch die zum Einsatz kommenden Werkzeuge und deren Einsatzzeitpunkte charakterisiert werden kann. Dieser Umstand soll im Hauptteil dieser Arbeit (Kapitel 5) eine Berücksichtigung finden.

2.1.6 Multikriterielle Charakterisierung des Anlagenentwurfsprozesses

Zusammenfassend lässt sich aus den Erkenntnissen zu den allgemeinen Entwurfsprozessen, Sichtweisen auf mechatronische Objekte, den beschriebenen Strukturierungskriterien und den eingesetzten Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* eine multikriterielle Charakterisierung des Anlagenentwurfsprozesses erstellen. Aufgrund des Fokus dieser Arbeit wird an dieser Stelle eine beispielhafte, multikriterielle Charakterisierung für den Anlagenentwurf eines Automobil-OEMs gezeigt (siehe Abbildung 17).

	Phasen	Ergebnisse	Aufgaben	Strukturierungskriterien der Objekte	Zerlegungsgrad der Objekte
	Konzeptphase	Wirtschaftliches Konzept	Analyse Investitionsentscheidung	Funktional	sehr gering
	Grobplanung	Realisierbares Konzept	Definition Prämissen, Prozess und System		gering
	Detailplanung	Ausschreibbare Anlagen (Lastenhefte)	Definition Funktionalitäten, Vorauswahl Komponenten (z.B. aus Bibliotheken)	Produktbezogen	mittel
	Konstruktion	Anfertigbare Anlage	Konstruktion von Komponenten, Werkzeugen, Einrichtungen		hoch
	Anfertigung	Funktionale Anlage	Bestellen der benötigten Komponenten, Einzelteile und Montage	Ortsbezogen	hoch, mittel
	Inbetriebnahme	Anlage bereit für Serienbetrieb	Verkettung der Anlagen, Anpassung Programmierung und Dokumentation		mittel, gering
	Projektabschluss	Anlage entsprechend Spezifikationen abgenommen	Finale Kostenrechnung, Dokumentation und Kundenabnahme		sehr gering
	Operation Phase				sehr gering

Abbildung 17: Phasen und Teilergebnisse des Anlagenentwurfs beim Automobilbau-OEM, basierend auf [Gepp 2014], [Höffken und Schweitzer 1991], [Urbas und Krause 2012], [Reschke und Svoboda 1984], [NAMUR 2003], [Lüder et al. 2017b]

Die Abbildung ist durch das Zusammenfügen der einzelnen vorherigen Erkenntnisse entstanden und soll als theoretisches Konstrukt dienen. Die Überprüfung der Annahmen in der Praxis und genauere Untersuchungen eines realen Entwurfsprozesses erfolgen im Kapitel 5, im Hauptteil dieser Arbeit, da die Charakterisierungskriterien einen großen Einfluss bei der Wiederverwendung von erzeugten Entwurfsergebnissen bzw. Entwurfsartefakten im Anlagenentwurf haben.

2.1.7 Offene Fragestellungen im Themenkomplex Anlagenentwurf

In diesem Abschnitt werden die offenen Fragestellungen mit Bezug zur Forschungsfrage dieser Dissertation aufgelistet, die dem Themenkomplex Anlagenentwurf zugeordnet werden können und deshalb auf dem dortigen, aktuellen Stand der Wissenschaft aufsetzen.

Die offenen Fragestellungen sind im Einzelnen(siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Übersicht über offene Fragestellungen im Themenkomplex Anlagenentwurf bei Automobilherstellern

Fragestellung	Beantwortung durch	Abgeleitet aus Abschnitt
Welche Daten werden konkret in der Karosseriebauplanung erzeugt?	Aufnahme des Prozesses mit Fokus auf Artefakte.	2.1.3, 2.1.5
Wie verändern sich die Sichtweisen auf eine Anlage? – Treten unterschiedliche Sichtweisen parallel auf?	Aufnahme des Prozesses mit Fokus auf Vorgänger- und Nachfolger-Schritt.	2.1.4, 2.1.5
Was ist eine sinnvolle Phaseinteilung des Anlagenentwurfprozesses?	Aufnahme des Prozesses mit Fokus auf verwendete Artefakte.	2.1.6
Welche digitalen Werkzeuge werden im realen Entwurfsprozess benutzt?	Analyse Werkzeuge und Verwendungszeiträume im Entwurf.	2.1.5
Wer ist Prozessverantwortlicher – OEM oder Fremdfirmen?	Aufnahme des Prozesses mit Fokus auf organisatorischen Ablauf.	2.1.3

2.2 Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf

Nachdem im vorangegangenen Unterkapitel 2.1 der Stand der Wissenschaft im Themenkomplex *Anlagenentwurf bei Automobilherstellern* betrachtet worden ist, soll in diesem Unterkapitel 2.2 ausschließlich auf die Methode Wiederverwendung im Anlagenentwurf fokussiert werden. Dazu wird die Wiederverwendung als Begriff und als Methode eingeführt sowie der Stand der Wissenschaft dargelegt. Anschließend werden korrelierende Aspekte behandelt, dazu zählen der projektunabhängige Entwurf, mechatronische Objekte, Lebensphasen, Hierarchien des Produktionssystems und bestehende Wiederverwendungskonzepte. Der Abschnitt endet mit einer Zusammenstellung von offenen Fragestellungen zum Thema Wiederverwendung im Anlagenentwurf bei Automobilherstellern. Der Bezug zur Automobilindustrie wird in logischer Weiterführung des Unterkapitels 2.1 in diesem Abschnitt aufrechterhalten.

2.2.1 Wiederverwendung, Standardisierung und Modularisierung

Zunächst erfolgt eine Abgrenzung der Begriffe Standardisierung, Modularisierung und Wiederverwendung, da sie in der industriellen Praxis oft im selben Kontext benutzt werden, jedoch inhaltlich zu unterscheiden sind.

Wiederverwendung, Standardisierung und Modularisierung besitzen sich überschneidende Zielsetzungen. In Bezug auf den Anlagenentwurfsprozess dienen alle drei Methoden dazu, den Entwurfsprozess deutlich effizienter zu gestalten durch Rückgriff auf vorhandene Artefakte. Nach [Sauer und Ebel 2007] beträgt der Anteil der Entwurfskosten zwischen 20 bis 25 Prozent der Gesamtinvestitionen neuer Fertigungsanlagen bei einem Automobilbau-OEM. Durch die Beschleunigung von Teilaufgaben im Entwurf durch Rückgriff auf vorhandene Lösungen wird die Prozesseffizienz gesteigert. Da die Lösungen nicht mehr grundsätzlich neu entworfen werden müssen, führt dies in der Folge zu Kostensenkungen.

Die Themen Standardisierung, Modularisierung und Wiederverwendung können ebenfalls als Ansätze des Variantenmanagements zur Reduzierung der Varianten angesehen werden [ROI Management Consulting AG 2016]. Das heißt, je nachdem aus welcher Sichtweise die Methoden betrachtet werden, lassen sich unterschiedliche Nutzungsfelder und Zuordnungen treffen. In dieser Arbeit erfolgt die Betrachtung der Methoden ausschließlich mit dem Ziel, die Effizienz im Anlagenentwurf durch Rückgriff auf vorhandene Artefakte zu steigern. Daher werden weitere Nutzungsfelder, wie das Variantenmanagement, bestenfalls gestreift, aber nicht vertieft.

An dieser Stelle ist es wichtig, die drei Begriffe einzuführen, zu erläutern und voneinander abzugrenzen. Damit werden die überschneidenden Zielsetzungen bezüglich einer Effizienzsteigerung herausgearbeitet, aber auch deutlich gemacht, dass es daneben jeweils spezielle Zielsetzungen der einzelnen Methoden gibt.

In *Gepp* [Gepp 2014] werden die Methoden in eine klare Reihenfolge gebracht: Hierarchisierung, Modularisierung, Standardisierung und zuletzt Wiederverwendung mit dem Ziel, einen Baukasten mit standardisierten Modullösungen inkl. der notwendigen immateriellen Entwurfsartefakte zu wiederholter Realisierung zu schaffen (siehe *engineered-to-*

stock, Kapitel 2). Auch Gepp verdeutlicht damit den thematischen Zusammenhang zwischen den Methoden und schafft zudem einen logischen Zusammenhang. Nach der *VDI-Richtlinie 3695* [VDI und VDE 2010c], bei der die Schaffung eines Anlagenbaukastens nicht im Mittelpunkt steht, sondern die allgemeine Wiederverwendung von materiellen und immateriellen Artefakten, ist die Wiederverwendung eine übergeordnete Methode, die bestenfalls auf Standards beruhen kann. Standards hingegen sind keine notwendige Voraussetzung für die Wiederverwendung von Artefakten. Damit kann die *VDI 3695* auch bei *engineered-to-order* Entwurfsprozessen (siehe Kapitel 2) angewendet werden. Aus den beiden Definitionen nach Gepp und nach der *VDI 3695* lässt sich ableiten, dass die Art der Dinge, die wiederverwendet werden sollen, die Anpassungsmöglichkeiten der Dinge und der Zweck des Rückgriffs auf vorhandene Artefakte zu unterschiedlichen Definitionen der Begriffe und inhaltlichen Zusammenhänge führen.

Im Folgenden werden die einzelnen Begriffe näher betrachtet:

Standardisierung:

Ist die „*Gesamtheit der Maßnahmen zur Vereinheitlichung, Vereinfachung, Stufung und Begrenzung oder Einschränkung von Erzeugnissen, Baugruppen und Bauteilen sowie Verfahren und Prozessen in Form von technischen-optimalen Lösungen*“ [Arlt 1968].

Daneben existieren viele ähnliche Definitionen (vgl. [Springer Gabler Verlag o. J.], [Brockhaus 1993], [Beste 1957], [Gepp 2014]). Unabhängig von der Definition ist das Ziel der Standardisierung, die Effizienz einer Unternehmung durch Vereinheitlichung und Begrenzung der Varianten zu steigern und betrifft sowohl materielle Erzeugnisse als auch immaterielle Dinge, wie Prozesse. Standards sollen möglichst gut für eine breite Anzahl von Anwendungsfällen wiederverwendet werden können, damit sich die Standards in der Praxis etablieren [Gepp 2014].

Modularisierung:

Eine ausführliche Definition und Beschreibung der Effekte durch Modularisierung wird in [Feldhusen und Grote 2013] gegeben. Basis für die Modularität eines Produktes bildet demnach die Produktarchitektur als Zusammenhang zwischen funktionaler und physikalischer Struktur eines Produktes ([Ulrich 1995], [Göpfert und Steinbrecher 2000]). Ist ein System zur Reduzierung der Produktkomplexität in möglichst voneinander unabhängige

Komponenten unterteilt, dann ist das System modular aufgebaut. Die speziellen Komponenten eines so unterteilten Systems werden als Module bezeichnet und sind demnach ein „*charakteristisches Maß eines modularen Systems*“ [Hady 2013]. Im Gegensatz zu Bausteinen in Baukästen, bei denen es durch die Kombination von standardisierten Komponenten um größtmögliche Variantenbildung geht (vgl. [Miller und Elgard 1998] und [Borowski 1961]), dienen Module in erster Linie dazu, die Komplexität im Entwurf zu verringern. Dies gelingt dadurch, dass ein Modul eine große Anzahl an Funktionalitäten vereint [Miller und Elgard 1998], die enge Beziehungen zueinander haben. Die Module eines Systems untereinander hingegen besitzen wenige, genau definierte funktionale Beziehungen und Schnittstellen. Diese Definition ist weit verbreitet (vgl. [Hölttä-Otto], [Feldhusen und Grote 2013] oder [Göpfert 1998]).

Je höher die physische und funktionale Unabhängigkeit der Komponenten untereinander ist, desto höher ist die Modularität [Göpfert und Steinbrecher 2000]. U. a. nach [Feldhusen und Grote 2013] ist die Wiederverwendung von Modulen in den zugehörigen Systemen aufgrund der schwachen Beziehungen zu anderen Modulen und der definierten Schnittstellen im Gegensatz zu weniger modularen Systemen leichter.

Module müssen nicht unbedingt materiell sein, sie können auch rein immateriell sein, z. B. im Bereich Wiederverwendung bei der Softwareentwicklung (siehe [Sametinger 1997]). Dort stellen die immateriellen Module eine Funktionalität bereit und können durch definierte Schnittstellen in das Programm eingebaut werden. Nach [Miller und Elgard 1998] können immaterielle Module auch im industriellen Bereich zur Effizienzsteigerung des Anlagenentwurfs eingesetzt werden. Ziel ist dann die Wiederverwendung von Best-Practice-Lösungen bzw. explizit der Entwurfsdaten und -spezifikationen von vorhandenen Lösungen [Hady 2013]. Hierbei liegt der Fokus demnach auf dem vorhandenen Wissen. Diese Erweiterung des Modulbegriffes auf immaterielle Module, speziell auf die Modulinformationen zur Wiederverwendung im Anlagenentwurfsprozess, wird in dieser Arbeit weiter verfolgt, da im Entwurfsprozess viele immaterielle Artefakte entstehen und verarbeitet werden. Der Modulbegriff ist folglich hier nicht auf physische Module beschränkt. Dieser Aspekt ist konform mit der Wiederverwendung nach der *VDI-Richtlinie 3695* [VDI und VDE 2010c], denn auch dort bezieht sich die Wiederverwendung auf materielle und

immaterielle Dinge, die aufgrund der vielen möglichen Ausprägungsformen als Artefakte bezeichnet werden.

Wiederverwendung:

Wiederverwendung ist zunächst ein sehr allgemeiner Begriff, der sich auf keinen bestimmten Bereich und Anwendungsfall beschränkt. Daher erfolgt zunächst eine allgemeine Definition und eine Abgrenzung der Begriffe *Wiederverwendung* und *Weiterverwendung*. Nach der *VDI-Richtlinie 2343* ist die Wiederverwendung „*die Verwendung eines Gerätes oder seiner Bestandteile zum gleichen Zweck, für den es entwickelt wurde*“ [VDI 2001]. In Abgrenzung dazu ist die Weiterverwendung „*die erneute Benutzung eines gebrauchten Produktes für einen anderen Verwendungszweck, für den es ursprünglich nicht hergestellt wurde. Sie kann unter Nutzung der Gestalt ohne bzw. mit beschränkter Veränderung des Produktes erfolgen.*“ [VDI 2001]. Eine Weiterverwendung, also eine Veränderung des ursprünglichen Zweckes des Objektes, wird in dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Die Artefakte sollen einzig und allein zur Unterstützung eines Entwurfes gleicher oder ähnlicher Anlagen dienen mit dem ursprünglichen Verwendungszweck.

Die *VDI 2343* adressiert speziell die End-of-Life-Phase eines Produktes, daher muss der Begriff der Wiederverwendung in den Kontext des Anlagenentwurfs gebracht werden, mit dem sich diese Arbeit beschäftigt. In [Smith und Duffy 2001] wird erläutert, dass im Rahmen eines Entwurfes neben Artefakten auch Wissen und Erfahrungen wiederverwendet werden können. In der *VDI-Richtlinie 3695* erfolgt ebenfalls eine Definition, bei der die Wiederverwendung von Artefakten als eine Methode zur Effizienzsteigerung des Anlagenentwurfes beschrieben wird. Nach der *VDI 3695* ist das Ziel der Wiederverwendung im Anlagenentwurf „*ein Artefakt in möglichst vielen Kundenprojekten einsetzen zu können. Die Methode Wiederverwendung kann dabei auf materielle Artefakte, z. B. Motoren, Pumpen, Funktionsbausteine, als auch auf immaterielle Artefakte, z. B. Pläne, Architekturen und Spezifikationen, angewandt werden*“ [VDI und VDE 2010c]. Damit ist eine Verbindung zum erweiterten Modulbegriff nach [Miller und Elgard 1998] hergestellt, denn sowohl dort als auch in der *VDI 3695* sollen unter anderem Informationen von vorhandenen Lösungen zur Effizienzsteigerung im Anlagenentwurf wiederverwendet werden.

Die *VDI 3695* macht allerdings keine Angaben zur Artefakt-Identifikation, der Art und der Größe bzw. Granularität der wiederverwendbaren Artefakte, da sie domänen- bzw. unternehmensspezifisch seien. Ein gutes Artefakt könnte demnach eine komplette Fabrik, aber auch ein kleines Objekt, wie eine Schweißzange, sein [VDI und VDE 2010c]. Eine Schnittmenge zur Standardisierung und Modularisierung ist zudem in den zu erwartenden Effekten auszumachen, die nach der *VDI 3695* zu einer Kostensenkung, einer Zeitminimierung beim Anlagenentwurf, einer Steigerung der Lösungsqualität und zu Vorteilen beim Wartungsaufwand führen.

Der Aufwand, der bei der Wiederverwendung von vorhandenen Artefakten entsteht, z. B. durch notwendige Anpassungen, ist entscheidend für die Höhe der Effekte und damit für die Wiederverwendbarkeit. In der Abbildung 18 wird der Anpassungsbedarf der Artefakte bei der Wiederverwendung in Abhängigkeit von der Anforderungserfüllung gezeigt.

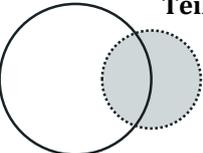
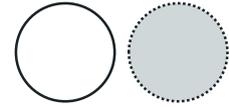
Grad der Anforderungserfüllung vorhandener Lösungen für ein neues Projekt	Auswirkung auf die Wiederverwendbarkeit vorhandener Lösungen
<p style="text-align: center;">Übererfüllung</p> 	<p>Unveränderte Wiederverwendung/ Anpassung an geringere Anforderung</p>
<p style="text-align: center;">Erfüllung</p> 	<p>Unveränderte Wiederverwendung</p>
<p style="text-align: center;">Teilerfüllung</p> 	<p>Übernahme einzelner Komponenten/ Anpassung an Anforderungen/ Neuplanung</p>
<p style="text-align: center;">Nichterfüllung</p> 	<p>Neuplanung/Neuplanung mit Wissensübertragung</p>

Abbildung 18: Auswirkung der Anforderungserfüllung auf die Wiederverwendung von Lösungen, basierend auf [Thoben 1990], [Hady 2013], [Knabe 2015]

Sichtbar wird, dass der Anpassungsbedarf der Artefakte nur bei einer vollständigen Anforderungserfüllung entfällt. In den anderen Fällen ist jeweils abzuwägen, ob die Wiederverwendung lohnenswert ist und damit eine sinnvolle Wiederverwendbarkeit des jeweiligen Artefaktes im konkreten Anwendungsfall gegeben ist. Das gilt auch für die Anforderungsübererfüllung, die zu einer teureren Lösung führen kann.

Im diesem Abschnitt wurden die Begriffe Standardisierung, Modularisierung und Wiederverwendung eingeführt. Es erfolgte eine Definition und Abgrenzung der Begriffe und zugleich eine Beschreibung der engen Zusammenhänge. Alle drei Methoden dienen u. a. zur Steigerung der Effizienz im Entwurfsprozess durch Rückgriff auf vorhandene Artefakte. Da die *VDI 3695* speziell die Wiederverwendung als Methode im Anlagenentwurf behandelt, also auch die Wiederverwendung von Standards und Modulen einschließt, soll nun der Aufbau dieser Richtlinie im Detail betrachtet werden, um daraus weitere Rückschlüsse auf offene Fragenstellungen in Bezug auf den Einsatz der Wiederverwendung als Methode im Anlagenentwurf bei Automobilherstellern abzuleiten.

2.2.2 Wiederverwendung nach VDI-Richtlinie 3695

Ein systematisches Vorgehen zur Optimierung des Entwurfprozesses wird in der *VDI-Richtlinie 3695* beschrieben (siehe [VDI und VDE 2010a]). Ausgangspunkt bildet die Evaluation des IST-Zustandes, der anschließende Abgleich des ermittelten IST-Zustandes mit einem Zielzustand und dem Ergreifen von Maßnahmen, um die Differenz zwischen den Zuständen zu schließen [Schertl et al. 2008]. Zur strukturierten Umsetzung wurden für die VDI-Richtlinie 3695 fünf Hauptaktivitätsfelder mit Aspekten identifiziert, die Ansatzpunkte für eine systematische Verbesserung sind [Schertl et al. 2008]. In Tabelle 4 sind die Hauptaktivitätsfelder aufgelistet und kurz beschrieben.

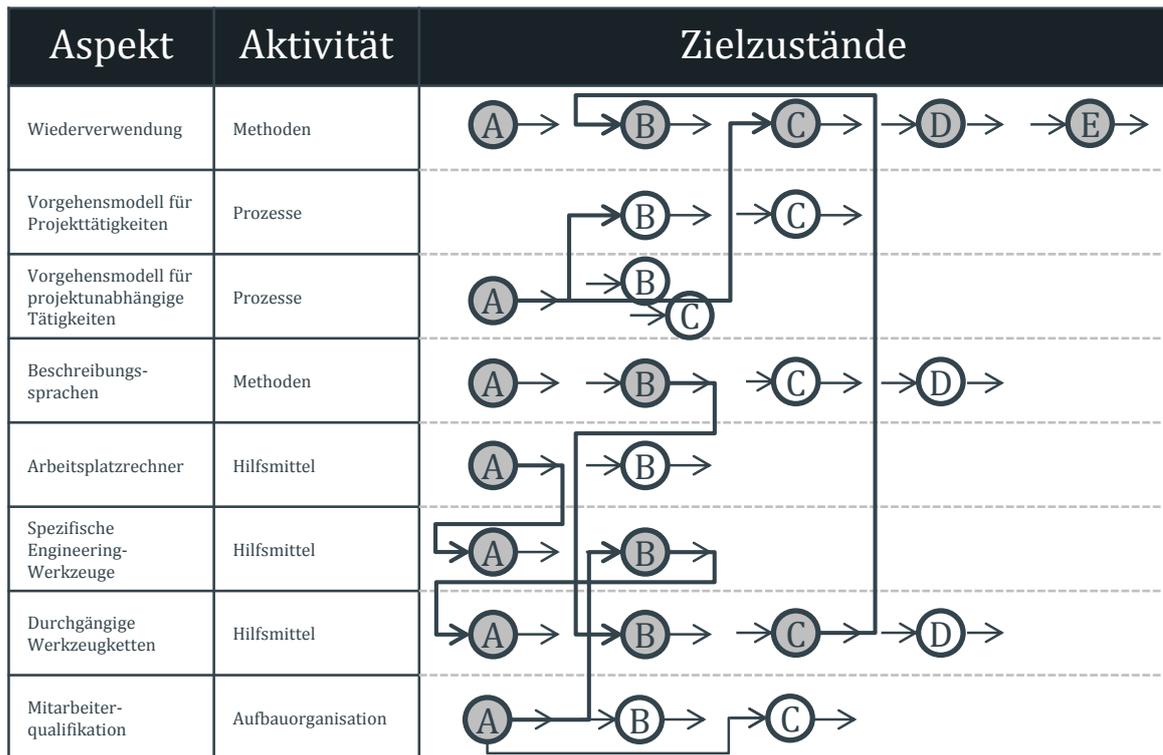
Tabelle 4: Hauptaktivitätsfelder und Aspekte der Entwurfsoptimierung aus der *VDI-Richtlinie 3695* [Schertl et al. 2008], [VDI und VDE 2010a]

Hauptaktivitätsfelder	Erläuterung	Aspekte
Prozesse	Verbesserung von für den Entwurf relevanten Prozessen und deren Zusammenspiel	U. a. Projektstätigkeiten, projektunabhängige Tätigkeiten, Wissensmanagement, Kommunikation mit dem Kunden, Konfigurationsmanagement

Hilfsmittel	Verbesserung von Entwurfs-Werkzeugen und deren Zusammenspiel (<i>Digitale Fabrik</i>)	Durchgängige Werkzeugketten, spezielle Entwurfs-Werkzeuge, Arbeitsplatzrechner
Aufbauorganisation	Verbesserung der Organisationsstruktur, der Teams, den zugeordneten Aufgaben und deren Zusammenwirken	U. a. Zusammenarbeit über Gewerke hinweg, Teamzusammensetzung, Bedeutung von Schlüsselpersonen
Methoden	Verbesserung konkreter Methoden, die durch Prozesse beschrieben sind oder von Werkzeugen umgesetzt werden	U. a. Wiederverwendung, Gewerkeintegration und -durchgängigkeit, Beschreibungssprachen
Ökonomie	Verbesserung der ökonomischen Planung bzw. des Controllings	Planungsrealismus und „Markt und Domäne“

Die Aspekte bieten Untersuchungsfelder für eine Evaluation des IST-Zustandes und einer Definition eines Zielzustandes im Entwurf. Zwischen den Hauptaktivitätsfeldern und den Aspekten bestehen Korrelationen, so dass eine ganzheitliche Optimierung zusammenhängender Aspekte sinnvoll ist [Schertl et al. 2008].

Für die Operationalisierung der Wiederverwendung in der automobilen Produktionsplanung, die im Fokus dieser Dissertation steht, müssen demnach korrelierende Aspekte mit in eine umfassende Untersuchung einbezogen werden. In der VDI 3695 sind für jeden Aspekt Zielzustände angegeben, um den jeweiligen Aspekt systematisch optimieren zu können. Die Zielzustände einzelner Aspekte können Voraussetzung für den Zielstand anderer Aspekte sein, d. h. ein Zielzustand in einem Aspekt ist die Voraussetzung für den Fortschritt der Zielzustände in einem anderen Aspekt. Abbildung 19 zeigt die Aspekte der VDI 3695, die einen direkten Zusammenhang zur Wiederverwendung besitzen. Die grau markierten Zielzustände in der Abbildung sind solche, die notwendige Voraussetzungen sind, um den Endzustand „E“ bzw. Zwischenzustände „B“ und „C“ bei der Wiederverwendung zu erreichen. Über die Pfeile werden die Abhängigkeiten bzw. Vorbedingungen in der Abbildung sichtbar.



 Voraussetzung zum Erreichen der Zielzustände B und höher im Aspekt Wiederverwendung

Abbildung 19: Zusammenhängende Zielzustände der VDI-Richtlinie 3695 bezüglich Wiederverwendung [VDI und VDE 2010a], [VDI und VDE 2010b], [VDI und VDE 2010c], [VDI und VDE 2010d], [VDI und VDE 2010e]

Es wird deutlich, dass zur Optimierung der Wiederverwendung definierte Zielzustände in den Hauptaktivitätsfeldern Methoden [VDI und VDE 2005], Prozesse [VDI und VDE 2010b], Hilfsmittel [VDI und VDE 2010d] sowie Aufbauorganisation [VDI und VDE 2010e] erreicht werden müssen. In allen korrelierenden Aspekten reichen Zwischenzustände aus, um den Endzustand der Etablierung der Methode „Wiederverwendung“ zu erreichen. Die einzelnen Aspekte haben folgende Inhalte:

Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten [VDI und VDE 2010b]:

Eigenständiger Prozess, dessen Ergebnisse die Mitarbeiter in allen Projektphasen unterstützen, d. h. Prozess zur Spezifikation von wiederverwendbaren Artefakte oder von Beschreibungssprachen, Entwicklung von durchgängigen Datenmodellen oder von technologischen Anlagenstrukturen.

Vorgehensmodell für Projektstätigkeiten [VDI und VDE 2010b]:

Festgelegte Abfolge von Entwurfstätigkeiten mit definierten Ein- und Ausgangsinformationen, zu benutzenden Werkzeugen, zugeordneten Rollen sowie Vorgänger- und Nachfolgeraufgaben. Ziel ist die Optimierung der Ressourcen durch einen festgelegten Entwurfsprozess und transparente Informations- und Datenflüsse.

Beschreibungssprachen [VDI und VDE 2010c]:

Unterschiedliche Sachverhalte werden durch eine Beschreibungssprache beschrieben. Sie hat eine Syntax, eine Grammatik und eine Semantik. Die Wahl der Beschreibungssprache hängt vom Lebenszyklus einer Anlage ab und kann u. a. ein Text, eine Formatvorlage, grafische Symbole, eine Programmiersprache oder eine Funktionsbeschreibung sein. Weitere Informationen zur Auswahl sind in der *VDI/VDE 3681* [VDI und VDE 2005] enthalten.

Arbeitsplatzrechner [VDI und VDE 2010d]:

Geeigneter Arbeitsplatzrechner, mit dem der Mitarbeiter die Entwurfs-Aufgaben zufriedenstellend durchführen kann. Es sind ausreichend Rechner vorhanden; die Hardware ist ausreichend schnell für die benötigte Entwurfs-Software, sodass der Mitarbeiter nicht behindert wird bzw. seine Motivation nicht verliert.

Spezifische Entwurfs-Werkzeuge [VDI und VDE 2010d]:

Spezifische Entwurfs-Werkzeuge können sowohl Software- als auch Hardwarewerkzeuge sein. Sie sind obligatorisch zur Fertigstellung von Entwurfs-Aufgaben, z. B. Programmiergeräte, Feldbus-Analysatoren. Fehlende oder unzureichende Werkzeuge führen zu einem Qualitäts- und Effizienzverlust.

Durchgängige Werkzeugketten [VDI und VDE 2010d]:

Integration und Durchgängigkeit der eingesetzten Software-Werkzeuge über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage, wodurch ein durchgängiger Informationsfluss mit elektronischem Datenaustausch entsteht. Die durchgängige Werkzeugkette bezieht sich ganzheitlich auf die organisationsinterne und -übergreifende Integration der Werkzeuge für kaufmännische, administrative und technische Aufgaben. Die Arbeitsabläufe werden damit optimal ohne Informationsfluss und Zeitverlust unterstützt, siehe Abschnitt 2.1.5.

Mitarbeiterqualifikation [VDI und VDE 2010e]:

Die Mitarbeiterqualifikation setzt sich zusammen aus der Fachkompetenz und der Sozialkompetenz. Beides kann durch formelles und informelles Lernen verbessert werden. Die Verbesserung der Arbeitsqualität hängt maßgeblich von der Mitarbeiterqualifikation ab und ist für ein Unternehmen wichtig. Mehr Informationen zum Anforderungsprofil eines Projektingenieurs sind in der *VDI 6600* [VDI 2006a], [VDI 2006b] zu finden.

Zwei weitere Methoden, die mit der Wiederverwendung eng verwandt sind, sind der Abdeckungsgrad sowie die Gewerkeintegration und –durchgängigkeit.

Abdeckungsgrad:

Der Abdeckungsgrad beschreibt wie viele Artefakte einer Anlage oder Lösung durch wiederverwendbare Artefakte abgedeckt sind. In jeder Domäne muss ein optimaler Abdeckungsgrad individuell festgelegt werden. So kann eine ganze Anlage aus wiederverwendbaren Artefakten bestehen, sie ist also standardisiert. Eine Anlage kann aber nur teilweise standardisiert sein und in einzelnen Bereichen kundenindividuelle Wünsche zulassen.

Gewerkeintegration und –durchgängigkeit:

Integration und Durchgängigkeit zwischen den Tätigkeiten aller Gewerke über alle Lebensphasen hinweg. Ziel ist die Interoperationalität und Konsistenz zwischen den Arbeitsergebnissen der Gewerke bereits in frühen Phasen sicherzustellen und die Abstimmungen zu optimieren.

Zum Erreichen des Endzustandes beim Abdeckungsgrad müssen die Zielzustände „C“ bzw. „E“ der Wiederverwendung erreicht werden. Die Gewerkeintegration und –durchgängigkeit erfordert den Zielzustand „B“ beim Abdeckungsgrad, so dass der Endzustand im Aspekt der Gewerkeintegration und –durchgängigkeit erst nachrangig zum Abdeckungsgrad und zur Wiederverwendung erreicht werden kann.

In der Abbildung 20 sind die geforderten Zielzustände mit Korrelation zur Wiederverwendung in den jeweiligen Aspekten kurz beschrieben.

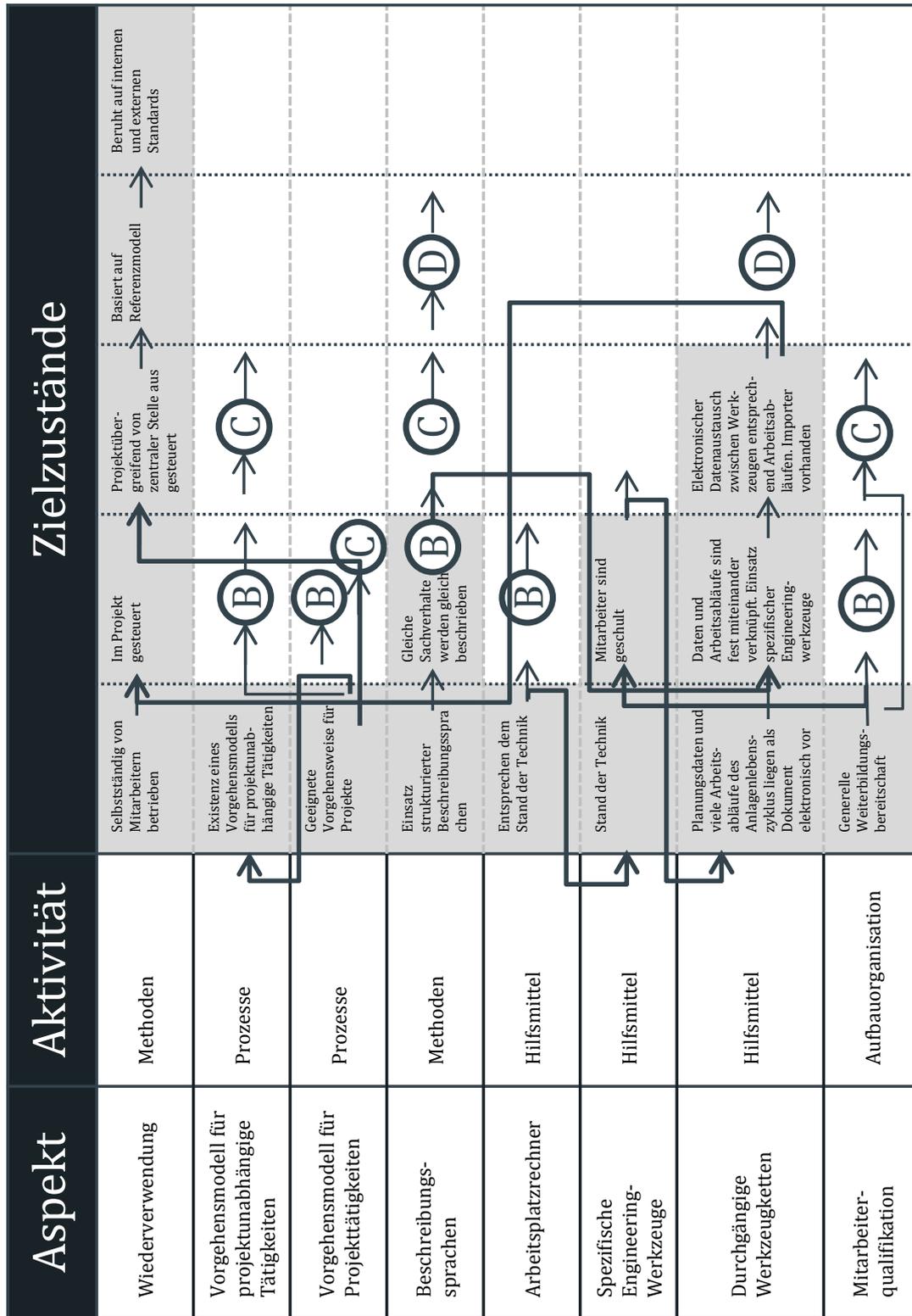


Abbildung 20: Zusammenhängende Zielzustände der VDI-Richtlinie 3695 bezüglich Wiederverwendung mit Beschreibung [VDI und VDE 2010a], [VDI und VDE 2010b], [VDI und VDE 2010c], [VDI und VDE 2010d], [VDI und VDE 2010e]

In einigen Aspekten, wie der durchgängigen Werkzeugkette, sind die Anforderungen vergleichsweise hoch, in anderen Aspekten wie der Mitarbeiterqualifikation jedoch relativ schnell zu erfüllen. Eine Optimierung der Wiederverwendung basiert daher zunächst in einer Aufnahme der IST-Zustände, wie es in der *VDI 3695* vorgesehen ist.

Der Nutzen der Wiederverwendung ist in [Pohl, Böckle und van der Linden, F. 2005] am Beispiel Softwareentwicklung beschrieben (siehe Abbildung 21).

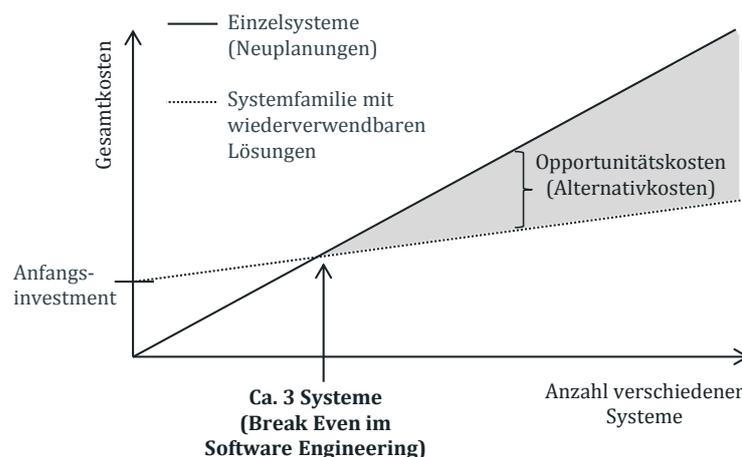


Abbildung 21: Nutzen der Wiederverwendung in Abhängigkeit der Wiederverwendungshäufigkeit [Pohl, Böckle und van der Linden, F. 2005]

Demnach ist der Nutzen der Wiederverwendung von der Höhe des Anfangsaufwandes und des nachgelagerten Minderaufwandes abhängig. Nach [Pohl, Böckle und van der Linden, F. 2005] liegt der Nutzen der Wiederverwendung bei der Softwareentwicklung bereits bei drei zu entwickelnden Systemen vor. Sollte die Aufwandsreduzierung klein sein, dann muss eine häufige Wiederverwendung stattfinden, bevor sich das Vorgehen lohnt und vice versa. Bei sehr großen Projekten, wie der Fabrikplanung einer Automobilproduktion, liegt die Vermutung nahe, dass die Anzahl der Wiederverwendungen gering sein kann, damit sich ein Nutzen ergibt. In [Tomer et al. 2004] wird zudem die Güte der Wiederverwendung (siehe Zielzustände der Wiederverwendung in Abbildung 20) in die Nutzenanalyse einbezogen. Die Autoren kommen für die Softwareentwicklung zu der Erkenntnis, dass eine Wiederverwendung, egal welcher Güte, schon ab zwei zu entwickelnden Systemen lohnenswert ist. In [Schröck 2016] wird der Nutzen der Wiederverwendung wie er in [Tomer et al. 2004] beschrieben ist, mit den Zielzuständen der Wiederverwendung der *VDI 3695* abgeglichen. In der Tabelle 5 ist das Ergebnis dargestellt.

Tabelle 5: Nutzen der Wiederverwendung in Abhängigkeit des Zielzustandes der VDI 3695, abgeleitet aus [Tomer et al. 2004] und [Schröck 2016]

Zielzustand	Lohnenswert ab folgender Anzahl zu entwickelnder Systeme
Ohne Wiederverwendung	-
A (bis B)	1 (sofort)
C (Ableitung aus vorhandener Lösung)	2
C (Speziell für die Wiederverwendung entwickelte Lösung)	4 (gegenüber Zielzustand A bis B)

Im folgenden Abschnitt wird vertieft auf den projektunabhängigen Entwurf eingegangen, der eine Vorbedingung für die Wiederverwendung darstellt.

2.2.3 Projektunabhängiger Entwurfsprozess

Der projektunabhängige Entwurf nach [VDI und VDE 2010b] ist der prozessuale Ablauf, um systematisch wiederverwendbare Artefakte zu entwerfen und so die Methode Wiederverwendung nach [VDI und VDE 2010c] in den Entwurfsprozess einer Organisation zu integrieren. Der projektunabhängige Entwurf wird auch als *Domain Engineering* bezeichnet (siehe [Jazdi et al. 2010]). Der Ansatz ist in [Jazdi et al. 2010] auf das industrielle Lösungsgeschäft (siehe Abschnitt 2.1.1) übertragen worden, war aber bereits in der Softwareentwicklung bekannt (siehe [Sametinger 1997], [Dietzsch 2002] oder [Pohl, Böckle und van der Linden, F. 2005]).

Den Kern dieses Ansatzes bildet die Existenz von zwei Entwurfsprozessen, dem projektunabhängigen Entwurf bzw. *Application Engineering* und dem projektunabhängigen Prozess bzw. *Domain Engineering* (siehe Abbildung 22).

Demnach kann die Wiederverwendung im Anlagenentwurf systematisiert werden, indem wiederverwendbare, projektunabhängige Artefakte als Ergebnis eines projektunabhängigen Entwurfsprozesses erschaffen werden. Die wiederverwendbaren Artefakte werden in einer Bibliothek abgelegt und stehen kundenspezifischen Projekten zur Verfügung. Wiederverwendbare Artefakte sind folglich nicht ein zufälliges Nebenprodukt von kundenspezifischen Projekten, sondern das Ergebnis von eigens dafür durchlaufenden Entwurfsprozessen. Das Vorgehen ist detailliert in [Jazdi et al. 2010] beschrieben.

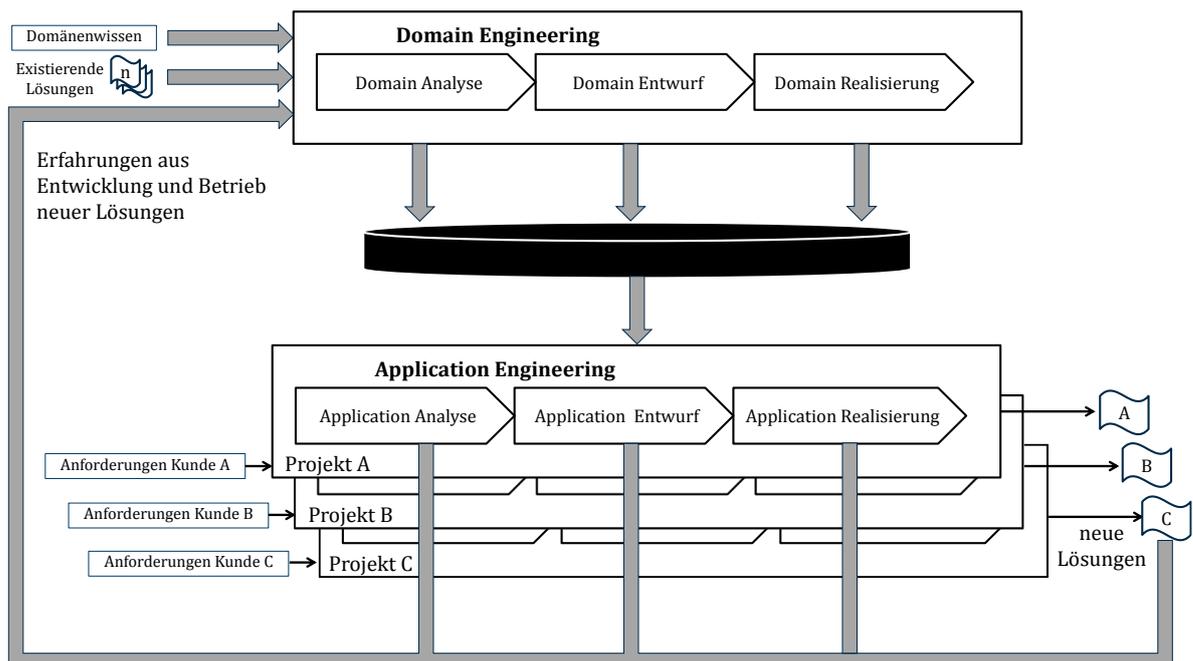


Abbildung 22: Schaffung wiederverwendbarer Artefakte durch einen projektunabhängigen Entwurfsprozess [Jazdi et al. 2010]

Konkrete Beispiele für wiederverwendbare Artefakte als Ergebnis eines real durchgeführten Projektes sind dort nicht angegeben. Es wird allerdings beschrieben, dass die Lösungen je nach Branche stark unterschiedlich seien. Diese Tatsache soll im folgenden Abschnitt vertieft werden, indem mechatronische Objekte erläutert werden. Da die wiederverwendbaren Artefakte das Ergebnis mechatronischer Anlagenentwürfe sind, müssen Artefakte Informationen über mechatronische Objekte enthalten oder auch ganze mechatronische Objekte vollständig repräsentieren.

2.2.4 Mechatronische Objekte

Um wiederverwendbare Artefakte im Entwurfsprozess näher zu analysieren, soll auf die Forschungsergebnisse zu mechatronischen Objekten zurückgegriffen werden. Nach Kiefer [Kiefer 2007], Lüder [Lüder et al. 2010] und Köhlein [Köhlein et al. 2012] sind zur vollständigen Beschreibung dieser mechatronischen Objekte für die Nutzung im Entwurfsprozess zahlreiche unterschiedliche Informationen notwendig, die sich in acht Gruppen einteilen lassen (siehe Abbildung 23).

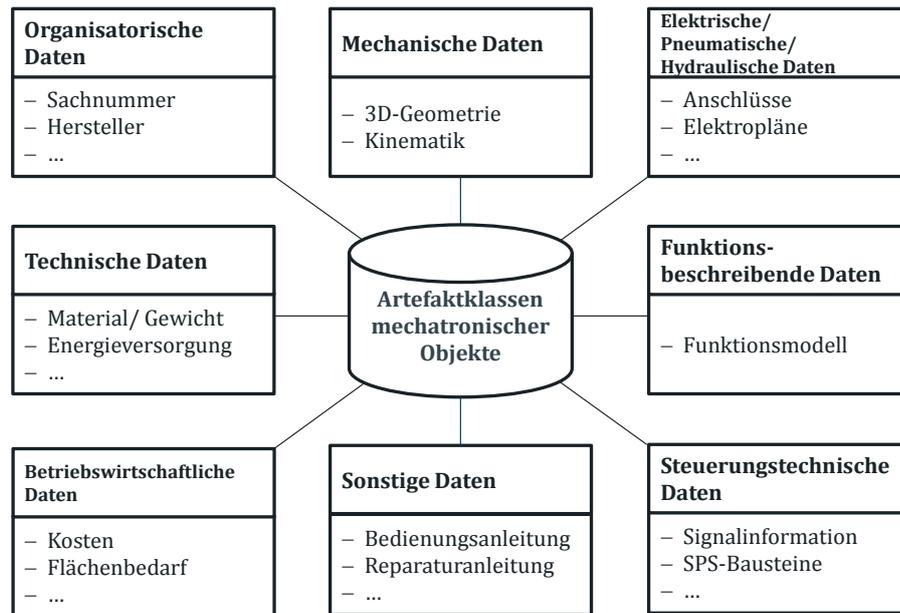


Abbildung 23: Notwendige Informationen zur vollständigen Repräsentation eines mechatronischen Objektes [Kiefer 2007], [Lüder et al. 2010]

Auffällig ist dabei die Vielfalt der notwendigen Daten, die von Texten, im Falle von Bedienungsanleitungen, über Pläne bis hin zu Funktionsmodellen reichen kann. In Anknüpfung an Abschnitt 2.2.2 kann ein Artefakt aus einer einzelnen Information über ein mechatronisches Objekt bestehen, aber auch alle Informationen beinhalten, folglich ein vollständiges mechatronisches Objekt repräsentieren. Klar ist aber, dass Informationsvorhaltung und Ablage in einer Bibliothek zahlreiche Anforderungen an die digitalen Werkzeuge (siehe Abschnitt 2.1.5) stellt. Die Informationen stehen in engem Zusammenhang zu den Sichtweisen auf die jeweiligen Objekte (siehe Abschnitt 2.1.4) und der aktuellen Entwurfsphase (siehe Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3). Abzugrenzen von den erwähnten Informationen zur vollständigen Beschreibung eines mechatronischen Objektes mit Fokus des Entwurfsprozesses ist das *Product Lifecycle Management* (PLM). Im Konzept des PLM werden neben den relevanten Informationen für den Entwurf, Daten aus der Anfertigungs- und Inbetriebnahmephase sowie aus der Betriebsphase integriert, um mithilfe dieser Lebenszyklusinformationen eine zusätzliche Wertschöpfung oder Effizienzsteigerung des Systems bzw. der Komponenten zu ermöglichen [Gerhard 2017].

Die Repräsentation eines mechatronischen Objektes und die Speicherung der dazu notwendigen Informationen sind in der Vision zur *I4.0* fester Konzept-Bestandteil als sogenannte *Industrie-4.0-Komponente* (siehe [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]). Daher

wird im folgenden Abschnitt 2.2.5 auf das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente* eingegangen, insbesondere auf die zugehörige Verwaltungsschale und die Bedeutung für die Methode Wiederverwendung herausgestellt. Des Weiteren werden in der Vision *I4.0* Anforderungen an die Informationshaltung über die gesamten Lebensphasen eines Objektes gestellt. Dieser Aspekt ist besonders hilfreich für die Etablierung der Wiederverwendung. Deshalb wird darauf im folgenden Abschnitt eingegangen.

2.2.5 Verwaltungsschale einer Industrie-4.0-Komponente

Zunächst erfolgt eine Einführung in die Vision *I4.0*, um den Kontext aus dem das Modell der *Industrie-4.0-Komponente* (*I4.0-Komponente*) entstand, zu verstehen. Die *I4.0* hat zum Ziel, den steigenden Anforderungen an die industrielle Produktion hinsichtlich Flexibilität, schneller Wandlungsfähigkeit gerecht zu werden und mit schneller Reaktion auf Kundennachfragen zu reagieren. Diese Anforderungen werden adressiert durch optimierte Wertschöpfungsketten mit vertikaler Integration, d. h. Vernetzung von Ressourcen eines Produktionssystems, durch horizontaler Integration, d. h. Vernetzung von Wertschöpfungsnetzwerken sowie durch Datendurchgängigkeit und -verfügbarkeit über den gesamten Lebenszyklus. Die Kommunikationsfähigkeit und Vernetzung untereinander gilt für alle Produktionsressourcen als auch für jedes gefertigte Produkt [acatech 2013]. Vertiefte Informationen zur *I4.0*, deren Zielen und der Umsetzung sind zu finden in [acatech 2013], [Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser 2014], [Plattform Industrie 4.0 2015]. Neben der *Industrie-4.0-Initiative* im deutschsprachigen Raum gibt es international ähnliche Initiativen unter anderem Namen (siehe [Manzei, Schlepner und Heinze 2016]).

Die *Industrie-4.0-Komponenten* nehmen eine wichtige Rolle zur Realisierung der Vision *I4.0* ein. Sie bringt einen physischen Gegenstand mit seinen ihn beschreibenden Informationen zusammen (siehe mechatronisches Objekt in Abschnitt 2.2.4). In der Abbildung 24 wird die Kombination aus einem Gegenstand und seinen Informationen schematisch dargestellt. Die *I4.0-Komponente* ist ein technisches Grundlagenkonzept für die Realisierung von Cyber-Physischen Objekten (CPS), indem die *I4.0-Komponenten* im operativen Betrieb miteinander kommunizieren und untereinander interagieren [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015], [Plattform Industrie 4.0 2016].

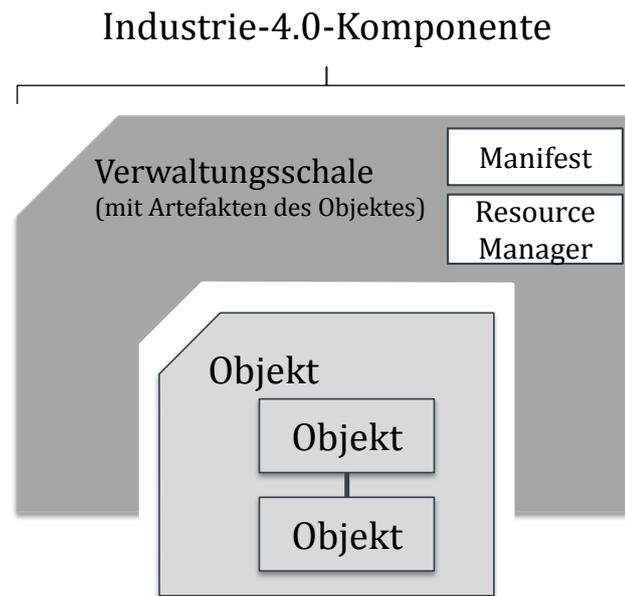


Abbildung 24: Modell einer Industrie-4.0-Komponente [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]

Die Informationen werden dabei auf der sogenannten Verwaltungsschale der *I4.0-Komponente* vorgehalten.

Eine zweite Anforderung an eine *I4.0-Komponente* ist die Kommunikationsfähigkeit, damit eine Vernetzung zwischen den anderen Ressourcen im Wertschöpfungsnetzwerk möglich ist. Das gilt für den Empfang von Informationen sowie für das Senden [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]. Das Modell der Verwaltungsschale ist demnach ein Operationalisierungsansatz des mechatronischen Objektes aus Abschnitt 2.2.4 zur Optimierung von realen Wertschöpfungsprozessen durch Integration und Vernetzung der Objekte bzw. Komponenten.

Neu ist hier der Anspruch u. a. an die Informationsverfügbarkeit, -güte und -aktualität. Es sollen alle relevanten Informationen einer *I4.0-Komponente* über ihren gesamten Lebenszyklus gesammelt, verfügbar sowie bei Bedarf aktualisiert werden können (siehe Abbildung 25) [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015].

Die Verwaltungsschale und damit die Informationen müssen nicht auf dem Gegenstand selbst lokalisiert sein, sondern können räumlich getrennt, z. B. in einer Bibliothek (engl. repository), vorliegen. Entscheidend ist die Anforderung, dass alle relevanten Informationen über den Lebenszyklus in der Verwaltungsschale vorhanden sind, d. h. von der Entwurfsphase bis hin zum End-of-Life.

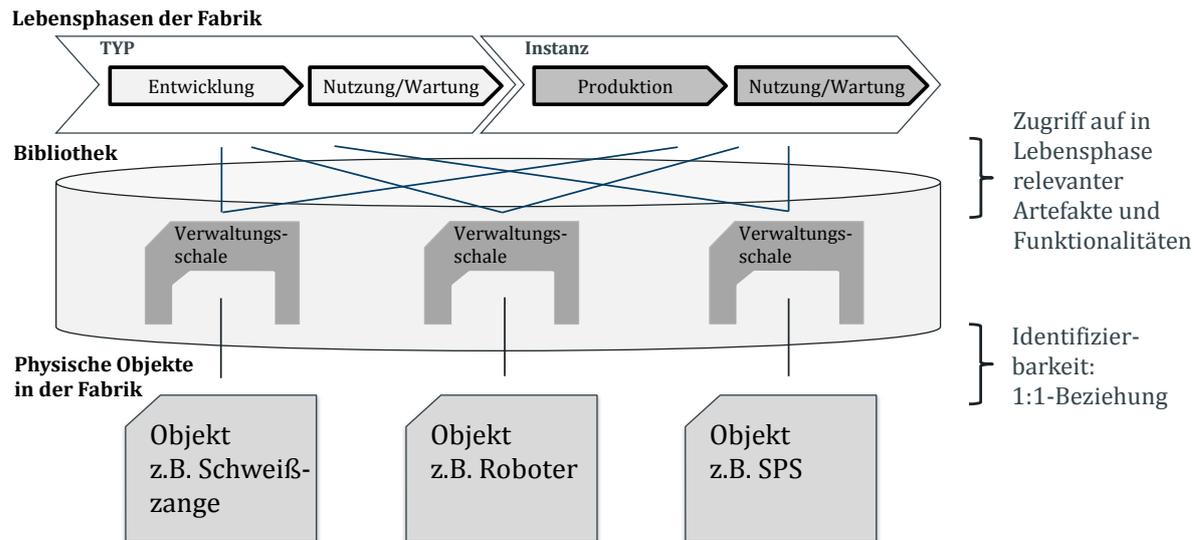


Abbildung 25: Modell der räumlich getrennten *I4.0-Verwaltungsschale* mit relevanten Lebenszyklusdaten [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]

In dieser Arbeit liegt der Fokus dabei auf der Wiederverwendung der Artefakte, die während des Anlagenentwurfes entstehen bzw. für diesen notwendig sind. Daher wird die Nutzungsphase eines Gegenstandes nicht betrachtet. Die detaillierte Beschreibung der Entwurfsphasen erfolgte in den Abschnitten 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, und 2.1.6.

Der nächste Abschnitt 2.2.6 gibt eine Übersicht über vorhandene Ansätze zur Wiederverwendung dieser Informationen über mechatronische Objekte während des Anlagenentwurfsprozesses. Dies können sowohl Konzepte zur Identifikation von Einheiten sein als auch die prozessuale Operationalisierung in Unternehmen, speziell die Verwendung in konkreten Projekten.

2.2.6 Konzepte zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf

Die identifizierten Konzepte beinhalten je nach Zielsetzung und Detaillierung unterschiedliche Aspekte, die in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.6 beschrieben worden sind (siehe Tabelle 6)

Tabelle 6: Identifizierte Ansätze zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf unter Einbeziehung der Ergebnisse aus [Schröck 2016]

Ansatz	Zielsetzung	Branche	Technischer Fokus	Quelle
Hady	Planen mithilfe von Lösungsbibliotheken	Prozessindustrie	hoch	[Hady 2013]
Jazdi et al.	Lösungsbibliothek durch projektunabhängigen Entwurf	Industrie allgemein	hoch	[Jazdi et al. 2010]
Obst, Urbas	Effizienzsteigerung im Entwurf durch wiederverwendbare Module	Prozessindustrie	hoch	[Obst und Urbas 2012]
Schuh et al.	Wandelbarkeit über ganzheitliche, modulare Fabrikplanung	Industrielle Fertigungsunternehmen	gering	[Schuh et al. 2003]
Waltl, Wildemann	Standardisierung und Wandelbarkeit über modulare Fabrikplanung	Automobilindustrie	mittel	[Waltl und Wildemann 2014]
Schröck	Wiederverwendung von Artefakten im mechatronischen Anlagenentwurf	Prozessindustrie	hoch	[Schröck 2016]
Kiefer	Verbesserter Entwurf mit mechatronischen Objekten und zugehörigen Informationen	Automobilindustrie	hoch	[Kiefer 2007]
Döbele	Wiederverwendung von Planungsergebnissen	Automatisierungstechnik, Automobilindustrie	hoch	[Döbele 2009], [Döbele 2010]
Klein	Modulwiederverwendung in der frühen Entwurfsphase	Anlagenbau allgemein	hoch	[Klein 2014]
Gepp	Effizienzsteigerung im Entwurf durch von Standardisierung und prozessuale Umsetzung	Anlagenbau allgemein	gering	[Gepp 2014]
Himmler	Verbesserte Wiederverwendung im Entwurf durch funktionsorientierte Module und Einsatz von AutomationML	Industrielle Fabrikplanung	hoch	[Himmler 2015]
Vogel-Heuser et al.	Produktlinienansatz zur Steigerung der Wiederverwendbarkeit	Anlagenbau allgemein	hoch	[Vogel-Heuser et al. 2015]
Köhlein et al.	Verbesserter Entwurf, u. a. Wiederverwendung durch mechatronische Objekte“	Anlagenbau allgemein	hoch	[Köhlein et al. 2012]
Thramboulidis	Wiederverwendung durch Konzept „Mechatronic Component“	Anlagenbau allgemein	hoch	[Thramboulidis 2008]

Viele Ansätze sind für spezielle Branchen oder Anwendungsfelder entwickelt und dort validiert worden. Konzepte für die Prozessindustrie sind [Schröck 2016], [Hady 2013],

für die Automobilindustrie [Kiefer 2007], [Waltl und Wildemann 2014], [Döbele 2010] und für die Automatisierungstechnik [Obst und Urbas 2012]. Die meisten Ansätze haben einen sehr technischen Fokus und identifizieren Module einer Hierarchieebene (Granularität), die bestmöglich in der jeweiligen Disziplin wiederverwendbar sind. Die Abhängigkeit der Wiederverwendung von den Phasen des Anlagenentwurfes ist kaum berücksichtigt, da die Konzepte nicht den gesamten Entwurfsprozess berücksichtigen, sondern meistens die Konstruktionsphase unterstützen, speziell die Realisierung von Objekten hoher Granularität.

Bei [Schuh et al. 2003] und [Waltl und Wildemann 2014] ist der Betrachtungsumfang neben den technischen auch auf organisatorische und prozessuale Aspekte der Wiederverwendung erweitert. Dafür sind die Konzepte allgemeiner gehalten und geben eine grundsätzliche Systematisierung der Module vor. Der Fokus liegt nicht auf der technischen Modulfindung und der Phase der Konstruktion, sondern der allgemeinen Vorteilhaftigkeit von Modularisierung.

Die Konzepte und Ansätze zur Wiederverwendung physischer Objekte mit hohem technischen Fokus setzen auf mechatronische Ansätze bei [Thramboulidis 2008] und [Vogel-Heuser et al. 2015]. Zusätzlich wird bei [Schröck 2016], [Hady 2013], [Himmler 2015], [Klein 2014], [Obst und Urbas 2012] und [Kiefer 2007] auf die Wiederverwendung mithilfe unterschiedlicher Sichtweisen auf Informationen von mechatronischen Einheiten (vgl. Abbildung 12, Abschnitt 2.1.4) eingegangen. In [Döbele 2010] liegt der Fokus auf der projektübergreifenden Wiederverwendung von Planungsinformationen für die Erstellung von Lastenheften während der Grob- und Detailplanung, speziell für die Automatisierungstechnik von mechatronischen Objekten.

In [Jazdi et al. 2010] liegt der Fokus ebenfalls nicht auf der Technik, sondern auf der Gestaltung eines systematischen Prozesses zur Erstellung von wiederverwendbaren Artefakten unter Verwendung eines projektunabhängigen Entwurfes (Domain Engineering) nach *VDI 3695* [VDI und VDE 2010c]. Der Ansatz ist für das allgemeine industrielle Lösungsgeschäft entworfen worden und nicht auf die Anwendbarkeit in bestimmten Branchen oder Disziplinen beschränkt. In [Vogel-Heuser et al. 2015] wird dieser prozessuale Ansatz des projektabhängigen und -unabhängigen Entwurfsprozesses aufgegriffen mit

dem Ziel, möglichst gut wiederverwendbare Einheiten im projektunabhängigen Entwurf zu gestalten. Dazu wird der Produktlinienansatz genutzt inkl. unterstützender Methoden, um Einheiten zu entwerfen, die projektübergreifend möglichst viele Kundenanforderungen erfüllen. In [Maga, Jazdi und Göhner 2011] werden auf Basis des allgemeinen Vorgehens aus [Jazdi et al. 2010] die notwendigen Hierarchieebenen (siehe Abschnitt 2.2.7) diskutiert. Die Autoren kommen zu der Erkenntnis, dass wiederverwendbare Artefakte auf mehreren Hierarchiestufen vorhanden sein müssen, damit sie sinnvoll für die heterogenen Teilaufgaben im Entwurfsprozess eingesetzt werden können. Die Hierarchieebenen seien von entscheidender Bedeutung bei der Wiederverwendung insbesondere im Zusammenspiel vom projektunabhängigen und projektabhängigen Entwurf.

Nach den Abschnitten 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5 und dem aktuellen ist weiterhin ungeklärt, auf welcher Hierarchieebene gut wiederverwendbare Einheiten (bzw. Artefakte, *14.0-Komponenten*) vorhanden sind, die speziell in der Produktionsplanung der Automobilindustrie genutzt werden können und die hier gegebenen Anforderungen berücksichtigen. In [Maga, Jazdi und Göhner 2011] wird aber gerade dieser Aspekt als sehr bedeutend für die Wiederverwendbarkeit hervorgehoben. Daher werden im folgenden Abschnitt 2.2.7 Hierarchieebenen von Produktionssystemen vorgestellt, nach denen die mechatronischen Komponenten einer Produktion gruppiert und hierarchisiert werden können, um relevante Ebenen zu identifizieren.

2.2.7 Hierarchien eines Produktionssystems

Es gibt zahlreiche Einteilungen zur Hierarchisierung von physischen Objekten eines Produktionssystems, hier Strukturmodelle genannt. In der folgenden Tabelle 7 sind einige Strukturmodelle aufgelistet, deren Kontext bzw. Zielsetzung beschrieben wird. Es wird eine Aussage über die Ebenen getroffen, die jeweils besonders ausdetailliert sind. Höhere Ebenen sind diejenigen, die Einheiten geringer Granularität umfassen, z. B. Produktionsnetzwerk, Standort, Fertigungssegment; untere Ebenen umfassen im Gegensatz dazu kleine mechatronische, mechanische, elektrische, informationstechnische Einheiten wie Schweißzangen, SPS, Greifer, also Einheiten mit hoher Granularität.

Je nach Sichtweise werden von den Autoren unterschiedliche Schwerpunkte der Detaillierung gewählt. Liegt der Schwerpunkt auf der Konstruktion, wie bei Kiefer, werden die unteren Hierarchieebenen sehr fein untergliedert. Ist die Zielsetzung die Wandelbarkeit einer Fabrik, werden die unteren Ebenen zu einer oder wenigen Ebenen aggregiert oder weggelassen, dafür werden hohe Ebenen feiner gegliedert. Die Ebenenanzahl bewegt sich in einem Intervall von vier bis sieben Ebenen.

Tabelle 7: Ausgewählte bestehende Modelle für die Hierarchisierung physischer Ressourcen innerhalb eines Produktionssystems

Modell	Zielsetzung/Kontext	Anzahl der Ebenen	Schwerpunkt der Detaillierung	Quelle
Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)	Automatisierung	7	Keiner (gleichmäßig Detaillierung)	[VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]
Nyhuis	Produktionsorganisation, Räumliche Sichtweise	7	Obere bis mittlere Ebene	[Nyhuis, Kolakowski und Heger 2005]
Waltl, Wildemann	Produktionsorganisation, gewerkeübergreifende Baukästen für Automobilhersteller	5	Mittlere Ebenen	[Waltl und Wildemann 2014]
Schuh	Wandelbare Fabrik, Abkopplung von Wandlungstreibern durch Module von Prozessen, Ressourcen und Organisation	4	Mittlere Ebenen	[Schuh et al. 2003]
Westkämper	Wandelbare Fabrik, Ressourcensicht	7	Obere Ebenen	[Westkämper 2006]
Kiefer	Entwurf mechatronischer Objekte, Aufbau einer Bibliothek	6	Untere Ebenen	[Kiefer 2007]
Namur	Entwurf verfahrenstechnischer Anlagen, funktionsorientiert	5	Untere Ebenen	[NAMUR 2003]
IEC 62264-1/ ISA-95 IEC 61512-1/ ISA-88 ISA-106	Automatisierung Leitsysteme, Prozessleittechnik Batchfertigung (61512/88) Betriebsleittechnik (95), kontinuierliche Prozesse (106)	ISA-95/ IEC 62264-1:5 IEC 61512/ ISA-88:7 ISA-106:7	IEC 62264-1/ ISA-95: Hohe bis mittlere Ebenen IEC 61512-1/ ISA-88: mittlere bis untere Ebenen ISA-106: keiner	[IEC 2013], [IEC 1997], [ISA 2000], [ISA 2013]

Die genauen Bezeichnungen der Ebenen weichen voneinander ab und sind zum Teil spezifisch auf eine Branche zugeschnitten, z. B. für die Verfahrenstechnik. Für die Wiederver-

wendung von mechatronischen Objekten bzw. Komponenten im automobilen Anlagenentwurf sind insbesondere zwei Modelle entwickelt worden, das Modell von *Kiefer* für kleine mechatronische Objekte und das Modell von *Waltl, Wildemann* für große mechatronische Objekte. Eine eindeutige Festlegung auf welcher Ebene sich genau gut wiederverwendbare Objekte befinden, ist den Modellen nur für gewisse Entwurfsphasen zu entnehmen. Bei *Kiefer* ist die passende Ebene für die Phase des Detailentwurfs untersucht, bei *Wildemann* sind grundsätzlich relevante Ebenen angegeben, aber keinen Entwurfsphasen zugeordnet worden. In [Maga, Jazdi und Göhner 2011] wird beschrieben, dass mehrere Hierarchieebenen für die Wiederverwendung von unterschiedlichen Artefakten in unterschiedlichen Entwurfsphasen und Disziplinen notwendig seien.

Das *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)* adressiert diese Anforderung mit der Ergänzung einer weiteren Dimension, indem es die Hierarchieebenen mit den Lebensphasen von Komponenten in Abhängigkeit setzt (siehe Abbildung 26) (siehe [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]).

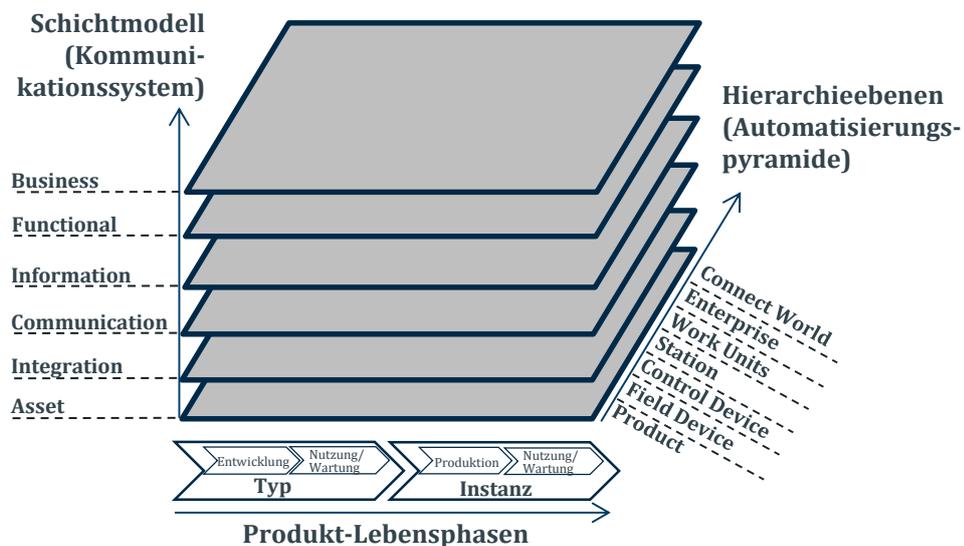


Abbildung 26: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) [VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015]

Je nach Lebensphase könnte sich demnach die Hierarchieebene von Komponenten und deren relevanten Informationen ändern. Diese Erweiterung der Dimension hat Auswirkungen auf die Methode Wiederverwendung. Es ist ungeklärt, inwiefern Objekte unterschiedlicher Hierarchieebene, zu unterschiedlichem Zeitpunkt, mit unterschiedlichen Informationen vorliegen und wie diese Informationen zur Repräsentation mechatronischer

Objekte sinnvoll wiederverwendet werden können. Aus dem *RAMI4.0* und der Ausführung in [Maga, Jazdi und Göhner 2011] lässt sich eine wissenschaftliche und praktische Relevanz für Untersuchung der Wiederverwendung im Anlagenentwurf in Abhängigkeit von den Hierarchieebenen der Objekte und den Entwurfsphasen inkl. der beinhaltenden Entwurfsaktivitäten ableiten.

2.2.8 Offene Fragen im Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf

In diesem Abschnitt werden die offenen Fragestellungen mit Bezug zur Forschungsfrage dieser Dissertation aufgelistet, die dem Themenkomplex Informationsflüsse in der *14.0* zugeordnet werden können und deshalb auf dem dortigen, aktuellen Stand der Wissenschaft aufsetzen.

Die offenen Fragestellungen sind im Einzelnen (siehe Tabelle 8):

Tabelle 8: Übersicht über offene Fragestellungen im Themenkomplex Wiederverwendung im Anlagenentwurf

Fragestellung	Beantwortung durch	Abgeleitet aus Abschnitt
Welche Hierarchieebenen sind für die Ablage von wiederverwendbaren Artefakten für den Anlagenentwurf relevant?	Erstellung und Validierung einer sinnvollen, gewerkeübergreifenden Produktionssystemstruktur	2.2.4, 2.2.5, 2.2.7
Zu welchen Zeitpunkten im Entwurfsprozess werden Objektinformationen zugehöriger Objekte welcher Hierarchiestufe benötigt?	Zuordnung der ermittelten Artefakte zu Hierarchiestufen und Zuordnung der Verwendungszeitpunkte aus der Prozessanalyse	2.2.3, 2.2.4, 2.2.5, 2.2.6, 2.2.7
Welche Informationen sind je Hierarchieebene für die <i>14.0-Komponente</i> aus Sicht des Anlagenentwurfes relevant?	Auswertung der Zuordnung von Artefakten zu Hierarchiestufen und Analyse der Artefakte einer Ebene	2.1.3, 2.1.5, 2.1.6, 2.2.4, 2.2.7
Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen den Informationen/Artefakten auf einer Hierarchiestufe?	Darstellen der Abhängigkeitspfade zwischen Artefakten	2.1.4, 2.1.5, 2.2.4, 2.2.5
Wie kann der Abdeckungsgrad ermittelt werden bei komplexen mechatronischen Systemen?	Auswertung der standardisierten Elemente eines Systems und Sichtbarmachen des ungenutzten Potenzials	2.2.1, 2.2.2

Welche besonderen Anforderungen an die Wiederverwendung im Anlagenentwurf gibt es bei Automobilherstellern?	Analyse der Anlagenentwurfsprozesses und der Stakeholder	2.1.2, 2.1.3, 2.2.6
Wie kann die Wiederverwendung im Untersuchungsrahmen mit digitalen Systemen unterstützt werden?	Entwicklung einer Systemlösung zur anwendungsgerechten Informationsbereitstellung	2.1.5, 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4, 2.2.5

3 Forschungsbedarf

Nachdem die Motivation für diese Arbeit in Kapitel 1 und der Stand der Wissenschaft im Kapitel 2 geschildert wurde, einschließlich offener Fragestellungen in den Abschnitten 2.1.7 und 2.2.8, wird nun im Kapitel 3 darauf aufbauend der Forschungsbedarf herausgearbeitet. Darauf basierend werden Forschungsfragen formuliert, die innerhalb eines definierten Forschungsrahmens untersucht werden. Dieser Forschungsrahmen wird in Unterkapitel 3.2 abgegrenzt. In Unterkapitel 3.3 werden die Forschungsfragen neben dem Aufbau der Arbeit (Unterkapitel 1.2) um das eingesetzte formale Forschungsvorgehen ergänzt, das zur Ausdetaillierung des Lösungskonzeptes in Kapitel 5 eingesetzt wird. Zudem wird der Aufbau der Kapitel 4 und 5 detailliert dargestellt, um die Entstehung des Lösungskonzeptes logisch nachvollziehen zu können, bevor die Validierung in Kapitel 6 erfolgen wird.

3.1 Lücke und Forschungsfragen

Die grundsätzliche Zielsetzung dieser Arbeit ist die Etablierung einer systematischen, projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurfsprozess bei Automobilherstellern, speziell dem Karosseriebauentwurf. Diese Zielsetzung wurde in Kapitel 1 unter anderem dadurch begründet, dass große Automobilhersteller ihre Produkte in vielen Fabriken weltweit fertigen, die Investitionen in Fertigungsanlagen vor allem im Karosseriebau hoch sind und die Fabrikneuplanung oder -umplanung mit jedem neuen Modell alle fünf bis sieben Jahre erfolgt (vgl. [Volkswagen Classic o. j.]). Die Methode „Wiederverwendung im Anlagenentwurf“ nach *VDI 3695* als Hebel zur Effizienzsteigerung und deren Einsatz bei Automobilherstellern erscheint aufgrund der vielen durchzuführenden Produktionsplanungen in diesem Umfeld mit entsprechend hohen Investitionen vielversprechend. Eine projektübergreifende Bereitstellung und Wiederverwendung von Entwurfsartefakten ist potenziell möglich und sinnvoll. In der *VDI-Richtlinie 3695* werden alle notwendigen korrelierenden Aspekte mit den jeweiligen Zielzuständen angegeben (siehe Abschnitt 2.2.2).

In [Jazdi et al. 2010] ist die systematische Verankerung der Wiederverwendung nach VDI 3695 für das industrielle Lösungsgeschäft ebenfalls als vielversprechender Ansatz beschrieben. Für die Entwicklung eines solchen Konzeptes und die effektive Umsetzung sind in [Maga, Jazdi und Göhner 2011] praxisrelevante Anforderungen mit abgeleiteten Umsetzungsempfehlungen gegeben (siehe Tabelle 9), die sich mit den herausgearbeiteten offenen Fragestellungen in den Abschnitte 2.1.7 und 2.2.8 gut decken.

Tabelle 9: Praxisrelevante Anforderungen und Umsetzungsempfehlungen für die systematische Wiederverwendung im Entwurfsprozess in Anlehnung an [Maga, Jazdi und Göhner 2011]

Nr.	Problem	Problem entsteht durch bzw. führt zu	Anforderungen für die praktische Konzeptionierung und Realisierung
1	Unterschiedliche Zielsetzungen in beteiligten Disziplinen, unterschiedliche Anforderungen	Unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Umsetzung, unterschiedliche Fokussierung	Detaillierte Konzepte ausarbeiten Modulare Konzepte ausarbeiten
2	Verschiedene Hierarchieebenen eines Produktionssystems für die Wiederverwendung notwendig	Beteiligte Disziplinen sowie unterschiedliche Entwurfsphasen benötigen unterschiedliche Granularitätsebenen	Hierarchische, geschachtelte Modelle entwickeln
3	Unterschiedliche Hierarchieebenen im projektunabhängigen und projektabhängigen Entwurf	Unklare, ungesteuerte Nutzung der Artefakte verschiedener Hierarchiestufen	Abhängigkeiten zwischen Granularitätsebenen im projektunabhängigen und projektabhängigen Entwurf analysieren
4	Diskrepanz zwischen Wiederverwendungskonzepten in Bezug auf die Granularitätsebenen	Unabgestimmte, losgelöste Konzepte	Verbindung zwischen Wiederverwendungskonzepten gleicher Granularitätsebene herstellen
5	Unzureichende Dokumentation	Fehlende oder unvollständige Dokumentation	Bereitstellen einer genauen Beschreibung der Ausgestaltung und der Anpassungsmöglichkeiten; Beschreibung der Funktionalität und der Schnittstellen; Bereitstellen einer Suchmöglichkeit nach wiederverwendbaren Artefakten
6	Unzureichende Anwendbarkeit, da Anforderungen der Automobilindustrie nicht berücksichtigt worden sind	Konzepte werden nicht genutzt	Produkt- und Produktionsplanungsprozesse analysieren und Anforderungen berücksichtigen

Für die Konzeptionierung einer systematischen Wiederverwendung im Anlagenentwurfsprozess von Automobilherstellern wird in dieser Arbeit als Forschungsvorgehen die anwendungsorientierte Wissenschaft nach *Ulrich* (siehe Abschnitt 1.2) genutzt. Das Forschungskriterium bildet die Problemlösungskraft von Modellen und Regeln in der Praxis, vgl. [Ulrich 1981], [Ulrich 1982]. Dieser Praxisnutzen als Forschungsziel

deckt sich mit den hier gesetzten Zielen. Die in der Tabelle 9 aufgelisteten Anforderungen sollten in den vorhandenen Wiederverwendungskonzepten (Abschnitt 2.2.6) und in den Produktionssystemstrukturen (Abschnitt 2.2.7) vollständig berücksichtigt sein. Nur dann wäre ein vorhandenes Konzept vollständig und unverändert bei Automobilherstellern anwendbar.

Die vorhandenen Konzepte werden daher hinsichtlich der Berücksichtigung der Anforderungen nach [Maga, Jazdi und Göhner 2011] im Kontext des Entwurfsprozesses bei Automobilherstellern bewertet. Aus dem Erfüllungsgrad der fünf Anforderungen werden anschließend Forschungslücken identifiziert. Die Tabelle 10 zeigt das Ergebnis der Auswertung.

Tabelle 10: Erfüllungsgrad der Anforderungen an ein Wiederverwendungskonzept im industriellen Lösungsgeschäft

Konzept nach	Anforderung 1	Anforderung 2	Anforderung 3	Anforderung 4	Anforderung 5	Anforderung 6
Hady	●	◐	◐	◐	●	○
Jazdi et al.	◐	○	◐	○	○	◐
Obst, Urbas	●	◐	○	○	◐	○
Himmler	◐	○	◐	○	●	◐
Schuh et al.	◐	◐	○	●	○	◐
Waltl, Wildemann	◐	◐	○	◐	◐	●
Schröck	●	◐	◐	◐	●	○
Kiefer	●	◐	◐	◐	◐	●
Döbele	◐	◐	○	○	●	●
Klein	●	○	○	○	●	◐
Gepp	●	○	○	○	○	◐
Vogel-Heuser et al.	●	○	○	○	●	◐
Köhlein et al.	●	○	○	○	●	◐
Thramboulidis	●	○	○	○	●	◐

○ nicht erfüllt

◐ kaum erfüllt

◐ teilweise erfüllt

◐ fast vollständig erfüllt

● vollständig erfüllt

Die Konzepte sind zum größten Teil sehr detailliert ausgearbeitet und durch praktische Anwendungsfälle validiert worden. Die Anforderung 1 ist für die Zielsetzungen der jeweiligen Arbeiten oft erfüllt, jedoch lassen sich die Konzepte nicht auf den in dieser Arbeit zu untersuchenden Anwendungsfall übertragen.

Die Anforderung 2 ist in vielen Konzepten wenig berücksichtigt, da sich entweder auf eine Ebene festgelegt worden ist oder ganz bestimmte Ebenen fokussiert worden sind, andere jedoch entfallen sind. Eine besondere Herausforderung im Automobilsektor ist zudem das Vorhandensein der vier Fertigungsgewerke, die in den Hierarchieebenen berücksichtigt werden müssen und deren jeweilige Entwurfsprozesse beachtet werden müssen.

Die Anforderung 3 ist zwar in einigen Konzepten für den jeweiligen Industriezweig berücksichtigt worden, jedoch nicht für die Automobilindustrie unter Berücksichtigung ihrer Entwurfsprozesse und den dort zu entwerfenden Objekten bzw. Anlagen. Das Kriterium ist deshalb größtenteils unzureichend bzw. nicht erfüllt. Die branchenspezifischen Entwurfsprozesse müssen untersucht werden und die Ergebnisse Berücksichtigung finden. Die Untersuchung der relevanten Hierarchieebenen zwischen dem projektunabhängigen und dem projektabhängigen Entwurf und deren Beziehungen wurde bisher unzureichend berücksichtigt.

Die Anforderung 4 ist nur unzureichend berücksichtigt, da entweder eine Disziplin fokussiert worden ist oder die Wiederverwendung aus einer Granularitätsebene untersucht worden ist.

Die Anforderung 5 ist teilweise in den bestehenden Konzepten durch eine strukturierte Modulbibliothek mit Suchkriterien gelöst. Suchmöglichkeiten sind entweder Parameter oder die Funktionalität, um darüber die Eignung vorhandener Artefakte für den jeweiligen Anwendungsfall zu prüfen.

Die Berücksichtigung von Anforderung 6 und damit die Analyse der Anforderungen der Automobilindustrie sind in den bestehenden Modellen selten vorhanden, da die Konzepte eine andere Zielsetzung aufweisen. So sind viele Modelle für die Prozessindustrie oder die Automatisierungstechnik entwickelt worden, jedoch nicht auf die Automobilindustrie übertragen und validiert worden.

Für die Konzeptionierung einer systematischen Wiederverwendung im Anlagenentwurfprozess von Automobilherstellern weisen die vorhandenen Konzepte Forschungslücken auf, die vor einer erfolgreichen Realisierung in diesem automobilen Kontext gelöst werden müssen. Die Problemlösungskraft der Modelle ist in Folge dessen nicht hinreichend gegeben. Aus den nicht berücksichtigten Anforderungen, die eine Realisierung einschränken, lassen sich vier relevante Forschungsfragen ableiten.

Forschungsfrage 1:

Wie muss eine Bibliothek für wiederverwendbare Einheiten zur Unterstützung des Anlagenentwurfprozesses eines Karosseriebaus strukturiert sein?

Zur Berücksichtigung von Anforderungen 2, 3, 6 der Definition eines geeigneten Hierarchiemodells und der Analyse des spezifischen zu verbessernden Entwurfsprozesses sollen die notwendigen Hierarchiestufen für die Wiederverwendung untersucht werden. Dabei müssen die Entwurfsphasen und die Elemente des Produktionssystems der Automobilindustrie in das Lösungskonzept einfließen. Ziel der ersten Forschungsfrage soll es sein, ein strukturiertes Lösungskonzept zu entwerfen, in das sich alle wiederverwendbaren Einheiten für den Anlagenentwurf einsortieren lassen. Eine Basis bildet das *RAMI4.0* (Abbildung 26, Abschnitt 2.2.7), das im Kern Einheiten und die dazugehörigen Informationen strukturiert und wiederverwendbar gliedert. Es gilt hier eine anwendbare Struktur für die Wiederverwendung von Einheiten im Entwurf von Produktionssystemen des Automobilbaus abzuleiten.

Forschungsfrage 2:

Auf welcher Hierarchiestufe eines Produktionssystems befinden sich gut wiederverwendbare Einheiten für den Karosseriebauentwurf in Abhängigkeit der Entwurfsphase?

Nach der Definition eines geeigneten Strukturmodells und der damit verbundenen Gliederung des Lösungskonzeptes soll die zweite Forschungsfrage dazu dienen, Elemente innerhalb des Konzeptes zu identifizieren. Dies soll den Anforderungen 2 bis 4 und 6 gerecht werden, nach denen wiederverwendbare Einheiten unter besonderer Berücksichtigung des spezifischen Entwurfsprozesses und der notwendigen Hierarchieebenen geschaffen werden müssen. Durch die Lösung der Forschungsfrage entsteht ein Pfad mit wiederverwendbaren Einheiten innerhalb des Lösungskonzeptes in Abhängigkeit von der Granularität der Einheiten und der Entwurfsphase.

Forschungsfrage 3:

Welche Informationen sind für die *Verwaltungsschale* von *Industrie-4.0-Komponenten* relevant für die Wiederverwendung im Karosseriebauentwurf?

Für die Anforderung 5, der hinreichenden Dokumentation für eine praktische Verwendung der vorhandenen Artefakte, müssen die notwendigen Informationen analysiert werden. Die Gesamtheit bilden die Menge der relevanten Informationen für die *Verwaltungsschale* einer *I4.0-Komponente* für den Anwendungsfall der Informationswiederverwendung im Entwurfsprozess. Zugleich entstehen durch die Heterogenität der Informationen Anforderungen an die Werkzeugkette bzw. ein Werkzeug, speziell zur Unterstützung der Wiederverwendung bzgl. des Umganges mit Datenformaten und bzgl. des Datenaustausches. Durch Beantwortung dieser Forschungsfrage können Anforderungen an die digitalen Werkzeuge zur Realisierung der *Verwaltungsschale* abgeleitet werden sowie Anforderungen an unterstützende Suchwerkzeuge für die Wiederverwendung der Artefakte im Anlagenwurf der Automobilindustrie.

Forschungsfrage 4:

Inwieweit muss das Modell des *Domain-Engineerings* durch die besonderen Anforderungen des Karosseriebauentwurfes angepasst werden und welche Methoden unterstützen die Durchführung?

Das vorhandene *Domain-Engineering*-Konzept zur Durchführung der projektübergreifenden Wiederverwendung im industriellen Lösungsgeschäft muss die Anforderungen des Karosseriebauentwurfes berücksichtigen und gegebenenfalls angepasst werden, insbesondere wegen der Komplexität des entstehenden Produktes (Fabrik), der Komplexität des Entwurfsprozesses und der damit verbundenen mehrjährigen Prozessdauer.

Damit werden die Anforderungen 1, 5 und 6 berücksichtigt, speziell die Durchführbarkeit der systematischen, projektübergreifenden Wiederverwendung mit Fokus des Karosseriebauentwurfes durch Anpassung und Detaillierung des vorhandenen *Domain-Engineerings*-Konzeptes. Dabei sind häufig auftretende Projektprämissen im Untersuchungsumfeld als Anwendungsfälle zu formulieren und das Lösungskonzept in diesen Fällen auf Anwendbarkeit zu prüfen. So werden bei Neuplanungen, sogenannten Greenfield-Projekten, größere mechatronische Objekte entworfen als bei Integrationsprojekten, sogenannten Brownfield-Projekten, bei denen kleinere mechatronische Objekte ergänzt werden. Entsprechend ist das Konzept modular aufzubauen, um unterschiedlichen Szenarien mit den jeweiligen Fokussierungen zu genügen.

Des Weiteren erfordert die praktische Umsetzung der projektübergreifenden Wiederverwendung zusätzliche Aktivitäten, wie die Artefaktenauswahl, die durch für das untersuchte Umfeld geeignete Methoden unterstützt werden sollten. Diese Methoden müssen nicht neu entwickelt werden, sondern können ggf. aus vorhandenen Konzepten für andere Branchen oder Anwendungszusammenhänge neu zusammengestellt oder adaptiert werden. Diese Detailebene, auf denen zusätzliche, notwendige Aktivitäten mit spezifischen Methoden für die projektübergreifende Wiederverwendung vorhanden sind, ist im *Domain-Engineering*-Konzept nicht abgebildet, daher nicht näher spezifiziert und ist deshalb von Interesse für diese Arbeit als Erweiterung des bestehenden Konzeptes.

3.2 Untersuchungsrahmen

Die Forschungsfragen sind in einem geeigneten Untersuchungsrahmen zu erforschen und zu beantworten. Ein geeigneter Forschungsrahmen ist vorhanden, wenn die projektübergreifende Wiederverwendung im Anlagenentwurf der Automobilfertigung in diesem Rah-

men analysiert, konzipiert und realisiert werden kann. Insbesondere die Forschungsfragen müssen untersuchbar sein. Dazu muss der Untersuchungsrahmen folgendes beinhalten:

- Mehrere Entwurfsprojekte im Untersuchungszeitraum
- Parallele oder serielle Projekte für die Wiederverwendung von Artefakten untereinander
- Entwurfsprozesse für Automobilfertigungsanlagen, speziell Karosseriebauanlagen
- Abdeckung des vollständigen Anlagenentwurfsprozesses von Konzeptphase bis Inbetriebnahme der physisch realisierten Anlagen
- Die vier Fertigungsgewerke des Automobilbaus, da die zu definierenden Hierarchieebenen die Elemente aller Gewerke berücksichtigen sollten
- Nutzung spezifischer Entwurfs-Werkzeuge (*Digitale Fabrik*), einer Werkzeugkette, Arbeitsplatzrechner als Grundvoraussetzung für die Wiederverwendung entsprechend Anforderungen nach *VDI 3695* (siehe Abbildung 19, Abschnitt 2.2.2)

Unter Beachtung der Anforderungen an den Untersuchungsrahmen wurde ein großer Automobilhersteller (OEM) ausgewählt, der in vielen Märkten weltweit vertreten ist und mit den Produkten alle Fahrzeugsegmente (Segmente A bis J nach [Europäische Kommission EG 2002]) abdeckt. Die Untersuchungen wurden innerhalb eines Zeitraumes von drei Jahren durchgeführt. Innerhalb dieses dreijährigen Zeitraumes wurden dort fünf Produktionsplanungsprojekte für jeweils unterschiedliche Standorte identifiziert, die für eine Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurfsprozess als vielversprechend angesehen worden sind. Die Einstufung wurde aufgrund der eng beieinander liegenden Serienproduktionszeitpunkte (auch Start-of-Production, kurz: SOP), die innerhalb eines halben Jahres lagen, und eng verwandter Produkte getroffen, die ähnliche Plattformen besitzen und in denen Fahrzeugmodule gleichen Baukastens verwendet worden sind. Mehr Informationen zum Plattform-Begriff in der Automobilindustrie ist in [Ehrlenspiel et al. 2014] und in [Renner 2007] zu finden. An vier Standorten sollte der Karosseriebau für die Fertigung der neuen Produkte größtenteils umgeplant werden inkl. neuer Betriebsmittel, d. h. eine Freifläche in bestehenden oder neuzubauenden Hallen stand zur

Verfügung. Am fünften Standort sollte das neue Produkt in ein bestehendes Fabriklayout mit vorhandenen Anlagen integriert werden, d. h. die Halle bestand bereits, die bestehenden Anlagen sollten unter Ausnutzung ihrer Flexibilität und ihrer Wandelbarkeit so umgestaltet werden, dass das neue Produkt gefertigt werden konnte.

Neben dem Auftreten der Planungsprojekte war der Automobilhersteller bei allen fünf Projekten für den Anlagenentwurfsprozess verantwortlich, von der Konzeptphase bis hin zur Inbetriebnahme der physischen Betriebsmittel. Teilaufgaben konnten weiterhin an externe Firmen vergeben worden sein, jedoch lag die Verantwortung für das gesamte Projektmanagement beim Automobil-OEM. Die relevanten Entwurfsartefakte, die extern erzeugt worden sind, wurden dem OEM übergeben. Zusammen mit den intern erzeugten Artefakten war das Unternehmen folglich für die Ablage und Verwaltung verantwortlich.

Der OEM war neben der Planung und Realisierung einer Karosseriebaufertigung in den fünf Projekten auch für die Planung und Anpassung in den restlichen drei Fertigungswerken (Presswerk, Lackiererei, Montage) zuständig. Die notwendigen Objekte des Produktionssystems waren demnach bekannt und vorhanden, so dass eine gewerkeübergreifende Hierarchisierungsstruktur erarbeitet werden konnte.

Das Unternehmen brachte neben der Eignung der Projekte auch die Voraussetzungen für eine Wiederverwendung nach *VDI 3695* mit (siehe Abbildung 27). In dieser Abbildung sind die Zielzustände gekennzeichnet, die im Untersuchungsrahmen sicher erfüllt waren sowie diejenigen Zielzustände, die zumindest in Teilaspekten erfüllt waren.

Es ist ein projektspezifischer Entwurfsreferenzprozess definiert, es werden digitale Werkzeuge zur Unterstützung des Entwurfs benutzt, die digitalen Werkzeuge sind in der Werkzeugkette mit definiertem Ablauf miteinander prozessual verknüpft, größtenteils auch durch technische Schnittstellen. Im Zuge der Werkzeugverknüpfung sind geeignete Beschreibungssprachen und Datenformate eingeführt worden, die Vorgehensweisen basieren auf externen Standards oder sind in internen Regelwerken festgelegt. Im Aspekt des Vorgehensmodells für projektunabhängige Tätigkeiten sind Teilanforderungen erfüllt. Der Zielzustand A wird an späterer Stelle mithilfe der Ergebnisse dieser Arbeit hergestellt, durch ein hierarchisches Anlagenstrukturierungsmodell in Unterkapitel 4.2 und

durch das vorgestellte Vorgehen zur Wiederverwendung in Unterkapitel 5.2. Das Erreichen des Zielzustandes A war im Untersuchungsrahmen möglich. Diese Tatsache trug damit ebenfalls dazu bei, dass das ausgewählte Unternehmen einen geeigneten Untersuchungsrahmen für die Beantwortung der Forschungsfragen bot.

Aspekt	Aktivität	Zielzustände
Wiederverwendung	Methoden	
Vorgehensmodell für Projektstätigkeiten	Prozesse	
Vorgehensmodell für projektunabhängige Tätigkeiten	Prozesse	
Beschreibungssprachen	Methoden	
Arbeitsplatzrechner	Hilfsmittel	
Spezifische Engineering-Werkzeuge	Hilfsmittel	
Durchgängige Werkzeugketten	Hilfsmittel	
Mitarbeiterqualifikation	Aufbauorganisation	

-  Im Untersuchungsrahmen sicher erreichte Zielzustände.
-  Im Untersuchungsrahmen sind Teilaspekte dieses Zielzustandes erfüllt.

Abbildung 27: Erfüllte Zielstände im ausgewählten Untersuchungsrahmen nach VDI-Richtlinie 3695 (Darstellungsform in Anlehnung an [VDI und VDE 2010a])

Die Voraussetzungen für eine Wiederverwendung im Anlagenentwurf nach VDI 3695 waren somit gegeben, da die Vorbedingungen für das Erreichen der Zielzustände A-E im Aspekt der Wiederverwendung gegeben waren bzw. grundsätzlich erfüllbar waren.

Zusammenfassend bietet das ausgewählte Unternehmen einen geeigneten Untersuchungsrahmen zur Beantwortung der Forschungsfragen. Da es sich um einen großen Automobilhersteller handelt mit branchenüblichen Prozessen, ist davon auszugehen, dass

die spezifische Untersuchung und die Beantwortung der Forschungsfragen auch auf andere Unternehmen der Branche übertragbar sind. Das Unternehmen mit seinen Anlagenentwurfsprozessen dient in dieser Arbeit als exemplarisches Beispiel für die Branche und erfüllt alle Voraussetzungen für die Untersuchung. Eine ähnliche Untersuchung in einem weiteren Unternehmen der Branche wird deshalb als nicht mehrwertig angesehen, da das Umfeld vergleichbar wäre.

Zur Abgrenzung des Untersuchungsrahmens in Bezug auf die Entwurfsphasen und die möglichen Arten der Wiederverwendung soll die folgende Abbildung 28 dienen.

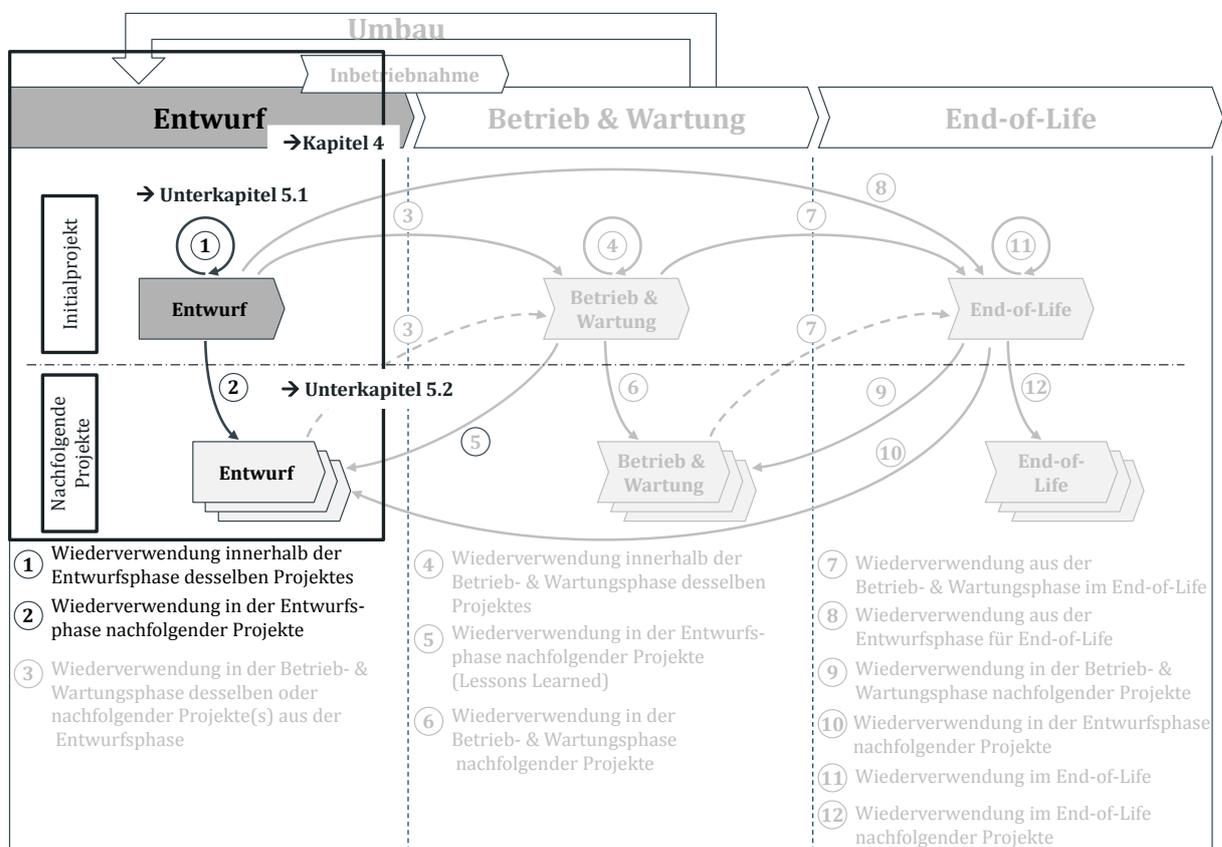


Abbildung 28: Referenzfälle der Wiederverwendung klassifiziert anhand unterschiedlicher Informationsflüsse, basierend auf [Lüder et al. 2017b]

Je nach Herkunft der Informationen eines Objektes, die wiederverwendet werden sollen, lassen sich Referenzfälle unterscheiden. In dieser Arbeit soll die Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf untersucht werden, die einem Entwurfsprozess entstammen (Referenzfälle 1 und 2). Das betrifft sowohl die Wiederverwendung innerhalb eines

Entwurfsprojektes als auch die projektübergreifende Wiederverwendung. Die Referenzfälle aus Abbildung 28 bilden einen Rahmen für die Untersuchungen und die Wahl der Anwendungsfälle zur Validierung des Lösungskonzeptes in Kapitel 6.

Als nächstes folgt die Erläuterung des Untersuchungsvorgehens zur Beantwortung der Forschungsfragen und die Auswahl zielführender Methoden.

3.3 Methodisches Vorgehen zur Konzeptionierung des Lösungskonzeptes

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden zwei Aktivitäten durchgeführt. Ausgehend von den Ansätzen von *Kiefer* und *Waltl, Wildemann*, die Entwurfs-Baukästen für den Entwurfsprozess in der Automobilindustrie konzeptioniert haben, und des *RAMI4.0* wird eine Strukturierung als Ausgangsbasis abgeleitet. Für die Definition der notwendigen Hierarchiestufen wurde eine Literaturanalyse (siehe Abschnitt 2.2.7) durchgeführt und Strukturmodelle der Automobilindustrie gesichtet. Basierend auf beiden Ergebnissen wird eine initiale Basisstrukturierung geschaffen. Die Einteilung der Lebensphasen und der Organisationseinheiten erfolgt auf analoge Art und Weise. Als Ergebnis ergibt sich eine mögliche Struktur für eine Entwurfsbibliothek (Kapitel 4).

Zur weiteren Analyse wird der Entwurfsprozess eines Karosseriebauprojektes im Untersuchungsrahmen mithilfe der *4D-Methode* nach [Schäffler et al. 2013] detailliert untersucht. Als Ergebnis sind die Aktivitäten des Entwurfes als Ablauf dargestellt, einschließlich benötigter Ressourcen, Werkzeuge und erzeugter sowie genutzter Artefakte. Basierend auf dieser Analyse in Verbindung mit dem Entwurfsreferenzprozess des untersuchten Unternehmens kann die Strukturierung der Bibliothek weiter detailliert werden.

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage werden die Referenzfälle 1 und 2 (Abbildung 28) unterschieden. Basis für die projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten sind solche, die innerhalb des ersten Projektes erzeugt werden. Daher werden zunächst die identifizierten Artefakte Objekten auf den verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet. Abschließend erfolgt die Einteilung nach Entwurfsphasen, um die Artefakte nach zwei Dimensionen zu klassifizieren. Als Ergebnis können die benötigten Artefakte

inkl. ihrer Datenformate, der notwendigen Werkzeuge und der Entstehungszeitpunkte sortiert werden. Nach Sammlung aller Ergebnisse lassen sich die notwendigen Hierarchieebenen für die Wiederverwendung innerhalb eines Projektes bestimmen. Innerhalb eines Projektes erfolgen in der Praxis oft Alternativplanungen auf Anlagenebene. Für die Wiederverwendung von Artefakten eines Entwurfsergebnisses sollen Gütekriterien für dieses Entwurfsergebnis bestimmt werden, mit deren Hilfe das beste vorhandene Entwurfsergebnis in Nachfolgeprojekten genutzt wird. Hier soll untersucht werden aufgrund welcher Kriterien eine Alternativauswahl erfolgt. Dazu werden ausgehend von Balance-Scorecard-Ansätzen unterschiedliche Sichtweisen auf den hier vorliegenden Anwendungsfall übertragen und für jede dieser Sichtweise relevante Kriterien abgeleitet, basierend auf den Ergebnissen aus [Reinhard 2015].

Als zweiter Schritt wird der Abdeckungsgrad der Wiederverwendung für eine Anlage durch Adaptierung der Methode aus [Hell 2015] bestimmt. Aus den Ergebnissen lässt sich die Aussage ableiten, welche Einheiten in einem Projekt wiederverwendet werden können und welche Einheiten jedes Mal neu zu entwerfen sind. Außerdem kann ungenutztes Standardisierungspotenzial erkannt werden, um so den Abdeckungsgrad zu erhöhen. Abgeleitet aus den sogenannten Prämissen der Fertigungskonzepte kann eine Aussage für die Auswahl der Artefakte zur Wiederverwendung getroffen werden. Die Durchführung der Wiederverwendung wird anschließend in den Entwurfsprozess des Unternehmens eingearbeitet.

Im weiteren Verlauf wird der Referenzprozess 2, die projektübergreifende Wiederverwendung, untersucht. Basierend auf den Ergebnissen der *4D-Analyse* lassen sich Erkenntnisse über die Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte zwischen zwei Projekten gewinnen und Anforderungen ableiten. Abschließend erfolgt die Konzeptionierung der notwendigen Dokumentation der Wiederverwendung, um die projektübergreifende Artefaktverwendung sicherzustellen und nachvollziehen zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse werden auf das *Domain-Engineering*-Modell übertragen. Auf diese Weise erfolgt eine Anpassung des Modells an die besonderen Anforderungen des automobilen Produktionssystementwurfes.

Die Anwendbarkeit des Lösungskonzeptes sowie der unterstützenden Methoden wird anhand von Fallstudien aus der Praxis geprüft.

Nach Klärung der Forschungslücken und der davon abgeleiteten Forschungsfragen wird nun in Kapitel 4 das initiale Lösungskonzept zur Beantwortung dieser Fragen entwickelt. In Kapitel 5 wird das Konzept weiter ausdetailliert sowie mit bekannten Methoden aus anderen Anwendungszusammenhängen zur Unterstützung der operativen Anwendung ergänzt. Diese Methoden werden für das Anwendungsgebiet sowie die Zielsetzung zusammengestellt sowie adaptiert.

4 Lösungskonzept zur Wiederverwendung von Artefakten im automobilen Anlagenentwurf

Im Kapitel 4 wird das grundsätzliche Lösungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen im Untersuchungsrahmen präsentiert. Dazu wird in Unterkapitel 4.1 die Abprungbasis für das Lösungskonzept in dieser Arbeit auf Basis des Standes der Wissenschaft dargelegt. Es folgt in Unterkapitel 4.2 die Ausdetaillierung der relevanten Hierarchieebenen des Produktionssystems für die Wiederverwendung von Artefakten im Entwurfsprozess. In Unterkapitel 4.3 werden die relevanten Phasen im Entwurfsprozess identifiziert, um den Einfluss der Lebensphase eines Produktionssystems auf die Wiederverwendung der zugehörigen Artefakte in der Folge näher untersuchen zu können. In Unterkapitel 4.4 werden die relevanten Organisationseinheiten im Untersuchungsrahmen identifiziert, die nach [Schuh et al. 2003] und [Walzl und Wildemann 2014] für die Wiederverwendung und Segmentierung der Artefakte sinnvoll sind. Das Kapitel schließt mit Unterkapitel 4.5 ab, in dem eine Zusammenfassung der Erkenntnisse gegeben wird.

Das Lösungskonzept aus Kapitel 4 wird anschließend für die Referenzfälle 1 (Wiederverwendung innerhalb eines Projektes) und 2 (projektübergreifende Wiederverwendung) (siehe Unterkapitel 3.2) im Kapitel 5 weiter ausdetailliert, um die jeweiligen Anforderungen zu berücksichtigen und um im Lösungskonzept relevante Inhalte zu identifizieren.

4.1 Allgemeine Abprungbasis

Das Lösungskonzept nutzt die bestehenden Ansätze und kombiniert die Erkenntnisse neu. Zugleich finden die Anforderungen nach [Maga, Jazdi und Göhner 2011] (siehe Unterkapitel 3.2) eine Berücksichtigung. So werden die Anwendbarkeit und die Nützlichkeit zur Lösung der Probleme im Untersuchungsrahmen sichergestellt. Die Anwendbarkeit und der Nutzen werden im Rahmen der Validierung in Kapitel 6 gezeigt.

Als Abprungbasis dienen Konzepte, die für die Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf für Automobilhersteller entwickelt worden sind und dort zur Anwendung kommen sowie die Inhalte der Vision zur *I4.0*. An erster Stelle sind hier die Konzepte von

[Waltl und Wildemann 2014] und von [Kiefer 2007] zu nennen (siehe Abschnitt 2.2.6), wobei in [Waltl und Wildemann 2014] die Komplexitätsreduktion bei der Wandelbarkeit des Produktionssystems im Fokus steht, mit entsprechend ortsbezogener Strukturierung (siehe Abschnitt 2.1.4), hingegen bei [Kiefer 2007] der Entwurf und die Wiederverwendung mechatronischer Einheiten (siehe Abschnitt 2.2.4) mit funktionsbezogener Strukturierung (siehe Abschnitt 2.1.4) fokussiert wird. Die Strukturierung von wiederverwendbaren Einheiten nach [Waltl und Wildemann 2014] ist in der Abbildung 29 dargestellt.

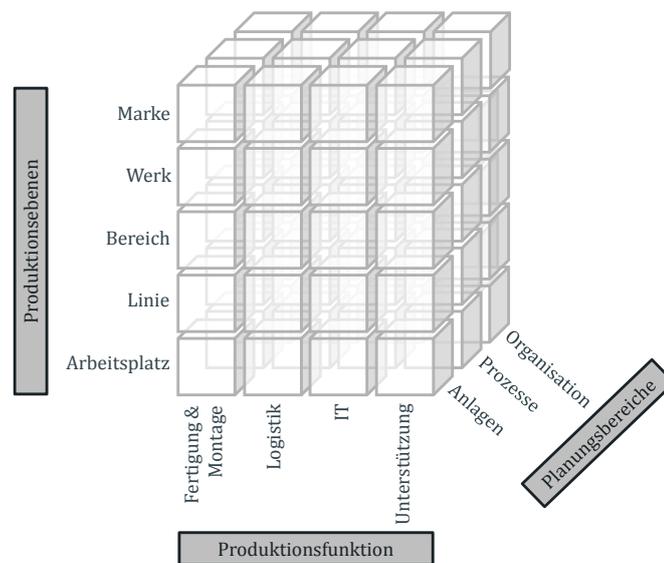


Abbildung 29: Modulare Fabrikarchitektur nach [Waltl und Wildemann 2014]

Das Modell in Abbildung 29 baut auf der Einteilung nach [Schuh et al. 2003] auf und enthält die drei Dimensionen Produktionsebenen (in dieser Arbeit Hierarchieebenen genannt), Produktionsfunktionen (auch Organisationseinheiten) und Planungsbereiche, in denen zwischen unterschiedlichen Aufgaben der Fabrikplanung unterschieden wird. Bei Kiefer [Kiefer 2007] sind die Hierarchieebenen deutlich detailliert definiert, vor allem auf Ebenen hoher Granularität (siehe Abbildung 30). Für den mechatronischen Entwurf mit samt der virtuellen Inbetriebnahme werden folglich weitere Hierarchieebenen benötigt. Keines der beiden Modelle betrachtet jedoch ganzheitlich den gesamten Entwurfsprozess und passt die notwendigen Hierarchieebenen daraufhin an.

Neben diesen beiden Ansätzen wird als Basis für das Lösungskonzept das *RAMI4.0* (siehe Abschnitt 2.2.7) der Vision zur *I4.0* genutzt. Dort wird nach drei Dimensionen strukturiert.

Interessant sind davon die zwei Dimensionen „Hierarchieebenen des Produktionssystems“ und „Lebensphasen“. Die dritte Dimension, die Strukturierung nach Funktionen des Informationsaustausches zur Sicherstellung der Kommunikationsfähigkeit der *Industrie-4.0-Komponenten*, soll hier nicht weiter verfolgt werden, da diese Dimension auf die Automatisierungstechnik während der Betriebsphase der Komponenten abzielt. In dieser Arbeit wird hingegen die Entwurfsphase untersucht. Die Strukturierung der Objekte nach Lebensphasen wird im *RAMI4.0* deutlicher betont als im Modell von *Waltl, Wildemann*. Eine Strukturierung nach Hierarchieebenen ist ebenfalls vorhanden, analog zu *Kiefer*.

Der Anspruch des *RAMI4.0* ist die Abbildung einer ganzheitlichen Referenzarchitektur. Der Betrachtungsraum enthält alle Lebensphasen eines Objektes mit den relevanten Informationen in ihrer *Verwaltungsschale* (siehe Abschnitt 2.2.5). Das Modell deckt folglich einen sehr großen Bereich ab. Das spiegelt sich ebenfalls in den dazu notwendigen sieben Hierarchieebenen wieder, die ein großes Intervall vom Produktionsnetzwerk bis hin zum Feldgerät abdecken. Der Fokus liegt hier auf Geräten der Automatisierungstechnik, die die unterste Ebene bilden. Bei *Kiefer* hingegen werden den beiden untersten Ebene ausschließlich mechanische Zusammenbauten und Einzelteile zugeordnet (siehe Abbildung 30).

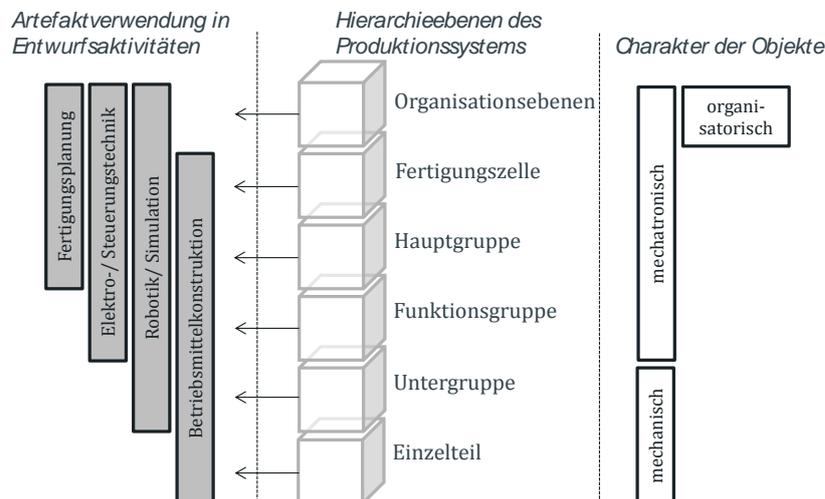


Abbildung 30: Strukturierung von Produktionsressourcen nach Kiefer [Kiefer 2007]

In dieser Arbeit wird die Wiederverwendung im mechatronischen Anlagenentwurf betrachtet. In den als Absprungbasis einbezogenen Konzepten und auch als Anforderung in

[Maga, Jazdi und Göhner 2011] formuliert, können als Kombination drei relevante Dimensionen der Strukturierung von Einheiten und ihrer Artefakte abgeleitet werden (siehe Abbildung 31).

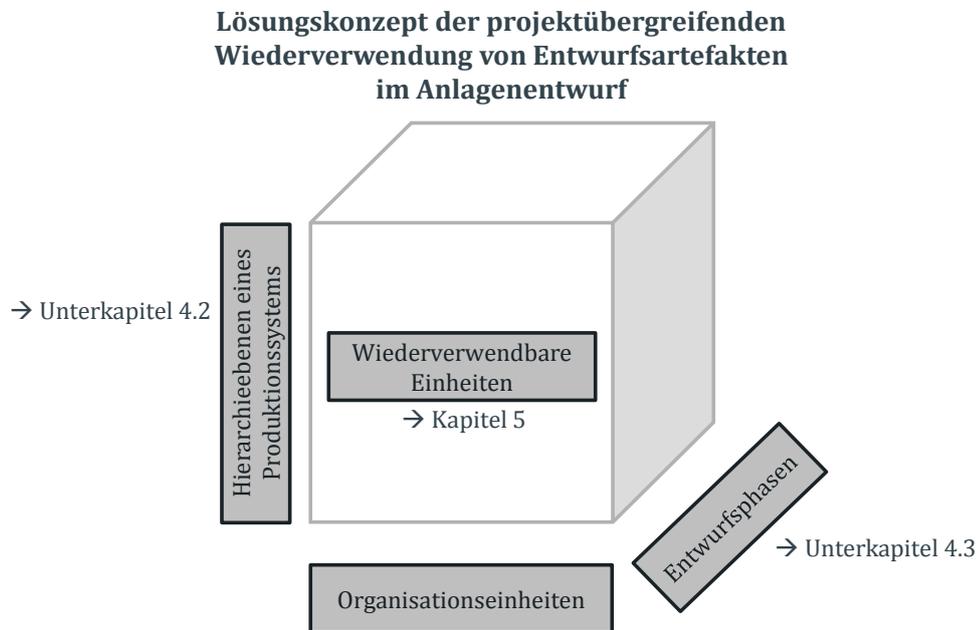


Abbildung 31: Abgeleitetes initiales Lösungskonzept als Ausgangspunkt für die weiterführenden Untersuchungen

Die Strukturierung in Abbildung 31 bildet das initiale Lösungskonzept dieser Arbeit. Innerhalb der drei Dimensionen sollen sinnvolle Artefakte zur Wiederverwendung im automobilen Anlagenentwurf identifiziert werden (Kapitel 5). Im weiteren Vorgehen werden die drei Dimensionen in den folgenden Abschnitten (siehe Abbildung 31) detailliert, der relevante Umfang definiert und sinnvolle Gliederungen festgelegt. Zur Detaillierung werden neben den Modellen, die die Absprungbasis bilden, weitere spezifische Modelle und Standards/Richtlinien einbezogen (siehe Abschnitte 2.1.6, 2.2.6 und 2.2.7).

Als Ergebnis entsteht ein strukturiertes Lösungskonzept, das für die Referenzfälle (siehe Abschnitt 3.2) untersucht, mit wiederverwendbaren Artefakten ausgestaltet werden kann und damit die Grundlage für die Beantwortung der Forschungsfragen bildet.

4.2 Relevante Hierarchieebenen des Produktionssystems

Zur Identifikation der relevanten Hierarchieebenen des Produktionssystems wurden neben den erwähnten Konzepten in Unterkapitel 4.1 weitere Hierarchiemodelle einbezogen (siehe Abschnitt 2.2.7). Neben der Charakterisierung der bestehenden Modelle (siehe Tabelle 7, Abschnitt 2.2.7) sind weitere Einteilungen möglich. Die bestehenden Modelle können in drei Gruppen entsprechend ihrer Zielsetzung eingeteilt werden. Die Zielsetzungen sind Fabrikplanung mit ortsbezogener Einteilung (siehe Abschnitt 2.1.4), Ressourcenplanung anhand aller zur Fertigung eines Produktes benötigten Funktionen mithilfe einer funktionsorientierten Hierarchisierung oder aus Automatisierungssicht zur Ausübung eines bestimmten Verhaltens einer physischen Komponente. Diese Klassifizierung erfolgte in [Lüder et al. 2017b]. Es bestehen bereits zahlreiche Modelle für die Hierarchisierung von physischen Objekten durch Modularität von Steuerungs- und Automatisierungsstrukturen. Die Definition aller Ebenen aus funktionsorientierter Sicht und die Zuordnung der physischen Objekte eines Automobilproduktionssystems fehlen.

Eine besondere Anforderung für die Automobilindustrie ist die Berücksichtigung der vier Fertigungsgewerke Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage. Objekte mit gleicher Funktionalität sowie physisch gleiche Objekte müssen zur Herstellung der Konsistenz der gleichen Ebene zugeordnet werden. Das heißt, ein betriebsbereiter Roboter mit Steuerungstechnik und Zuleitungen muss immer genau der gleichen Hierarchiestufe zugeordnet werden, unabhängig in welchem Gewerk sich der Roboter befindet. Eine weitere Anforderung an die Definition der Ebenen ist die 1:n-Beziehung zwischen physischen Objekten des automobilen Produktionssystems und den Ebenen. Das heißt, jedes Objekt ist genau einer Ebene zugeordnet, jede Ebene kann aber beliebig viele Objekte enthalten. Würde die Bedingung nicht gelten, wäre eine Gliederung nach Abbildung 31 nicht zielführend, da die Objekte im Lösungskonzept keine eindeutigen Ausprägungen in den drei Dimensionen aufweisen würden. Diese Klassifizierung und Auffindbarkeit soll aber gerade durch die Gliederung in den drei Dimensionen erfolgen.

Im weiteren Vorgehen wurde unter Berücksichtigung der bestehenden Modelle eine anfängliche Hierarchiestrukturierung abgeleitet. Dabei wurden zahlreiche Kriterien für die

Einteilung herangezogen. Das Hauptkriterium ist die Funktionalität eines jeweiligen Objektes als Beitrag zur Gesamtfunktionalität des Produktionssystems. Damit folgt dieses Kriterium der Definition der technischen Funktionalität wie sie in der *I4.0* gegeben wird (vgl. VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI 2015). Dabei kann der Beitrag zur Funktionalität des Gesamtsystems sowohl wertschöpfend, unterstützend oder überwachend sein. Als zweites Kriterium für die Gliederung wurde die physische Modularität herangezogen, wie sie im Untersuchungsrahmen real vorhanden ist (siehe Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3). Zudem wurden nachrangig Steuerungs- und Regelungsarchitekturen, die Beziehung der Ebenen zur menschlichen Arbeit und die Beziehung zu Entwurfsphasen und -aktivitäten berücksichtigt.

In der Abbildung 32 ist das auf diese Weise entstandene Referenzmodell abgebildet. Zusätzlich wird das Referenzmodell mit den Ebenen bestehender Modelle in Verbindung gebracht (siehe Abschnitt 2.2.7).

Westkämper, Wiendahl, Nyhuis	Kiefer	Waltl, Wildemann	ISA 95	Hierarchische Produktionssystemstruktur	RAMI 4.0
					Connected World
Network		Marke	Enterprise	9 Produktionsnetzwerk	
Site		Werk	Site	8 Fabrik	Enterprise
	Organisationsebenen	Bereich		7 Produktionslinie	Work Unit
System		Linie	Area Production Line	6 Produktionssegment	
Cell	Fertigungszelle			5 Arbeitseinheit	
Station	Hauptgruppe	Arbeitsplatz	Work Cell	4 Arbeitsstation	Station
Processes	Funktionsgruppe			3 Funktionsgruppe	Control Device
	Untergruppe		Device	2 Komponente	Device
	Einzelteil			1 Konstruktionselement	Product

Abbildung 32: Abgleich der Ebenen des Referenzhierarisierungsmodells mit denen bestehender Modelle

Es ist ersichtlich, dass das Referenzmodell kein gänzlich neuer Ansatz ist, sondern die bestehenden Ansätze nutzt, sie kombiniert und erweitert für die Zielstellung dieser Arbeit. Eine Zuordnung von realen Objekten des automobilen Produktionssystems zum Referenzmodell war für die Festlegung der Ebenenanzahl wichtig, da alle Objekte zuordenbar sein sollten. Das Referenzmodell deckt mit der Definition von neun Ebenen das gesamte

automobile Produktionssystem ab, vom Produktionsnetzwerk bis zum mechanischen oder elektronischen Konstruktionselement.

Als Erweiterung zu den Modellen von *Nyhuis* und *Waltl, Wildemann* wurden untere Granularitätsebenen hinzugefügt und damit die Erkenntnisse von *Kiefer* in diesem Bereich genutzt. Diese sind gerade für die Konstruktionsphase wichtig (vgl. [Kiefer 2007]). Als Erweiterung der *ISA95* wurde auf der oberen Granularitätsebene das Produktionsnetzwerk aufgenommen, wie es auch im *RAMI4.0* vorhanden ist. Diese Ebene ist in der Automobilindustrie besonders wichtig, da die großen OEMs in einem Netzwerk an vielen Standorten fertigen (siehe Unterkapitel 1.1) und ein Trend in der Branche zur Schaffung von Konzernen mit mehreren Marken und Fabriken beobachtbar ist [Waltl und Wildemann 2014]. Zudem sind die unteren Granularitätsebenen im Vergleich zur *ISA95* erweitert und beinhalten rein elektronische, rein mechanische oder auch mechatronische Objekte auf der Ebene der Konstruktionselemente. In der *ISA95* wird die unterste Ebene von „Devices“ gebildet, also Geräten, die zur Steuerung und Regelung eines automatisierten Systems beitragen. Für die Methode „Wiederverwendung von Entwurfsartefakten“ sind alle Objekte eines Produktionssystems miteinzubeziehen. Zur Vermeidung des Ausschlusses der Objekte auf Ebene der Konstruktionselemente ist eine Erweiterung notwendig, um diese Objekte einzubeziehen.

Nach der Festlegung eines Referenzmodells wurden die Identifikationskriterien für Zuordnung der Objekte zu den Ebenen analysiert und definiert. Diese sind notwendig für ein systematisches, nachvollziehbares Vorgehen bei der Zuordnung. Es wurde ein induktives Vorgehen gewählt, indem zunächst die Objekte des Gewerkes Karosseriebau klassifiziert und zugleich die funktionalen Kriterien identifiziert worden sind. Dies erfolgte durch Analyse des realen Wertschöpfungsprozesses im Untersuchungsrahmen. Die genauen Ebenendefinitionen erfolgten anhand des Beitrages der jeweiligen inhärenten Funktionalität zu dem zugehörigen, übergeordneten Wertschöpfungsprozess. Anschließend wurden die Objekte eines weiteren Fertigungsgewerkes zugeordnet mithilfe des Kriteriums Funktionalität bis alle vier Gewerke eine Berücksichtigung fanden. Die Anwendbarkeit der

anfänglichen Definition wurde stets geprüft. Waren die Definitionen zu speziell formuliert, ließen sich einige Objekte nicht anhand der Identifikationskriterien zuordnen. In diesem Fall wurden die Kriterien verallgemeinert und damit erweitert, um diese Objekte ebenfalls klassifizieren zu können. Die Abbildung 33 zeigt das gewerkeübergreifende Referenzmodell mit zugeordneten typischen Objekten der jeweiligen Gewerke. Als Identifikationskriterien sind hier als Erweiterung der Funktionalität auch die Beziehung zur Produktgranularität und der Einfluss auf die Produktqualität aufgeführt, die in engem Zusammenhang zum Wertschöpfungsbeitrag der Objekte stehen. Die Ebenen sind zur Optimierung der Anwendbarkeit in umgekehrter Reihenfolge nummeriert. Beim Anlagenentwurf zur Realisierung der Wertschöpfung und der dazu notwendigen Funktionalität sind die Objekte der unteren Granularität unverzichtbar. Die Einbeziehung des Produktionsnetzwerkes hingegen ist für den Anlagenentwurf nicht immer relevant und wird in der Praxis oft ausgeblendet. Das hat zur Folge, dass der gewählte Ausschnitt die Ebene Produktionsnetzwerk nicht enthält. Um auf diesen Umstand sinnvoll zu reagieren, wurde eine Nummerierung in umgekehrter Reihenfolge gewählt, um das Erscheinen der Ebene Nr. 1 in der Praxis sicherzustellen.

Die Zuordnung der Objekte zu genau einer Ebene kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Zum einen können die Objekte „top-down“ zugeordnet werden. Da sich die Objekte höherer Ebenen als Aggregation der Objekte unterer Ebenen ergeben, beinhalten Objekte höherer Ebene die vollständige Funktionalität der Objekte unterer Ebenen, aus denen sie bestehen. Objekte werden demnach der höchsten Hierarchieebene zugeordnet, deren Funktionalität sie vollständig entsprechen.

Zum anderen können die Objekte in einem Bottom-Up-Ansatz zunächst der untersten Ebene zugeordnet werden. In einem iterativen Prozess werden sie solange zur nächsthöheren Ebene geschoben bis sie deren Funktionalitätsanforderungen nicht mehr entsprechen. Es kann an dieser Stelle keine Empfehlung für die Auswahl einer der beiden Ansätze gegeben werden. Vielmehr basierte die Auswahl auf der Präferenz und dem Wissen der beteiligten Ingenieure.

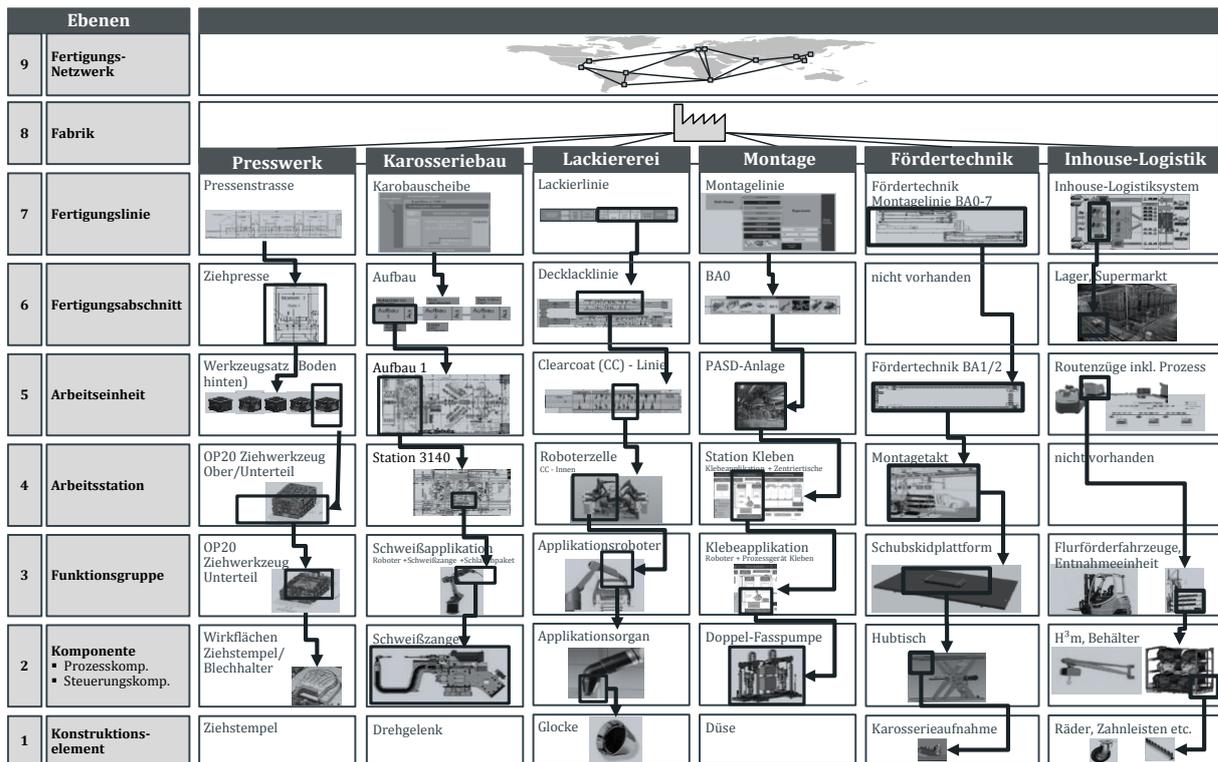


Abbildung 33: Referenzmodell zur Hierarchisierung der Objekte eines Produktionssystems anhand funktionaler Identifikationskriterien [Röpke et al. 2016]

Es folgt die Beschreibung der Ebenen anhand der Funktionalität der *14.0-Komponenten*, die für die Zuordnung der Komponenten zu genau einer Ebene primär genutzt werden kann. Damit ist die Funktionalität einer *14.0-Komponente* hier das Identifikationskriterium. Die Vorteilhaftigkeit der Identifikation von Komponenten über die Funktionalität leitet sich ab aus den bestehenden Vorgehensweisen zur Modulauswahl, u. a. in [Waltl und Wildemann 2014], [Hady 2013], [Gauche, Müller und Rebel 2013], [Göpfert 1998], [Schuh et al. 2010], [Klein 2014], [van Beek, Thom J., Erden und Tomiyama 2010] und insbesondere von der *Metus-Methode* (siehe [Feldhusen und Grote 2013], [Göpfert und Steinbrecher 2000]). Die Bedeutung der Funktionalität als Identifikationskriterium ergibt sich aus der Definition der Modularisierung bzw. eines Moduls (siehe Abschnitt 2.2.1). Vor diesem Hintergrund werden in den vorgestellten Wiederverwendungskonzepten (siehe Tabelle 6, Abschnitt 2.2.6) die wiederverwendbaren Artefakte ebenfalls primär durch die Funktionalität ausgewählt.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten den Hierarchieebenen folgende Funktionalitäten als Identifikationskriterium zugeordnet werden (siehe auch [Röpke et al. 2016]):

1. Konstruktionselement (Ebene 1)

Ein Konstruktionselement ist unverzichtbar für die Funktionalität von Komponenten (Ebene 2). Diese Ebene beinhaltet sowohl passive Elemente, wie Drähte oder Gießbetten, bis hin zu aktiven Elementen, wie Näherungssensoren, Steuerungen oder Schweißzangenköpfe. Die Elemente können verschiedene Zustände annehmen, um die Funktionalität auszuführen. So kann eine Steuerung der Ebene 1 die Zustände ein/aus annehmen.

2. Komponente (Ebene 2)

Eine Komponente führt eine Fertigungsmethode oder eine Unterstützungsfunktion aus. Der grundsätzliche Prozess ist nicht veränderbar, aber die Parameter des Prozesses sind veränderbar. Es gibt zwei Klassen von Komponenten. Die erste Klasse bilden Prozesskomponenten, die einen direkten Einfluss auf die Produktqualität haben und das Produkt mit einer Funktionalität ausstatten. Typische veränderbare Parameter von Prozesskomponenten sind die Stromstärke, die Haltekraft oder die Haltezeit. Die zweite Klasse bilden Steuerungskomponenten³, die Daten verarbeiten und übermitteln.

3. Funktionsgruppe (Ebene 3)

Eine Funktionsgruppe umfasst alle Komponenten, die notwendig sind, eine Funktion innerhalb eines Produktionssystems auszuführen. Eine solche Funktion kann beispielsweise Umformen sein mit allen dazugehörigen Unterstützungsfunktionen. Verschiedene Fertigungsverfahren können in einem Prozess zur Anwendung kommen, d. h. Tiefziehen und Schneiden, die für den Umformprozess notwendig sind. Die verschiedenen Fertigungsverfahren werden nicht unabhängig voneinander eingesetzt, sondern werden in einer festen Reihenfolge oder Kombination ausgeführt. Die Funktion, die eine Funktionsgruppe ausführt, ist nicht sinnvoll unterteilbar. Eine Funktionsgruppe führt einen wertschöpfenden Prozess und/oder eine Handhabungsfunktion aus.

³ Der Begriff soll hier auch Komponenten beinhalten, die Regelungsaufgaben ausführen. Der Begriff „Steuerungskomponenten“ entspricht dann dem englischen Begriff „control components“.

4. Arbeitsstation (Ebene 4)

Eine Arbeitsstation beinhaltet eine oder mehrere wertschöpfende oder unterstützende Funktionen. Sie stellt eine Produktqualität bereit durch die Kombination mehrerer Fertigungsprozess- oder Unterstützungsfunktionen. Zusammengefasst ist eine Arbeitsstation eine Kombination von Fertigungs- und Logistikprozessen.

5. Arbeitseinheit (Ebene 5)

Eine Arbeitseinheit ist eine Kombination aus Arbeitsstationen. Sie beinhaltet zahlreiche Wertschöpfungs- und Unterstützungsfunktionen. Der Umfang der zusammengestellten Funktionen kann sinnvoll abgegrenzt werden zu anderen Prozessen oder Arbeitseinheiten im örtlichen Umfeld. Diese Abgrenzung erfolgt aufgrund der Notwendigkeit der benachbarten Prozesse oder der einzelnen Arbeitseinheiten für die Erstellung eines Produktes oder einer Produktteile. Es können unterschiedliche Fertigungsprozesse oder nur ein Fertigungsprozess mit Unterstützungsfunktionen beinhaltet sein.

6. Fertigungssegment (Ebene 6)

Ein Fertigungssegment beinhaltet mehrere verbundene Fertigungsfunktionalitäten, Unterstützungsprozesse und Puffer zur Abkopplung mehrerer Fertigungssegmente untereinander. Damit ist ein Fertigungssegment eine Kombination mehrerer Arbeitseinheiten und Puffern. Die Elemente auf dieser Ebene werden typischerweise für die Ressourcenplanung verwendet. Ein Fertigungssegment beinhaltet alle zugehörigen Funktionen, um einen definierten Teilumfang eines ganzen Produktes zu fertigen.

7. Fertigungslinie (Ebene 7)

Eine Fertigungslinie ist eine Unterscheidung der Elemente nach unterschiedlichen Disziplinen wie Presswerk, Karosseriebau und Endmontage. Ein weiteres Kriterium ist die Produktionsweise (Mixproduktion oder Batchproduktion), genauer die beinhaltenden Funktionstypen einer Fertigungslinie, d. h. die zusammenhängenden Funktionen, und die Art

der zu fertigenden Produkte, d. h. die definierte Produktvarietät, die in einer Fertigungsline gefertigt werden kann.

8. Fabrik (Ebene 8)

Die Fabrikebene beinhaltet Elemente, die eine Kombination aus allen benötigten Fertigungs-, Logistik-, Unterstützungs- und sonstigen Funktionen sind. Diese kombinatorische Zusammenstellung von definierten Funktionen wird benötigt, um eine bestimmte Anzahl an unterschiedlichen Produkten zu fertigen. Die Elemente der Fabrikebene benötigen dazu ein oder mehrere Inputfaktoren. In Abhängigkeit der örtlichen Lage der Inputfaktorherkunft, der örtlichen Lage der Ressourcen, die die Funktionen bereitstellen, und den Besitzverhältnissen des Produktionssystems kann zusätzlich zwischen Elementen der Fabrik (Ebene 8) und der nachfolgenden Ebene 9 unterschieden werden.

9. Produktionsnetzwerk (Ebene 9)

Siehe Definition der Ebene Fabrik (Ebene 8).

Abhängig von der örtlichen Lage der Inputfaktorherkunft, der örtlichen Lage der Ressourcen, die die Funktionen bereitstellen und den Besitzverhältnissen des Produktionssystems, kann zwischen Elementen der Fabrik (Ebene 8) und der nachfolgenden Ebene Produktionsnetzwerk (Ebene 9) unterschieden werden. Die Elemente können dann eindeutig dem Produktionsnetzwerk zugeordnet werden, wenn sie örtlich deutlich getrennt sind, das Produktionssystem unterschiedliche Eigentümer aufweist oder die Herkunft der Inputfaktoren örtlich deutlich von der weiteren Verarbeitung zum fertigen Produkt getrennt ist. Die Elemente sind folglich entweder örtlich loser verbunden als die Elemente auf der Ebene 8 und/oder es liegen unterschiedlichen Eigentumsverhältnissen vor.

Durch die Verwendung der Identifikationskriterien wurde neben der reinen Definition der Ebenen auch ein Ansatz zur systematischen, konsistenten Zuordnung der Objekte erarbeitet. Dabei wurden die Anforderungen an das Modell, die sich aus dem automobilen

Produktionssystem ableiten lassen, umfänglich berücksichtigt. Im Untersuchungsrahmen wurden in der Praxis oft verwendete Ebenen identifiziert, deren Objekte aber keine festen 1:n-Beziehungen aufweisen. Darunter ist die Einheit „Schutzkreis“. Die genauen Objekte eines jeden Schutzkreises sind beliebig änderbar, solange eine Mindestanzahl nicht überschritten wird. Ein Schutzkreis ist folglich eine beliebige Zusammenstellung von Objekten, deren Objekte nicht eindeutig definiert werden können. Solche Einheiten ohne eindeutige 1:n-Beziehungen wurden daher nicht mit einbezogen, obwohl sie in der Praxis oft verwendet werden zur physischen Gliederung bzw. zur Modularisierung.

Im nächsten Unterkapitel 4.3 erfolgt die Identifizierung der relevanten Lebensphasen zur Klassifizierung wiederverwendbarer Artefakte (siehe Abbildung 31, Unterkapitel 4.1).

4.3 Relevante Phasen im Entwurfsprozess

Da sich die Zielsetzung und der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit auf den Anlagenentwurf beschränken, wird als Ausschnitt der gesamten Lebensphasen eines Objektes ausschließlich diese Phase betrachtet. Die gesamte Entwurfsphase muss allerdings feiner in relevante Phasen untergliedert werden, um die Abhängigkeiten der Artefakte im Lösungskonzept genauer untersuchen zu können (vgl. Abbildung 31, Unterkapitel 4.1).

Im *RAMI4.0* wird die Entwurfsphase nicht weiter untergliedert. Es wird stattdessen zwischen dem projektunabhängigen Entwurf und dem projektabhängigen Entwurf unterschieden. Bei *Waltl, Wildemann* werden durch die Segmentierung von Modulen nach Planungsbereichen relevante Entwurfsphasen indirekt hervorgehoben [Waltl und Wildemann 2014]. Zwar wird die Gliederung nach Entwurfsphasen nicht benannt, durch die beschriebene Segmentierung in die drei Planungsbereiche Organisation, Prozesse und Anlagen entsteht allerdings indirekt eine chronologische Abfolge für die Erstellung der Module. Dieser Fakt lässt sich auch aus der Ablaufreihenfolge der allgemeinen Entwurfsvorgehensmodelle (Abschnitt 2.1.1) oder speziell der Produktionsplanungsabläufe (Abschnitt 2.1.2) bzw. Karosseriebauplanungsabläufe (Abschnitt 2.1.3) feststellen. Anhand

der Nutzungszeitpunkte der bereits vorhandenen Werkzeuge der *Digitalen Fabrik*, der jeweiligen Nutzungszwecke, deren Schnittstellen und Informationsflüsse untereinander sowie den Nutzergruppen der jeweiligen digitalen Werkzeuge lassen sich Entwurfsphasen einteilen, z. B. in die Simulationsphase oder die Phase der mechanischen Konstruktion (Abschnitt 2.1.5). Eine Basis für eine sinnvolle Gliederung der Dimension „Entwurfsphase“ bieten die bestehenden Konzepte zu allgemeinen Entwurfsprozessen wie die *VDI 2221* (Abschnitt 2.1.1). In jedem Prozessabschnitt entstehen im Zusammenhang mit den beinhaltenden Aufgaben und den durchgeführten Entwurfsaktivitäten abschnittsspezifische Artefakte.

Um der anwendungsorientierten Forschung im Untersuchungsrahmen gerecht zu werden, wird neben der Gliederung in sieben Prozessabschnitte nach der *VDI 2221*, der unternehmensspezifische Produktentstehungsprozess in die Überlegungen einbezogen (siehe Abbildung 34). Die darin gemachten Vorgaben beinhalten die branchenspezifische Ausgestaltung der *VDI 2221* und der allgemeinen Fabrik- und Produktionsplanungsprozesse. Dazu gehören im Einzelnen:

- Die Festlegung der Aufgabeninhalte, des zeitlichen Rahmens, des Ablaufes, der Abhängigkeiten der Teilaufgaben, des Beginns und Endes einer Aktivität, der organisatorischen Zuständigkeiten, der geforderten Teilergebnisse.
- Die Definition von Meilensteinen zur Synchronisation aller im multidisziplinären Entwurf beteiligten und voneinander abhängigen, verschachtelten Entwurfsprozessen inkl. der Entwurfsergebnisse (siehe Abbildung 8).
- Die mit Meilensteinen verbundene Etablierung von Gremien zur Bestätigung der erfolgreichen Erfüllung der bis zum jeweiligen Meilenstein zu erledigenden Teilaufgaben. (Bei Nichterfüllung erhält der Prozess eine Schleife, das heißt es werden Teilaufgaben wiederholt bis die ordnungsgemäße Erledigung bestätigt wird. Ein Projektabbruch ist zu den Meilensteinen ebenfalls möglich.)
- Für den Bereich der Produktionsplanung: Die Vereinbarung von Verantwortungsstufen, da für jedes Projekt neu entschieden wird, welche Aufgaben vom OEM

durchgeführt und verantwortet werden und welche Aufgaben oder Phasen an externe Firmen vergeben werden. In der Abbildung 34 ist dies durch die Stufen 0 bis 3 kenntlich gemacht.

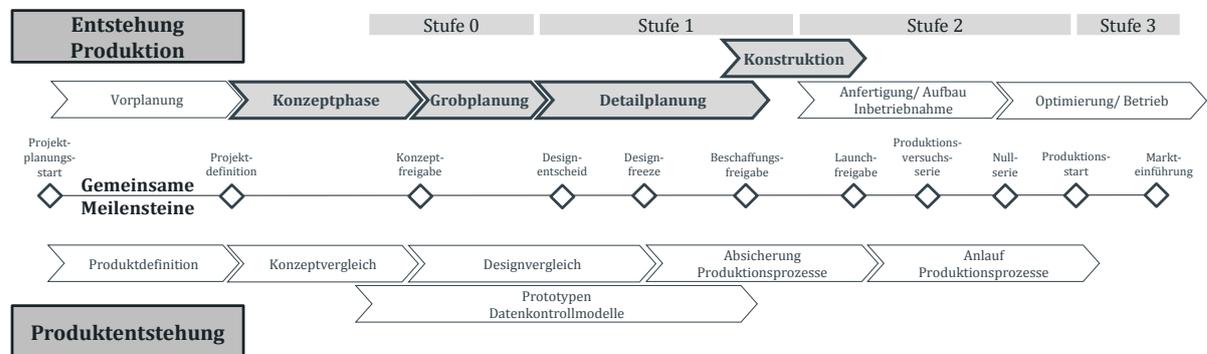


Abbildung 34: Referenzprozess der Produktentstehung im Untersuchungsrahmen, basierend auf [Kerber 2016]

Als erweiterte Anforderung für die Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf der Automobilindustrie ergibt sich die Möglichkeit der Nutzung einer sinnvollen Teilmenge der gesamten Informationen mechatronischer Objekte (siehe Abbildung 23). Ein Beispiel hierfür ist eine Kostenübersicht zusammen mit der Stückliste der Anlage sowie konzeptionellen Auslegungsdaten wie maximaler Produktionskapazität und Variantenflexibilität. Da die OEMs die phasenbezogene Verantwortlichkeit für den Anlagenentwurf von Projekt zu Projekt beliebig festlegen, werden nicht immer alle Informationen eines mechatronischen Objektes benötigt. Wird beispielsweise beim OEM nur die Stufe 0 des Entwurfes durchgeführt, entstehen intern hauptsächlich organisatorische und betriebswirtschaftliche Informationen, jedoch keine mechanischen oder steuerungstechnischen. Die restlichen Artefakte mit beinhaltenden Informationen entstehen in diesem Fall bei externen Firmen. Der Zugang zu diesen Artefakten ist aus diversen Gründen nicht immer gegeben (z. B. Patentschutz, anderweitig schutzbedürftiges Know-how, zusätzliche Kosten) oder wird unsystematisch verfolgt.

Mittels der Spezifizierung des allgemeinen Entwurfsvorgehens nach der *VDI 2221* und des allgemeinen Fabrikplanungsvorgehens (siehe Abschnitt 2.1.2) sowie des Abgleiches mit dem Referenzprozess wurde eine sinnvolle Unterteilung der Dimension „Entwurfsphase“ abgeleitet. Die Einteilung ist wie folgt:

1. Konzeptphase

Entscheidung über die Realisierung des Projektes, Festlegung der Prämissen und Bestätigung der Wirtschaftlichkeit.

2. Grobplanung

Festlegung der notwendigen Funktionalitäten, des Fertigungsprozessablaufes und Vorauswahl der notwendigen Anlagen/Komponenten.

3. Detailplanung

Finale Auswahl der notwendigen Anlagen/Komponenten. Finale Bestätigung der technischen Machbarkeit und entsprechende Absicherung. Finale Absicherung der kalkulierten Kosten.

4. Konstruktion (-sphase)

Mechatronische Konstruktion aller benötigten Komponenten/ Einzelteile inkl. Zukauf von Standardkomponenten, Gewährleistung der Sicherheit und der geforderten Funktionalität unter Einhaltung des vorgegebenen Kostenrahmens.

5. Anfertigung

Anfertigung von Einzelteilen und Komponenten sowie anschließender Zusammenbau/Installation inkl. der zugekauften Komponenten entsprechend der Anfertigungspläne.

6. Inbetriebnahme

Herstellen der operativen Einsatzbereitschaft und Absicherung der geforderten Funktionalitäten und Leistungskennzahlen im operativen Betrieb.

Die Nützlichkeit dieser Gliederung für die Klassifizierung von Artefakten und für die Unterstützung bei der Wiederverwendung kann an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden. Dazu werden im Kapitel 5 im Zuge der Detaillierung und im Kapitel 6 im Zuge der Validierung weitere Analysen durchgeführt.

Nachdem mit der Gliederung der Entwurfsphase die zweite Klassifizierungsdimension detailliert worden ist, folgt im nächsten Abschnitt die Detaillierung der dritten und letzten Dimension „Organisationseinheit“ (vgl. Abbildung 31, Unterkapitel 4.1).

4.4 Relevante Organisationseinheiten im Entwurfsprozess

Die Notwendigkeit der Dimension „Organisationseinheit“ lässt sich aus dem Vorhandensein der vier Fertigungsgewerke in der Automobilindustrie ableiten. Jedes der vier Gewerke bildet ein in sich abgeschlossenes Produktionssystem mit definierten Produktfertigstellungsgraden, die zur Übergabe an das nachfolgende Gewerk zu erreichen sind. Dabei handelt es sich beim Presswerk um Einzelteile, beim Karosseriebau um Rohkarossen, bei der Lackiererei um lackierte Karossen und bei der Montage um die fertig montierten Automobile als Endprodukt, bereit zur Kundenauslieferung. Jedes dieser vier Produktionssysteme enthält spezifische Fertigungsflüsse, Verfahren und technische Ressourcen. Eine Zuordnung der Fertigungsverfahren entsprechend der Einteilung nach *DIN 8580* [DIN] zu den Gewerken zeigt die jeweiligen Schwerpunkte und die Unterschiede zwischen den Gewerken - Presswerk: *Umformen, Trennen*, Stoffeigenschaften ändern - Karosseriebau: *Fügen (Schweißen, Kleben, Löten)*, Trennen - Lackiererei: *Beschichten*, Stoffeigenschaften ändern - Montage: *Fügen (Schrauben, Kleben, Zusammensetzen)*. Die in kursiv geschriebenen Verfahren sind die vorherrschenden Fertigungsverfahren je Gewerk. Die funktionale Unterschiedlichkeit zwischen den Gewerken wird durch die Auflistung sehr deutlich.

Die Entwürfe der Gewerke werden aufgrund dieser Heterogenität nach der Konzeptphase, in der das Konzept der gesamten Fabrik entworfen wird, von eigenständigen Organisationseinheiten mithilfe gewerkespezifischer Werkzeuge realisiert (siehe [Bracht, Geckler und Wenzel 2011] und Abschnitte 2.1.3 und 2.1.5). Die Artefakte, die während des Entwurfs einer Automobilfertigung entstehen, enthalten daher größtenteils gewerkespezifische Informationen, die ausschließlich von speziellen, gewerkespezifischen Werkzeugen verarbeitet werden können und die für den Anwender nur mithilfe dieser Werkzeuge gelesen werden können.

Aus Sicht der Wiederverwendung ist deshalb eine Klassifizierung der Artefakte nach Gewerken sinnvoll, um dem spezifischen Verwendungscharakter gerecht zu werden. Einen Ansatzpunkt bietet die Einteilung nach [Walzl und Wildemann 2014], bei der zwischen

den Produktionsfunktionen unterschieden wird. Dabei werden die Objekte eines Produktionssystems nach der Funktionalität unterschieden, die sie jeweils zum gesamten Produktionssystem beitragen. Indirekt wird damit auch nach Organisationseinheiten unterschieden, die den Entwurf und die Realisierung dieser Objekte durchführen. Es wird dort zwischen vier Produktionsfunktionen unterschieden:

1. Fertigung und Montage
2. Logistik
3. IT
4. Unterstützung

In Kombination mit der dort beschriebenen Unterteilung nach Planungsbereichen (siehe Unterkapitel 4.3) wird ein Konzept für eine sinnvolle Klassifizierung der Objekte nach dem Kriterium „Organisationseinheit“ vorgestellt. Ziel ist hierbei die Wandelbarkeit einer Fabrik durch Segmentierung. Die Zielsetzung der Wiederverwendung von einzelnen zu unterscheidenden Artefakten wird bei [Waltl und Wildemann 2014] jedoch nicht explizit betrachtet. Die reale Organisation im Untersuchungsrahmen ist feiner unterteilt. Neben den vier Fertigungsgewerken wird organisatorisch zudem zwischen der Inhouse-Logistik, der Fahrzeugelektrik (Entwurf von Betriebsmitteln, die Fahrzeugsoftware übertragen und die Fahrzeugelektronik in Betrieb nehmen sowie prüfen) und der Automatisierungstechnik unterschieden. Insgesamt werden demnach sieben Organisationseinheiten unterschieden, die jeweils bestimmte Objekte des Produktionssystems entwerfen und die dazu notwendigen Artefakte erzeugen.

Im allgemeinen Vorgehensmodell zum mechatronischen Entwurf nach *VDI 2206* (siehe Abschnitt 2.1.1) sind die mechatronischen Disziplinen in einen gemeinsamen Prozess integriert. Zwischen den einzelnen Disziplinen wird nicht während des gesamten Prozesses unterschieden, sondern nur während der Konstruktionsphase, in der die disziplinspezifischen Konstruktionen erfolgen. Anschließend werden die Ergebnisse zu einem mechatronischen Objekt integriert. Eine Separierung des gesamten Entwurfes nach mechatronischen Disziplinen soll gerade vermieden werden durch einen integrierten mechatronischen Entwurf. Eine Unterteilung des Prozesses nach mechatronischen Disziplinen und den entsprechenden Organisationseinheiten ist demnach außer in der

Konstruktionsphase zu vermeiden und dort auch nur unter Berücksichtigung der jeweils anderen Disziplinen. Die vier Fertigungsgewerke können aufgrund der Eigenständigkeit als jeweils ein zu realisierendes mechatronisches System gesehen werden, für die jeweils aus einer Makrosichtweise das V-Modell (siehe Abbildung 6, Abschnitt 2.1.1) einmal durchlaufen wird. Aufgrund der unterschiedlichen Systeme, die zu entwerfen sind, kann daher begründet zwischen den zugehörigen Organisationseinheiten für den jeweiligen Systementwurf unterschieden werden.

Eine weitere fünfte Kategorie „Logistik“ wäre möglich. Dieser Aspekt ergibt sich aus dem Vorhandensein der Kategorie in dem Modell von *Waltl, Wildemann [Waltl und Wildemann 2014]* und der Organisationseinheit Inhouse-Logistik im realen Untersuchungsrahmen. Dagegensprechen könnte die Sichtweise, dass die Logistik essentiell ist für ein funktionierendes Produktionssystem bzw. Fertigungsgewerk. Die Betriebsmittel und der Entwurfsprozess könnte demnach den vier Gewerken zugeschlagen werden, in Abhängigkeit des Ortsbezuges der Betriebsmittel. Ungeklärt wäre dann die Zuordnung der Logistikbetriebsmittel, die für die Verbindung zweier Gewerke zuständig sind. Abschließend kann an dieser Stelle keine Empfehlung für oder gegen eine fünfte Kategorie Logistik gegeben werden, da aus Sicht der Wiederverwendung der Artefakte für die Gliederung des initialen Lösungskonzeptes keine eindeutige Vorteilhaftigkeit existiert.

Für die Dimension „Organisationseinheit“ des Lösungskonzeptes zur Klassifizierung von wiederverwendbaren Artefakten im Entwurfsprozess wird in dieser Arbeit eine Gliederung in vier Kategorien verfolgt: Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei, Montage.

Diese Gliederung folgt dem Verständnis, der dem mechatronischen Entwurfsvorgehen nach *VDI 2206* zu Grunde liegt. Die Disziplinen zum Entwurf eines mechatronischen Objektes sollen integriert in einem Entwurfsprozess betrachtet werden. Damit lassen sich alle Artefakte zu den Elementen eines Fertigungsgewerkes einer Organisationseinheit zuordnen. Im Umkehrschluss sind grundsätzlich alle Artefakte bzw. Informationen eines Gewerkes in einer der vier gewerkespezifischen Organisationseinheiten vollständig vorhanden. Dies ist im Einklang mit der Idee der gebündelten und verfügbaren mechatronischen Objekte (vgl. Abschnitt 2.2.4) inkl. des „Digitalen Schattens“, d. h. der vollständigen Information zur digitalen Repräsentation der physischen Objekte (siehe [Lüder et al. 2017b]).

Diese Tatsache war letztendlich ausschlaggebend, die Kategorie Logistik nicht zu bilden, um die Vollständigkeit der Objekte mitsamt des „Digitalen Schattens“ nicht zu gefährden durch die Bildung zu vieler Kategorien.

4.5 Zusammenfassung des Lösungskonzeptes

An dieser Stelle folgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse des Kapitels 4, der Definition des Lösungskonzeptes.

Im Kapitel 4 wurde das grundsätzliche Lösungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen im Untersuchungsrahmen präsentiert. Dazu wurde in Unterkapitel 4.1 die Absprungbasis für das Lösungskonzept in der Arbeit auf Basis des Standes der Wissenschaft dargelegt. Es folgte in Unterkapitel 4.2 die Ausdetaillierung der relevanten Hierarchieebenen des Produktionssystems für die Wiederverwendung von Artefakten im Entwurfsprozess. In Unterkapitel 4.3 wurden die relevanten Phasen im Entwurfsprozess identifiziert, um den Einfluss der Lebensphase eines Produktionssystems auf die Wiederverwendung der zugehörigen Artefakte in der Folge näher untersuchen zu können. In Unterkapitel 4.4 wurden schließlich die relevanten Organisationseinheiten im Untersuchungsrahmen identifiziert, die für die projektübergreifende Wiederverwendung und Segmentierung der Entwurfsartefakte sinnvoll sind.

Als Ergebnis der notwendigen Untergliederung der Dimensionen (Hierarchieebenen, Entwurfsphasen, Organisationseinheiten), um Informationsartefakte für eine Wiederverwendung zu identifizieren und zu charakterisieren, ergibt sie ein gerastertes, dreidimensionales Lösungskonzept (siehe Abbildung 35).

Die These ist, dass mithilfe dieses Lösungskonzeptes alle sinnvoll wiederverwendbaren Informationsartefakte nach der Identifizierung charakterisiert, klassifiziert und leicht auffindbar sind zur einfachen Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten.

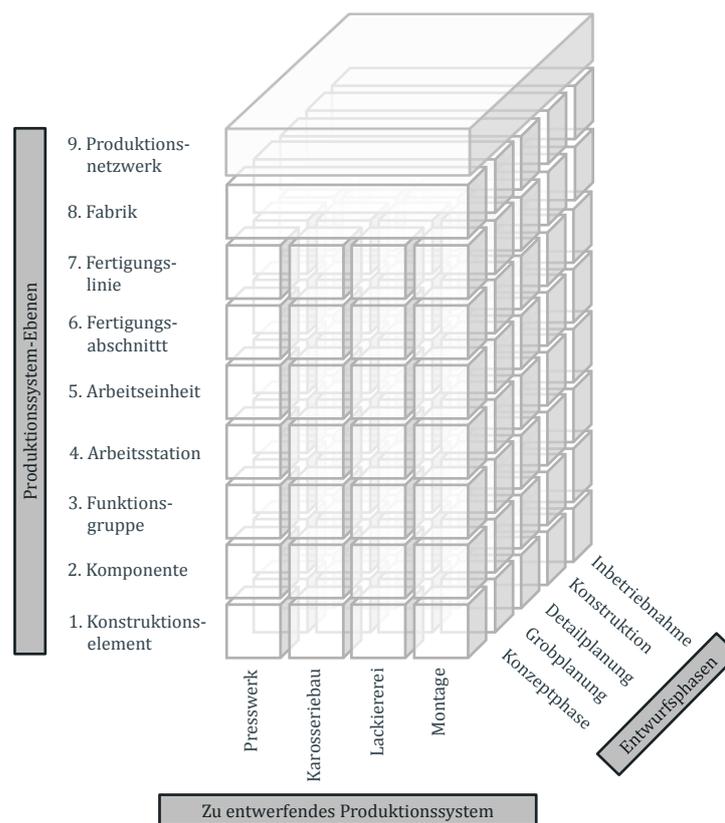


Abbildung 35: Strukturkonzept zur Identifizierung und Charakterisierung von Informationsartefakten zur Wiederverwendung im Anlagenentwurf

Zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen aus Unterkapitel 3.1 sind nach der Definition eines Lösungskonzeptes weitere Arbeitsschritte notwendig, die in den Kapiteln 5 und 6 dargelegt werden. Da sich die Forschungsfragen explizit auf das Gewerk Karosseriebau beziehen, wird das dreidimensionale Raster (Abbildung 35) durch die Wahl der Organisationseinheit Karosseriebau in ein zweidimensionales Raster überführt (siehe Abbildung 36). Die Diskussion über die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die anderen Gewerke wird im Kapitel 6 aufgegriffen, da die Übertragbarkeit einen wichtigen Aspekt für die Anwendbarkeit in der Praxis darstellt.

Einige Aspekte zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wurden in diesem Kapitel 4 durch die Definition des Lösungskonzeptes schon bearbeitet, eine abschließende Beantwortung kann jedoch erst durch die Identifikation von wiederverwendbaren Einheiten und deren Verwendung in der Praxis erfolgen.

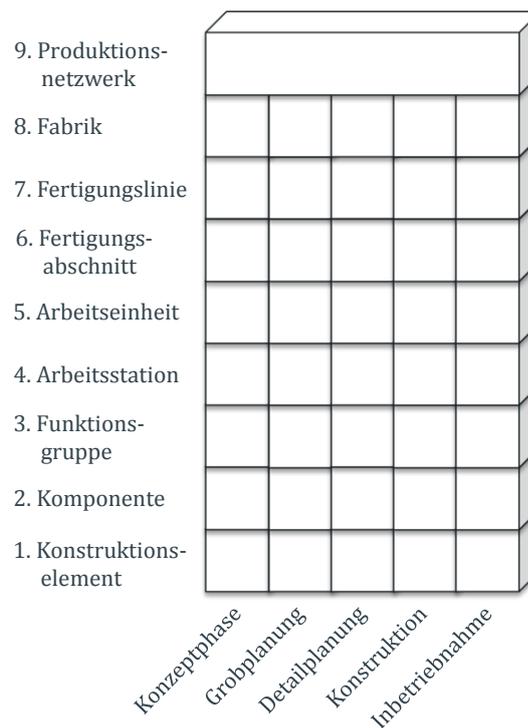


Abbildung 36: 2-dimensionales Strukturkonzept durch Fokussierung auf die Analyse im Karosseriebauentwurf

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 müssen innerhalb des Lösungskonzeptes wiederverwendbare Einheiten mit ihren zugehörigen Artefakten (siehe Abschnitt 2.2.4) identifiziert werden. Die Klassifizierung der Artefakte entsprechend der zwei Dimensionen Hierarchieebene und Entwurfsphase führt dann zu einer Aussage über wiederverwendbare Einheiten in Abhängigkeit der sich ergebenden Zuordnung (vgl. Forschungsfragen 2 und 3).

Das Lösungskonzept aus Kapitel 4 wird anschließend für die Referenzfälle A (Wiederverwendung innerhalb eines Projektes) und B (projektübergreifende Wiederverwendung) im Kapitel 5 weiter ausdetailliert, um die jeweiligen Anforderungen zu berücksichtigen und im Lösungskonzept relevante Inhalte zu identifizieren (siehe Unterkapitel 3.2). Zusätzlich werden unterstützende Methoden für die Anwendung in der Praxis angeführt und an die Zielsetzung dieser Arbeit angepasst. Damit wird die Forschungsfrage 4 adressiert einschließlich des sich als Ergebnis ergebenden Anpassungsbedarfes für das vorhandene Modell des *Domain Engineerings*.

5 Ausdetaillierung des Konzeptes am Beispiel Karosseriebauentwurf

Im Kapitel 4 wurde das initiale Lösungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen für den Untersuchungsrahmen präsentiert. Dieses Konzept wird nun im Kapitel 5 für die Referenzfälle A (Wiederverwendung innerhalb eines Projektes) in Unterkapitel 5.1 und B (projektübergreifende Wiederverwendung) in Unterkapitel 5.2 weiter ausdetailliert (siehe Abbildung 28, Abschnitt 3.2). Es werden die jeweiligen Anforderungen berücksichtigt und die im Lösungskonzept relevanten Artefakte für die Referenzfälle identifiziert. Daneben wird das Lösungskonzept mit Methoden zur Unterstützung der Wiederverwendung angereichert. Die Ausdetaillierung erfolgt speziell für das automobiler Fertigungsgewerk Karosseriebau, da dort die zu erwartenden ökonomischen Potenziale durch Wiederverwendung von Entwurfsartefakten im Vergleich zu den anderen Gewerken deutlich größer sind (siehe Unterkapitel 1.1).

5.1 Referenzfall A: Wiederverwendung innerhalb eines Projektes

In Unterkapitel 5.1 werden insbesondere die Forschungsfragen 2, 3 und 4 adressiert. Diese werden aus dem Referenzfall A abgeleitet, der Wiederverwendung von Artefakten innerhalb desselben Entwurfsprojektes (siehe Abbildung 28, Unterkapitel 3.2).

Um die Fragen beantworten zu können, wird folgendes Vorgehen gewählt: In Abschnitt 5.1.1 wird das Ergebnis einer detaillierten Analyse des Entwurfsprozesses im Untersuchungsrahmen präsentiert, unter Nutzung der Prozessanalyse-Methode nach [Schäffler et al. 2013], um die relevanten Informationen für die *Verwaltungsschale* der *I4.0-Komponenten* einzugrenzen. In Abschnitt 5.1.5 erfolgt eine Zuordnung der identifizierten Artefakte, zu den in Unterkapitel 4.2 beschriebenen, relevanten Hierarchieebenen eines Produktionssystems. Damit wird für jede Hierarchiestufe jeweils eine Menge potenziell wiederverwendbarer Informationen definiert. In Abschnitt 5.1.2 werden die SoftwareWerkzeuge und Datenformate analysiert, in denen die Artefakte erzeugt werden und die

dadurch die Primärquelle der beinhaltenden Informationen sind. Aus dieser Analyse lassen sich technische Anforderungen für die Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* (siehe Abschnitt 2.1.5) zur Unterstützung der systematischen Wiederverwendung der Informationen ableiten. In Abschnitt 5.1.3 wird eine Methode vorgestellt, um den Abdeckungsgrad (Anteil der wiederverwendbaren Objekte) für den betrachteten Fall ermitteln und erhöhen zu können. In Abschnitt 5.1.4 wird ein Verfahren zur Gütemessung von mechatronischen Objekten auf Anlagenebene eingeführt, um die Güte eines Entwurfsergebnisses bewerten zu können. Dies bildet neben den Anforderungen an den Wiederverwendungsprozess ein wichtiges Werkzeug um den Gesamtumfang der Artefakte eines mechatronischen Objektes sinnvoll wiederzuverwenden und auszuwählen. Dieser Abschnitt bildet damit eine Überleitung in den Referenzfall B: die projektübergreifende Wiederverwendung. In Abschnitt 5.1.6 erfolgt eine Zusammenfassung dieses Unterkapitels 5.1, um alle Anforderungen und Erkenntnisse, die aus dem Referenzfall A abgeleitet werden können, als Grundlage für die projektübergreifende Wiederverwendung in Unterkapitel 5.2 zu nutzen.

5.1.1 Entwurfsprozess am Beispiel Karosseriebau

Die Prozessanalyse soll als Grundlage dafür dienen, die vorhandenen und potenziell wiederverwendbaren Artefakte im Lösungskonzept (siehe Unterkapitel 4.5) zu identifizieren, die während des Referenzfalls A entstehen. Diese Artefakte beinhalten die Gesamtmenge der Informationen, die für die projektübergreifende Wiederverwendung (Referenzfall B) aus Vorgängerprojekten für Nachfolgeprojekte zur Verfügung stehen.

Bei der Prozessanalyse liegt der Fokus neben den Aktivitäten auf der Analyse des Informationsflusses und der entstehenden Artefakte. Aus diesem Grund wurde für die Prozessanalyse die *4D-Methode* nach [Schäffler et al. 2013] ausgewählt. Diese Methode baut auf der *IDEF0*-, *IDEF1-Methode* (siehe [AFRL 1981b], [AFRL 1981a]) und der *Structured Analysis and Design Technique* [Ross 1977] auf, bildet jedoch den Aktivitätsfluss und den Informationsfluss vereinfacht in einer Darstellung ab. Damit sind in einer Darstellungsform zugleich die Vor- und Nachfolgeaktivitäten, die erzeugten Artefakte, die Informationsflüsse und die benötigten Ressourcen dargestellt. Die Bezeichnung *4D-Methode* leitet

sich von den dargestellten vier Dimensionen ab: Aktivitätsfluss, Informationsfluss, notwendige Personen/Ressourcen und benötigte Werkzeuge/Hilfsmittel (siehe Abbildung 37).

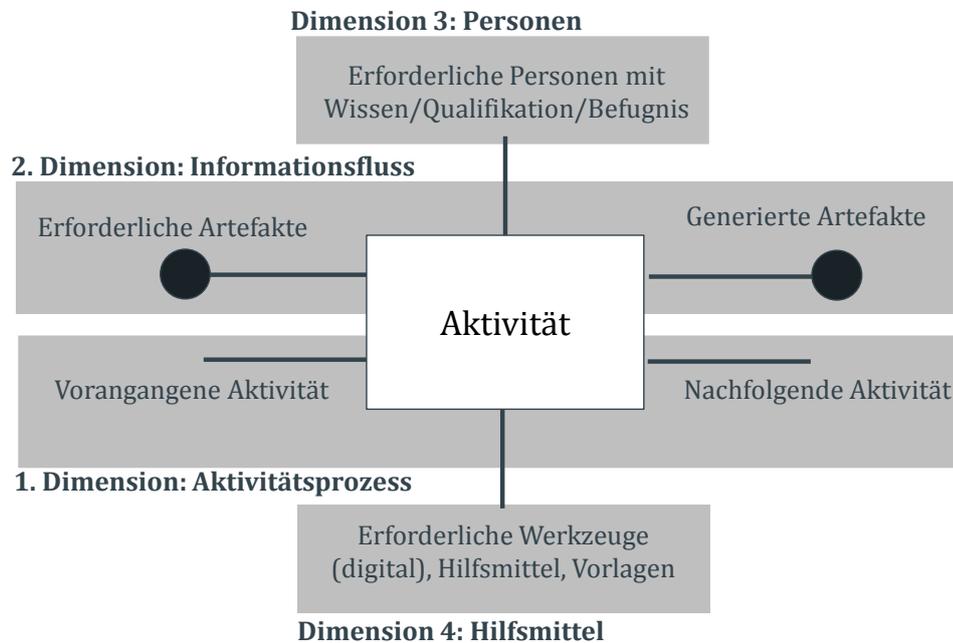


Abbildung 37: Darstellungsschema der *4D-Methode* zur Analyse von Entwurfsprozessen nach [Schäffler et al. 2013]

Die Prozessanalyse wurde mit der oben beschriebenen *4D-Methode* für den Karosseriebauentwurf innerhalb des Untersuchungsrahmens durchgeführt. Es sind die Phasen 1-4, Konzeptphase, Grobplanung, Detailplanung und Konstruktion einbezogen worden (siehe Unterkapitel 4.3). Den Abschluss bildet dabei die Aktivität der virtuellen Inbetriebnahme. Bis zu diesem Zeitpunkt sind alle Entwurfsdaten entstanden, sodass eine Anfertigung und der Aufbau anhand dieser Entwurfsdaten durchgeführt werden können. Die Daten könnten im Rahmen der Anfertigung und der Inbetriebnahme durch die Erkenntnisse bei der physischen Realisierung aktualisiert werden, jedoch sind zu diesem Zeitpunkt keine grundsätzlich neuen entwurfsrelevanten Artefakte zu erwarten. Der Analyseumfang schließt demnach alle relevanten Entwurfsphasen ein, in denen Artefakte in Primärquellen entstehen.

Auf diese Weise ist eine Darstellung des realen Entwurfsprozesses entstanden, der die Basis für die weitergehenden Analysen bildet (siehe Abbildung 38).

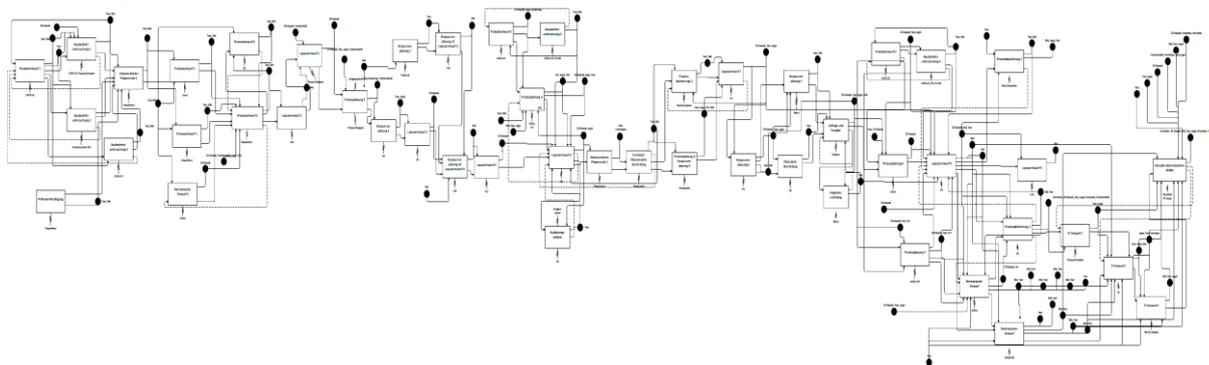


Abbildung 38: Ergebnis der Prozessanalyse mithilfe der 4D-Methode des Karosseriebauentwurfes im Untersuchungsrahmen auf Basis von [Hillmann 2016]

Dem Prozess wurden zudem die internen Meilensteine bzw. Entwurfsphasen zugeordnet, um die zeitliche Zuordnung zwischen Aktivitäten, Artefakten und Phasen durchführen zu können. Im Folgenden werden die identifizierten Hauptaktivitäten und die zugehörigen Artefakte kurz beschrieben, um eine Übersicht für die weiterführenden Auswertungen zu erhalten. Die Prozessanalyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Abbildung aller Unteraktivitäten. Ziel war es viel mehr, die zentralen Hauptaktivitäten und zentralen Artefakte zu identifizieren. Die in Abschnitt 2.1.3 gezeigten typischen Aktivitäten des Karosseriebauentwurfs konnten alle im realen Entwurfsprozess inhaltlich wiedergefunden werden. Es wurden, als Erweiterung der dortigen Darstellung, zahlreiche weitere Hauptaktivitäten identifiziert. Zudem wurden die Informationsflüsse, die benötigten Ressourcen und die entstehenden Artefakte ermittelt. Die gewonnenen Ergebnisse der Prozessanalyse sind entsprechend der chronologischen Phasenreihenfolge den folgenden Tabellen 11 bis 14 zu entnehmen (siehe auch Detaildarstellungen der Prozessanalyse in den Anhängen A bis D am Ende dieser Arbeit).

Konzeptphase

Tabelle 11: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Konzeptphase

Identifizierte Hauptaktivitäten	Identifizierte Artefakte	Genutzte digitale Werkzeuge
<ul style="list-style-type: none"> • Standortentscheidung • Untersuchung von: Schweißzangenzugänglichkeit, Flanschlängen/-breiten, Materialdickenkombinationen, Schachtelbarkeit der Bleche • Abschlussprotokoll der Konzeptphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Fügedaten, Schweißzangendaten • Produktionsprämissen • Problemberichte, Protokolle • Ökonomische Daten 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>CATIA</i> • <i>Process Simulate</i> • <i>Powerpoint</i> • Textverarbeitung • Hilfswerkzeuge zur Flanschanalyse

Grobplanung

Tabelle 12: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Grobplanung

Identifizierte Hauptaktivitäten	Identifizierte Artefakte	Genutzte digitale Werkzeuge
<ul style="list-style-type: none"> • Ableitung planerischer Kenngrößen, Festlegung Fügefolge • Konzeptionierung der Infrastruktur • Ergonomieanalyse • Konzeptlayouts • Fertigungsprozessplanung, Speicher/Pufferauslegung, Fördertechnikplanung • Absicherung Herstellbarkeit, Festlegung Füge- und Punktpläne • Simulation Auslastung + Verfügbarkeit, Optimierungsworkshops • Elektrikplanung, Konzeptabsicherung • Preiskalkulation • Lastenhefterstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • Diverse 2D- und 3D-Layouts/ Visualisierungen • Fügedaten, Produktionsprämissen, Fertigungsprozesse und -verfahren • Simulationsergebnisse, Gantt-Charts • Gebäudepläne • Spannkonzepete • Fügefolge • Gremienunterlagen, Problembereichte • Ressourcenbedarfe, • Komponentenlisten (Technik) • Lastenhefte, Ökonomische Daten, Vergabeunterlagen • Produktdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Tabellenkalkulation, Textverarbeitung • <i>Process Designer</i> • Layoutsysteme • Systeme für Zeitstudien • <i>CATIA</i> • <i>Process Simulate, Plant Simulation</i> • Filesharing-Werkzeuge

Detailplanung

Tabelle 13: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Detailplanung

Identifizierte Hauptaktivitäten	Identifizierte Artefakte	Genutzte digitale Werkzeuge
<ul style="list-style-type: none"> • Angebotserstellung • Aktualisierung der Konzepte mit aktuellen Produktdaten • Herstellbarkeitsuntersuchung, Anpassung Spannkonzepete • Layouts, Visualisierungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Pflichtenhefte, Übergabedaten, Problembereichte • Produktdaten • Diverse 2D- und 3D-Layouts/ Visualisierungen • Ablaufdiagramm • Komponentenlisten 	<ul style="list-style-type: none"> • Textverarbeitung, Tabellenkalkulation • Filesharing-Werkzeuge • <i>CATIA</i> • <i>Process Simulate</i> • Hilfswerkzeuge zur Flanschanalyse • <i>Process Designer</i>

Konstruktionsphase

Tabelle 14: Aktivitäten, Artefakte und digitale Werkzeuge der Konstruktionsphase

Identifizierte Hauptaktivitäten	Identifizierte Artefakte	Genutzte digitale Werkzeuge
<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Konstruktion • Erreichbarkeitsanalysen • Verfügbarkeitsimulationen • Erstellung finaler Layouts • Elektrische Konstruktion • Offline-Programmierung, SPS-Programmierung • Visualisierungen HMI 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialflussmodell • Maschinenaufstellplan, Kollisionsberichte • CAD-Konstruktionen, Stückliste • Pneumatikpläne, Hydraulikpläne • Einspeisekonzepte, Elektrikpläne, Eingabe/Ausgabe-Liste 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>CATIA</i> • Layoutsysteme • <i>Plant Simulation, Process Simulate</i> • <i>WinMOD, RF Suite, WinCC,</i> • <i>Eplan</i> • <i>Process Designer</i> • <i>S7-Werkzeuge</i>

<ul style="list-style-type: none"> • Virtuelle Inbetriebnahme 	<p>der elektrischen/informationstechnischen Verkabelung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mess- und Abstimmpläne • Sicherheitskonzepte • Roboter Offline-Programme, SPS-Programme, Ablaufpläne • HMI-Programmierung • Punkt- und Klebepläne • Hardwarekonfiguration 	<ul style="list-style-type: none"> • Textverarbeitung
--	--	--

Die ableitbaren Erkenntnisse der Prozessanalyse, die in den Tabellen 11 bis 14 zusammenfassend aufgelistet sind, ergänzen die in Unterkapitel 2.1 aus der Theorie wiedergegebenen Beschreibungen des Anlagenentwurfs im Gewerk Karosseriebau. Besonders zu beachten ist die Vielzahl an eingesetzten digitalen Werkzeugen und die große Anzahl der identifizierten Artefakte. Auffällig ist zudem die große Anzahl an erzeugten Layouts mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden, die im Laufe des Entwurfsprozesses immer wieder aktualisiert und neu abgelegt werden. Der Fokus der Phasen liegt in der Konzeptphase auf ökonomischen Entscheidungen und der Produktabsicherung, in der Grobplanung auf der Prozess- und Ressourcenplanung, in der Detailplanung auf der Absicherung/Aktualisierung der Prozess- und Ressourcenplanung und in der Konstruktionsphase auf der mechanischen Konstruktion sowie der Programmierung der Roboter und der Automatisierungstechnik. Die Aufgaben decken sich damit mit jenen aus der *VDI 5200* (vgl. Unterkapitel 2.1).

Nach der allgemeinen Auswertung der Prozessanalyse werden im Folgenden weitere Analysen speziell für die Konzeptionierung der Wiederverwendung von Artefakten durchgeführt.

Wichtig für die durchgängige Werkzeugkette zur automatisierten Verarbeitung der Informationen und damit letztendlich zur Wiederverwendung der Informationen sind die Datenformate, in denen die Artefakte vorliegen. Der Grund dafür liegt in der Anforderung an zunehmenden Datenaustauschen und Iterationen in komplexen Entwurfsprojekten, also einer möglichst guten, effizienten Zusammenarbeit der digitalen Werkzeuge, auch Interoperationalität genannt [Drath, Fay und Barth 2011], [Tauchnitz und Maier 2009]. Durch geeignete Datenformate müssen für eine gute Interoperationalität bei Datenaustauschen unter anderem Informationsverluste vermieden werden, eine Datenkonsistenz

gewahrt werden, die Daten mithilfe der Werkzeuge zu öffnen und automatisiert weiterverarbeitbar sein sowie Konflikte durch Datenänderungen in Quellwerkzeugen transparent an die anderen Werkzeuge übermittelt werden können [Drath, Fay und Barth 2011], [VDI und VDE 2010d]. Im folgenden Abschnitt 5.1.2 werden daher zunächst die verwendeten Datenformate, in denen die digital erzeugten Artefakte vorliegen, beschrieben.

5.1.2 Beschreibungsmittel der digitalen Werkzeuge

Die Datenformate, in denen die Artefakte vorliegen, sind entscheidend für die automatisierte Verarbeitung der Informationen, die Editierbarkeit und die Anforderungen an die digitalen Werkzeuge als Voraussetzung für die Zugänglichkeit zu den beinhaltenden Informationen (vgl. Lüder et al. 2017a). In der Tabelle 15 sind die im realen Prozess identifizierten Datenformate nach Entwurfsphasen geordnet aufgelistet, die mithilfe der durchgeführten Prozessanalyse ermittelt werden konnten.

Tabelle 15: Datenformate der Artefakte nach Entwurfsphase geordnet [Lüder et al. 2017a]

Entwurfsphase	Genutzte digitale Werkzeuge	Datenformate
Konzeptphase	<i>CATIA, Process Simulate, Powerpoint, Textverarbeitung, Hilfswerkzeuge zur Flanschanalyse</i>	Textformate wie DOC/PPT/PDF, CSV-Dateien, XML-Strukturen, CAD-Dateien wie CAT-Part oder JT
Grobplanung	Tabellenkalkulation, Textverarbeitung, <i>Process Designer, Layoutsysteme, Systeme für Zeitstudien, CATIA, Process Simulate, Plant Simulation, File-sharing-Werkzeuge</i>	CSV-Dateien, XLS, Textdateien wie DOC oder PDF, CAD-Dateien wie JT/CATPart/CAT-Product/DXF/STP, XML-Strukturen, Bilddateien wie DGN, Simulationsmodell wie SPP
Detailplanung	Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Filesharing-Werkzeuge, <i>CATIA, Process Simulate, Hilfswerkzeuge zur Flanschanalyse, Process Designer</i>	CSV-Dateien, XLS, Textdateien wie DOC oder PDF, CAD-Dateien wie JT/CATPart/CAT-Product/DXF/STP, XML-Strukturen, Bilddateien wie DGN, Simulationsmodelle wie SPP/CO
Konstruktionsphase	<i>CATIA, Layoutsysteme, Plant Simulation, Process Simulate, WinMOD, RF Suite, WinCC, E-plan, Process Designer, S7-Werkzeuge, Textverarbeitung</i>	CSV-Dateien, XLS, Textdateien wie DOC/PDF, CAD-Dateien wie JT/CATPart/CATProduct/DXF/STP/CGR, XML-Strukturen, Bilddateien wie DGN, Simulationsmodelle wie SPP/CO/WMD/ANIM, IEC 61131 Code wie CFG, Datenaustauschformate wie AML

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass zahlreiche spezifische, digitale Werkzeuge im Einsatz sind. Die erzeugten Artefakte enthalten Informationen, die aufgrund der Erzeugung in den spezifischen Werkzeugen ebenfalls in diversen, spezifischen Datenformaten abgespeichert werden. Als Voraussetzung für den Zugang zu diesen Informationen und damit für die Wiederverwendung sind die spezifischen Werkzeuge oder ein passender Importer deshalb zwingend erforderlich. Zudem ist die Durchgängigkeit der Werkzeugkette besonders relevant, da auf diese Weise die Konsistenz der Informationen sichergestellt wird. Mithilfe der Prozessanalyse konnte die Durchgängigkeit der Werkzeugkette und der Informationsartefakte sichtbar gemacht werden. Eventuell doppelt erzeugte, inkonsistente Informationen oder Informationsverluste können darauf basierend identifiziert werden und der Prozess durchgängig gestaltet werden.

Diese Anforderungen decken sich mit den Vorbedingungen der Wiederverwendung bezüglich spezifischer Entwurfs-Werkzeuge und einer durchgängigen Werkzeugkette nach der *VDI 3695* (siehe Abschnitt 2.2.2). Durch die Analyse konnten die genauen Ausprägungen im realen Prozess ermittelt werden und bilden somit eine konkrete Anforderung an die projektübergreifende Wiederverwendung im Untersuchungsrahmen.

Nach der Betrachtung des Karosseriebauentwurfsprozesses in Abschnitt 5.1.1 und der Datenformate, in denen die Informationen vorliegen, in Abschnitt 5.1.2, steht im nächsten Abschnitt 5.1.3 der Abdeckungsgrad im Fokus.

5.1.3 Abdeckungsgrad einer Karosseriebauanlage

In diesem Abschnitt 5.1.3 wird der Begriff Abdeckungsgrad aufgegriffen, der in Abschnitt 2.2.2 eingeführt worden ist. Der Abdeckungsgrad nach *VDI 3695* bezeichnet den Anteil standardisierter, wiederverwendbarer Artefakte von der Anzahl der Gesamtartefakte eines Entwurfes [VDI und VDE 2010c]. Die wiederverwendbaren Artefakte stehen anschließend für eine projektübergreifende Wiederverwendung zur Verfügung. Die restlichen Artefakte sind im Gegensatz dazu projektspezifisch, stehen nachfolgenden Projekten

deshalb grundsätzlich nicht zur Verfügung oder sind nicht speziell für die Wiederverwendung entworfen und müssen daher spezifisch angepasst werden. Einige projektspezifische Artefakte können über eine projektübergreifende Angleichung der Prämissen (z. B. Ausbringungsmenge, zu fertigende(s) Produkt/Teile, Mechanisierungsgrad, Komponentenauswahl, Fügefolge) in projektübergreifend wiederverwendbare Artefakte überführt werden. Besonders interessant für die Wiederverwendung im Karosseriebauentwurf sind Einheiten auf Ebene der *Arbeitseinheiten* (Ebene 5, Unterkapitel 4.2). Dieses Interesse lässt sich unter anderem mit zwei Aspekten begründen.

Erstens ist die Anzahl der vorhandenen Artefakte auf Ebene der Arbeitseinheiten im Vergleich zu den unteren Ebenen deutlich höher (vgl. Abbildung 38, Abschnitt 5.1.1). Das heißt, es ist eine größere Anzahl an potenziell wiederverwendbaren Artefakten vorhanden. Zudem verantwortet einen Großteil des Entwurfsprozesses der Ebene *Arbeitseinheit* ein Automobil-OEM selbst, während die unteren Ebenen mit feingranulareren Einheiten (Einheiten auf Ebene 1-3, Unterkapitel 4.2) in der Regel von externen Lieferanten funktionsfertig beschafft werden. Somit wird der Entwurfsprozess ebenfalls extern durchgeführt, was in der Folge dazu führt, dass die Artefakte des Entwurfes für den OEM nicht zugänglich, also wiederverwendbar sind. Analog der in der Abbildung 8 (Abschnitt 2.1.2) dargestellten ineinandergreifenden Wertschöpfungsprozesse zwischen Produktplanung und Fabrikplanung greifen auch die Prozesse des Anlagenentwurfes und des Komponententwurfes ineinander.

Ein zweiter Aspekt für die Fokussierung der Ebene *Arbeitseinheit* ist die im Untersuchungsrahmen bisher wenig ausgeprägte Standardisierung auf dieser Ebene und dem damit offenen Potenzial. Um diese Aussage treffen zu können, wurden die vorhandenen Richtlinien (RL), die beim Entwurf einer Karosseriebauanlage im Untersuchungsrahmen zu beachten sind, zusammengetragen. Anschließend wurden die identifizierten RL den definierten Hierarchieebenen zugeordnet, indem für jede RL die Auswirkung auf Einheiten der unterschiedlichen Ebenen bei Anwendung dieser Vorgaben geprüft worden ist. Die identifizierten RL wurden dann genau derjenigen Ebene zugeordnet, auf die sie jeweils die größte Auswirkung haben. Das Ergebnis der Analyse kann der folgenden Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Anzahl der internen Betriebsmittelrichtlinien für die Grob- und Detailplanung im Karosseriebauentwurf

		Anzahl der Richtlinien
7	Fertigungslinie	4
6	Fertigungsabschnitt	1
5	Arbeitseinheit	3
4	Arbeitsstation	7
3	Funktionsgruppe	12
2	Komponente.	15
1	Konstruktions- element	9

Die Analyse zeigt, dass auf den oberen Ebenen nur wenige Richtlinien für die projektübergreifende Wiederverwendung vorhanden sind. Der Entwurf der Einheiten auf den Ebenen 1-3 wird oft von externen Lieferanten durchgeführt und deshalb nicht im Detail betrachtet. Da die Gesamtverantwortung für den Entwurf und die Realisierung von Einheiten auf den Ebenen 4-7 größtenteils beim OEM liegt mit den entsprechenden Entwurfsaktivitäten, kann die projektübergreifende Wiederverwendung von Einheiten der Ebenen 4-7 positiv zur Verringerung des internen Aufwandes beitragen. Es kann des Weiteren die Annahme getroffen werden, dass je größer die Einheit ist, die wiederverwendet werden soll, desto höher der ökonomische Effekt ist, vor allem vor dem Hintergrund, dass eine größere Einheit aus kleineren Einheiten zusammengesetzt ist. Alle diese kleineren Einheiten werden in eigenen Entwurfsprozessen entworfen (analog Abbildung 8, Abschnitt 2.1.2), so dass bei der Wiederverwendung größerer Einheiten der Gesamtwert der Einheit zunimmt und somit auch das absolute ökonomische Potential größer wird. Dieser Aspekt würde für die Fokussierung von Einheiten der Ebenen 7 oder 6 bei der Wiederverwendung sprechen.

In dieser Arbeit wird jedoch in besonderem Maße die Wiederverwendung von Einheiten der Ebene 5 betrachtet. Das liegt zum einen daran, dass auf Ebene 5 mit drei Richtlinien im Vergleich zu den unteren Ebenen ebenfalls wenig Standardisierung vorhanden ist und

das Potenzial entsprechend hoch ist. Zum anderen steigt die Komplexität der Wiederverwendung von Einheiten höherer Ebenen durch die Zunahme der Anzahl der Entwurfsartefakte einschließlich der Anzahl ihrer Abhängigkeiten untereinander, was zu höherer Komplexität führt. Es wurde sich daher in dieser Arbeit entschieden, nicht den komplexesten Anwendungsfall zu untersuchen (Wiederverwendung von Einheiten der Ebene 7), sondern sich in einem Bottom-Up-Ansatz auf die Wiederverwendung in einem weniger komplexen Fall zu konzentrieren und die Durchführbarkeit dort in der Praxis zu zeigen. Damit wurden für die Arbeit die Einheiten der Ebene 5 für die Untersuchung der Wiederverwendung ausgewählt, da das Standardisierungspotenzial im Gegensatz zu Funktionsgruppen und Komponenten höher ist und die ausgewählte Ebene aufgrund der höheren Anzahl der Artefakte inkl. der Abhängigkeiten in Bezug auf die Komplexität „die nächsthöhere Stufe“ darstellt.

Der nächste Schritt in der Untersuchung ist die Analyse des Abdeckungsgrades. Diese Analyse einer Karosseriebauanlage (Ebene 5) ist entscheidend für die projektübergreifende Wiederverwendung. Mithilfe des Abdeckungsgrades wird der Anteil der Artefakte ermittelt, der in standardisierter Form vorliegt. Nur diese Artefakte können unverändert bei einem erneuten Entwurf in einem Nachfolgeprojekt projektübergreifend wiederverwendet werden. Alle anderen Artefakte sind individuell für die jeweils vorliegenden Projektanforderungen eines einzelnen Projektes entworfen und sind daher in jedem Entwurf neu zu entwerfen bzw. stark anzupassen. Dieser Fall tritt in einem *Engineered-to-Order-Entwurf* (für Begriffserläuterung siehe Kapitel 2) immer bei einzelnen Artefakten auf, da es sich nicht um einen Standardentwurf, dem *Engineered-to-Stock-Entwurf*, handelt. Ziel der Analyse des Abdeckungsgrades ist demnach, für die zu entwerfenden Anlagen im Untersuchungsrahmen den hier auftretenden Anteil standardisierter Artefakte von den Gesamtartefakten zu ermitteln. Damit wird analysiert, welches Potenzial eine Wiederverwendung in diesem speziellen Anwendungsfall hat und wie mit den Artefakten bei einer Wiederverwendung umgegangen werden muss – Wiederverwendung ohne Änderung oder Wiederverwendung mit zwingenden vorherigen Anpassungen an die Anforderungen des neuen Projektes.

Das in der Arbeit eingeführte Verfahren zur vereinfachten Analyse des Abdeckungsgrades basiert auf dem Aspekt, dass die Elemente aus denen sich eine Karosseriebauanlage zusammensetzt, aus Sicht des OEM eigentworfene mechatronische Einheiten oder zugekaufte Einheiten sein können. Die Artefakte eigentworfener Einheiten gehören dem OEM, während die Artefakte zugekaufter Einheiten in der Regel dem Lieferanten gehören. Der OEM tritt bei zugekauften Einheiten als Integrator auf, ohne die Artefakte wiederverwenden zu können. Eine weitere Option wäre die Beschaffung fremdgekaufter Einheiten inkl. der Nutzungsrechte an den Artefakten bzw. deren projektübergreifender Übertragung. Es ist aus diesem Grund wichtig zu analysieren, welche der drei Optionen im Einzelfall auftritt, d. h. welche Einheiten innerhalb einer Karosseriebauanlage eigentworfen sind, welche fremdbezogen werden bzw. an welchen fremdbezogenen Einheiten das Nutzungsrecht an den Artefakten vorhanden ist.

Da der OEM als Systemintegrator auftritt und die Einheiten zu einer Anlage zusammenstellt, werden in der Grob- und Detailplanung digitale Platzhalterelemente genutzt. Die realen Elemente besitzen später höchstwahrscheinlich eine andere physische Gestalt als die zuvor verwendeten Platzhalter. Diese werden nach der Konstruktionsphase durch die digitalen Abbilder der später realisierten Einheiten ersetzt. Die Abbildung 39 zeigt die Auswirkung dieses Vorgehens.

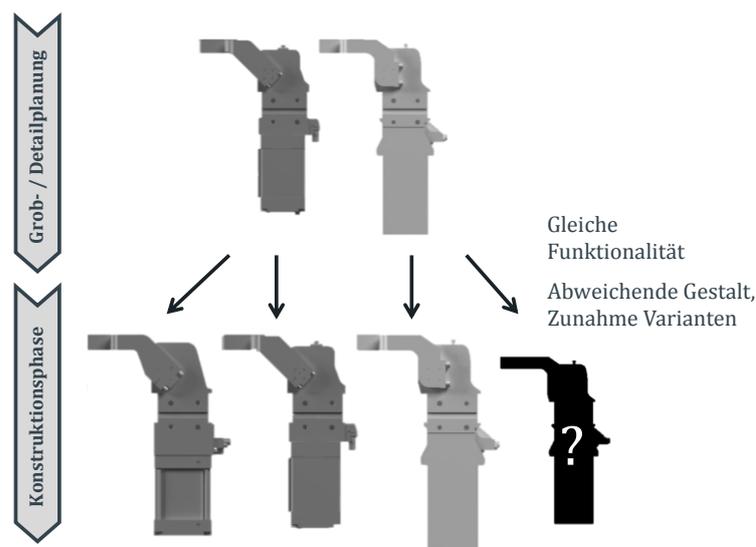


Abbildung 39: Digitale Platzhalter während der Phase der Grob- und Detailplanung

Für die Wiederverwendung bedeutet das, dass die Abbilder der später realisierten Einheiten verwendet werden sollten anstatt der Platzhalter, um den Anpassungsbedarf zu minimieren. Einige Einheiten weisen jedoch eine starke Abhängigkeit zum zu fertigenden Produkt auf. Diese Einheiten können im Grobentwurf, solange das zu fertigende Produkt nicht final konstruiert ist, nur als Platzhalter eingefügt werden.

Zum Thema Abdeckungsgrad sind demnach drei zu untersuchende Aspekte relevant, für die an dieser Stelle eine geeignete Untersuchungsmethode beschrieben wird. Die zu untersuchenden Aspekte sind im Einzelnen:

1. Eigenentwurf oder Fremdbezug
2. Bereits standardisierte Konstruktion vorhanden oder individuelle Neukonstruktion
3. Hohe Produktabhängigkeit/Gebäudeabhängigkeit oder Produktunabhängigkeit

Um diese drei Aspekte möglichst einfach untersuchen zu können, wird eine an das Delphi-Verfahren angelehnte Methode gewählt. Dabei wird eine Expertengruppe befragt und die Antworten anschließend in rückgekoppelten Schleifen in ein Endergebnis überführt. Den Ausgangspunkt bildet ein digitales 3D-Abbild der zu bewertenden Karosseriebauanlage, wie es bei der Nutzung digitaler Entwurfs-Werkzeuge erstellt wird. Als digitale Werkzeuge eignen sich u. a. *Process Designer* oder *Process Simulate*.

Zur Analyse der Komponenten wird die in der folgenden Tabelle 17 gezeigte Farbklassifizierung eingesetzt.

Tabelle 17: Untersuchungskriterien für Ermittlung des Abdeckungsgrades

Farbgebung	Kategorie des digitalen Planungsobjektes
Dunkelblau	Standardisiert: Jedem digitalen Planungsobjekt ist genau eine physische Lösung zugeordnet.
Hellblau	Standardisiert und über Parameter Variantenbildung: Jedem digitalen Planungsobjekt sind mehrere bekannte physische Lösungen zugeordnet.

Grün	Funktionsgleich: Jedem digitalen Planungsobjekt sind n bekannte (realisierte Lösungen) und m unbekannte (neu zu entwerfende Lösungen) zugeordnet. Die physische Gestalt wird während der Konstruktionsphase festgelegt und ist vorher nur über Referenzen abzuschätzen.
Orange	Funktionsgleich: Jedem digitalen Planungsobjekt sind m unbekannte (neu zu entwerfende Lösungen) zugeordnet. Die physische Gestalt wird während der Konstruktionsphase festgelegt und ist vorher nur über Referenzen abzuschätzen. Die Objekte stehen stark in Abhängigkeit mit dem zu fertigenden Produkt oder projektspezifischen Gegebenheiten. Die Anforderungen bedürfen einer projektspezifischen Lösung (z. B. physischen Gestalt) zur Realisierung der Anforderungen.

Die Komponenten der digitalen Anlage werden in der Folge durch die Experten eingefärbt. Auf diese Weise werden durch die vier Farben die drei oben genannten Untersuchungsaspekte einer Karosseriebauanlage herausgearbeitet. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung wird in der Abbildung 40 gezeigt.

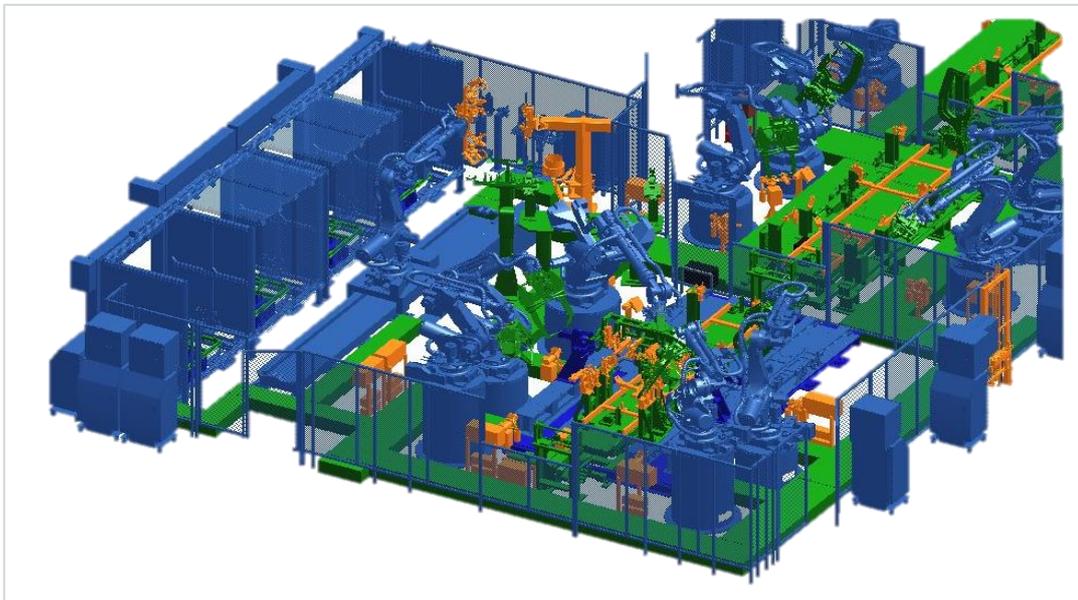


Abbildung 40: Untersuchung des Abdeckungsgrades einer Karosseriebauanlage

Es stellt sich heraus, dass eine Karosseriebauanlage (Ebene 5) bereits viele Standardkonstruktionen (Ebene 1-4) enthält. Die Entwurfsartefakte können deshalb auf Basis der vorhandenen Standardisierung wiederverwendet werden. Eine Karosseriebauanlage (Ebene

5) bildet jedoch ein größeres wiederverwendbares Objekt mit entsprechend höherer Anzahl an potenziell wiederverwendbaren Entwurfsartefakten. Wie in der Abbildung 40 deutlich wird, ist die Gesamtanlage u. a. durch eine Produkt- und Infrastrukturabhängigkeit nicht ohne weiteres vollständig standardisierbar, ohne die Flexibilität in Bezug auf Prämissen wie die Ausbringungsmenge oder die Varianz der zu fertigenden Produkte einzuschränken. Es hat sich folglich ein optimaler Abdeckungsgrad eingestellt, der durch das Verhältnis der blau eingefärbten Einheiten zur Anzahl der gesamten Einheiten berechnet werden kann.

Um eine projektübergreifende Wiederverwendung einer möglichst hohen Anzahl an Entwurfsartefakten zu ermöglichen, können Handlungsempfehlungen aus der Analyse abgeleitet werden (siehe Tabelle 18). Mit diesen Maßnahmen kann für eine ausgewählte Gruppe von Projekten eine projektübergreifende Wiederverwendung einer höheren Anzahl an Artefakten gelingen, da für diese Gruppe der Abdeckungsgrad gezielt durch Maßnahmen erhöht werden kann. Bildlich werden die orange und grün eingefärbten Einheiten in eine blaue Klassifizierung überführt, die für die einbezogenen Projekte übergreifend gültig ist.

Tabelle 18: Vorbereitende Maßnahmen für die optimale projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakte einer Karosseriebauanlage

Farbgebung	Handlungsempfehlung
Dunkelblau	Eine Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten dieser Objekte ist durch einen Standard sichergestellt. Es müssen keine Maßnahmen getroffen werden.
Hellblau	Eine Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten dieser Objekte ist durch Standards sichergestellt. Der Standard ist allerdings parametrisiert bzw. es sind Varianten vorhanden. Der Einsatz anderer Varianten in Nachfolgeprojekten kann eine Auswirkung auf das Anlagenlayout und damit auf die Wiederverwendbarkeit der Entwurfsartefakte haben. Der ausgewählte Standard sollte demnach projektübergreifend unverändert übernommen werden.

Grün	Eine projektübergreifende Wiederverwendung der Entwurfsartefakte kann nur bei projektübergreifender Festlegung der grün eingefärbten Objekte erfolgen. Dies trifft insbesondere auf zugekaufte Komponenten zu, die sich elektronisch und physisch unterscheiden können bei gleicher Funktionalität. Zur Wiederverwendung der Entwurfsartefakte sind die grün eingefärbten Objekte daher projektübergreifend abzustimmen und für diesen Umfang identisch zu übernehmen.
Orange	Die Gestaltung der Komponenten und die Wiederverwendung der Entwurfsartefakte hängen maßgeblich vom zu fertigenden Produkt und der Infrastruktur ab. Das Produkt ist entsprechend zu beeinflussen bzw. die Infrastruktur so anzupassen, dass die gleichen Objekte mit identischer Anordnung projektübergreifend eingesetzt werden können.

Diese Maßnahmen dienen zur Sicherstellung einer optimalen projektübergreifenden Wiederverwendung von Entwurfsartefakten. Die Entscheidung für die projektübergreifende Wiederverwendung der Entwurfsartefakte hängt neben dem Abdeckungsgrad von der Güte des projektübergreifenden Karosseriebauentwurfes ab. Aus Sicht eines konkreten Projektes wird der vorhandene Entwurf nur bei hinreichender Güte wiederverwendet. Der folgende Abschnitt 5.1.4 widmet sich diesem Thema.

5.1.4 Gütekriterien für ein Entwurfsergebnis

Zur Sicherstellung der Güte einer Einheit, die zur Wiederverwendung vorgesehen ist, ist zunächst das projektübergreifende Entwurfsergebnis (hier Karosseriebauanlage) dieser Einheit zu bewerten. Da die Karosseriebauanlage nicht unbedingt physisch realisiert worden ist, bevor die Daten bereits in weiteren Projekten wiederverwendet werden, kann die Gütebewertung nur anhand der digitalen Entwurfsartefakte erfolgen. Das Entwurfsergebnis des Erstentwurfs setzt sich aus der Gesamtheit der Beschreibungsdaten eines mechanisches Objektes (siehe Abbildung 23, Abschnitt 2.2.4) in ihrem aktuellsten Stand (siehe Abbildung 34, Abschnitt 5.1.1) zusammen.

Für die Bewertung der Güte kommen unterschiedliche Ansätze in Frage, die sich in Bezug auf die Anzahl der Kriterien und die Sichtweisen unterscheiden. Ein weitverbreiteter Ansatz für die ganzheitliche Bewertung der Leistung eines Unternehmens bzw. einer Organisation, d. h. die Berücksichtigung unterschiedlicher Sichtweisen, ist die *Balanced Scorecard* [Kaplan und Norton 1992], [Horvath und Kaufmann 1998]. Dabei werden vier Sichtweisen durch logische Beziehungen miteinander verknüpft. Für jede einzelne Sichtweise werden quantitative Kennzahlen definiert. Nach *Kaplan und Norton* [Kaplan und Norton 1992] sind vier effektive Sichtweisen die Finanzperspektive, die Prozessperspektive, die Kundenperspektive sowie die Lern- und Innovationsperspektive. Ziel ist es, nicht nur nach finanziellen Kennzahlen zu steuern, sondern eine ausgewogene, ganzheitliche Betrachtungsweise zu nutzen, die in „Balance“ (dt. Gleichgewicht) ist [Kaplan und Norton 1996].

Einen weiteren Ansatz zur Bewertung der Güte eines mechatronischen Systems liefern *Stallinger et al.* [Stallinger et al. 2011]. Mit dem Verfahren nach *Stallinger* lassen sich unterschiedlich komplexe mechatronische Einheiten bewerten. Das bedeutet übertragen auf die in dieser Arbeit eingeführten Hierarchiestufen, dass sich das Verfahren auf Objekte unterschiedlicher Hierarchieebene anwenden lässt. Dabei werden analog der *Balanced Scorecard* unterschiedliche Sichtweisen gebildet. Diesen Sichtweisen bzw. Hauptkriterien sind jeweils Subkriterien zugeordnet. Als Unterschied zur *Balanced Scorecard* sind diesen Subkriterien qualitative Kennzahlen zugeordnet. Damit kann die Güte von mechatronischen Einheiten sehr umfassend bewertet werden. Ein ähnliches Vorgehen ist in der *ISO/IEC-Norm 25010* [ISO/IEC 2011] zur Evaluation von Software-Qualität festgehalten, bei dem das Ziel ebenfalls eine möglichst umfassende Evaluation von immateriellen Entwurfsergebnissen ist, in dem Fall für den Bereich Software.

Die Kennzahlen in einem *Balanced-Scorecard*-System werden aufgrund des betriebswirtschaftlichen Ursprungs dieses Kennzahlensystems hingegen quantitativ erfasst. Vor dem Hintergrund des Untersuchungsumfeldes dieser Arbeit, in dem Investitionsentscheidungen für Anlagen auf quantitativen Kennzahlen basieren, wird der Einsatz von rein qualitativen Kennzahlensystemen an dieser Stelle nicht weiterverfolgt. Dieser Ausschlussgrund lässt jedoch keinen Rückschluss zu, ob quantitative Kennzahlensysteme zur

Bewertung der Güte eines mechatronischen Anlagenentwurfes generell besser geeignet sind.

Die unveränderte Übernahme der *Balanced Scorecard* in diese Arbeit wird nicht durchgeführt, da hier keine Unternehmensleistung oder ein Managementsystem bewertet wird. Hingegen wird der dortige Ansatz der vier Sichtweisen (Kunden, Finanzen, Prozesse, Lernen und Entwicklung) für diese Arbeit genutzt, um eine möglichst ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen. Da die Produktionsanlagen zur Wertsteigerung eines Produktionsbetriebes beitragen sollen und deren Realisierung durch die Stakeholder des Unternehmens unterstützt werden muss, werden die vier Perspektiven als relevant angenommen für die Güte einer Anlage. Im Rahmen einer dieser Dissertation zugeordneten Arbeit [Reinhard 2015] wurde beispielhaft für jede Sichtweise der *Balanced Scorecard* nach *Kaplan und Norton* jeweils eine Kennzahl definiert und im Rahmen einer Fallstudie erprobt. Die Beziehungen zwischen den Sichtweisen, die damit verbundenen Zielsetzungen und die konkreten Berechnungsformeln der Kennzahlen können der nachfolgenden Tabelle 19 entnommen werden.

Tabelle 19: Ausgewählte Kennzahlen zur Bewertung der Güte von Karosseriebauentwürfen unter Nutzung des *Balanced-Scorecard*-Konzeptes [Reinhard 2015]

Sichtweise	Zielsetzung	Kennzahlberechnung
Finanzperspektive	Niedrige Investitionen	$(1) \quad I\ddot{A} = \frac{\sum KI}{\sum F\ddot{A} * jph} [\text{€ } h]$ I \ddot{A} Investitionsäquivalent KI Kalkulatorischer Investitionsbedarf F \ddot{A} Fügeäquivalente jph jobs per hour
Prozessperspektive	Effiziente Roboter- und Mitarbeitereinsatz	$(2) \quad WL = \frac{\sum MBB * jph}{\sum W} \left[\frac{1}{h} \right]$ WL Werkerleistung MBB Anzahl manuell bewegte Bauteile W Anzahl Werker $(3) \quad FL = \frac{\sum F\ddot{A} * jph}{\sum R - \sum MR} \left[\frac{1}{h} \right]$ FL Fügeleistung R Anzahl der Roboter MR Anzahl der Messroboter

Kundenperspektive	Effiziente Flächennutzung	(4) $FLL = \frac{\sum F\ddot{A} * jph}{AHN} \left[\frac{1}{m^2h} \right]$ FLL Flächenleistung AHN Anlagenhauptnutzungsfläche
Lern- und Innovationsperspektive	Hoher Standardisierungsgrad/Hohe Wiederverwendbarkeit	(5) $SG = \frac{\sum EK}{\sum GK} * 100 [\%]$ SG Standardisierungsgrad EK Anzahl der erfüllten Kriterien GK Gesamtanzahl der Kriterien

Nach der Berechnung der Kennzahlen können die Werte gemeinsam in einem Spinnennetzdiagramm dargestellt werden. Die Achsenmaßstäbe unterscheiden sich zwischen allen fünf Achsen, ebenso die Einheiten der Achsen, entsprechend der Berechnungsformeln. Je nach unternehmensinterner Gewichtung der Kennzahlen können die Achsenmaßstäbe grundsätzlich frei definiert werden. Für einen Vergleich von zwei oder mehreren Entwurfsergebnissen müssen die Achsenmaßstäbe einmal festgelegt werden, damit eine Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Als Ergebnis der grafischen Darstellung entsteht eine Fläche, deren Inhalt ein Maß für die Güte darstellt.

Durch den Auftrag der berechneten Werte eines zweiten Karosseriebauanlagenentwurfs in dasselbe Diagramm können durch eine grafische Auswertung die Güten zweier Entwürfe verglichen werden. Die entstehende Fläche durch Verbindung der aufgetragenen Werte eines Entwurfes in das Diagramm ergibt schließlich eine Vergleichsgröße, wobei der Gesamtflächeninhalt ein Maß für die Entwurfsgüte darstellt. Damit können die zuvor gewählten vier Sichtweisen über die Kennzahlen grafisch zu einem Maß aggregiert werden. Eine solche grafische Auswertung wird in der Abbildung 41 gezeigt.

In der Abbildung ist das Entwurfsergebnis A dem Entwurfsergebnis B vorzuziehen, da die Fläche größer ist und folglich die Entwurfsgüte als höher zu bewerten ist. Für die projektübergreifende Wiederverwendung bedeutet das Resultat, dass das Entwurfsergebnis des Entwurfes A als Vorlage für nachfolgende Projekte dienen sollte, wenn sich die Funktionalität der Anlagenentwürfe A und B in Bezug auf das zu fertigende Produkt nicht unterscheidet.

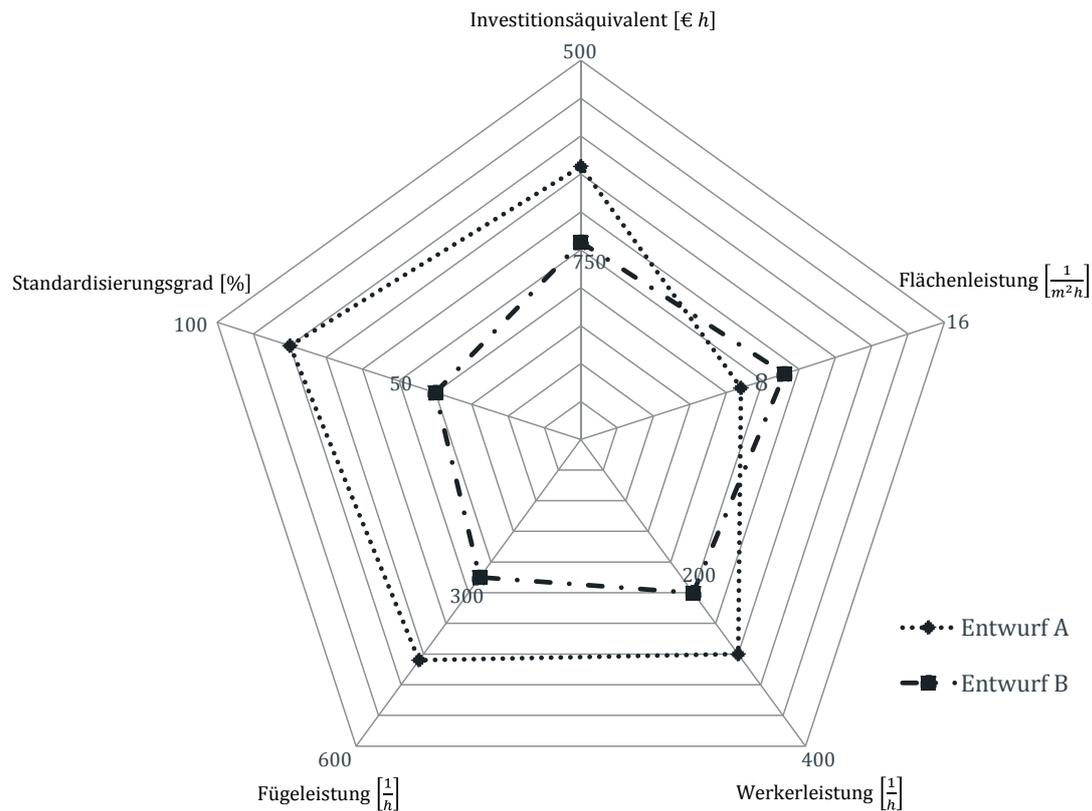


Abbildung 41: Grafische Auswertung der Güten zweier Karosseriebauanlagenentwürfe in Anlehnung an [Reinhard 2015]

Nach der Einführung einer Methode zur Gütemessung eines mechatronischen Objektes, speziell von Karosseriebauanlagen, wird im nächsten Abschnitt 5.1.5 die Abhängigkeit zwischen Hierarchieebenen, relevanten Entwurfsartefakten und den Entwurfsphasen analysiert. Diese Analyse ist wichtig, um für die Forschungsfragen 2 und 3 den Einfluss der Entwurfsphasen auf die Wiederverwendung von Einheiten untersuchen zu können und die relevanten Informationen für die *Verwaltungsschale* von *Industrie-4.0-Komponenten* aus Sicht der Artefaktwiederverwendung zu identifizieren.

5.1.5 Zuordnung von Artefakten zu Ebenen

Den Ausgangspunkt für die Untersuchung, auf welcher Hierarchieebene sich in Abhängigkeit der Entwurfsphase gut wiederverwendbare Einheiten befinden, bilden das erarbeitete Hierarchiemodell (Unterkapitel 4.2) in Verbindung mit den identifizierten Artefakten des Karosseriebauanlagen-Entwurfs (Abschnitt 5.1.1) und den identifizierten Beschrei-

bungsmitteln (Abschnitt 5.1.2). Die identifizierten Artefakte inkl. ihrer Beschreibungsmittel wurden einer Hierarchieebene zugeordnet. Auf diese Weise kann identifiziert werden, welche Artefakte relevant für die spezifischen *Industrie-4.0-Verwaltungsschalen* der Einheiten je Hierarchieebene sind. Durch die parallele Berücksichtigung der Entwurfsphase, in denen die Artefakte jeweils entstehen und in denen die Informationen der Artefakte genutzt werden, kann eine erste Aussage zu den Forschungsfragen 2 und 3 abgeleitet werden. Die Zuordnung von identifizierten Artefakten zu Hierarchieebenen und Entwurfsphasen wird aus dem Initialprojekt abgeleitet und wird damit in diesem Unterkapitel 5.1 betrachtet, in dem ausschließlich ein Entwurfsprojekt betrachtet wird. Die auf diese Weise klassifizierten Artefakte stehen anschließend bereit für die projektübergreifende Wiederverwendung, die später im Unterkapitel 5.2 behandelt wird.

Durch die Gliederung anhand der zwei Dimensionen Entwurfsphase und Hierarchieebene entspricht das Vorgehen dem in Unterkapitel 4.5 vorgestellten Lösungskonzept. Durch Fokussierung auf den Karosseriebauentwurf wird das 3D-Lösungskonzept aus Abbildung 35 (Unterkapitel 4.5) durch Auswahl der entsprechenden Organisationseinheit in ein 2D-Konzept überführt (siehe Abbildung 36, Unterkapitel 4.5).

Das Ergebnis der erfolgten Zuordnung wird in der Abbildung 42 gezeigt. Dabei sind die einzelnen Artefakte zur besseren Übersichtlichkeit zu Artefaktklassen zusammengefasst. Es wird deutlich, dass ein Großteil der Artefakte nicht genau einer Hierarchieebene zugeordnet werden kann. Einer der Gründe dafür sind die eingesetzten digitalen Werkzeuge. Diese besitzen häufig Bibliotheken mit vordefinierten Standardbausteinen, aus denen größere Einheiten zusammengesetzt werden. Damit werden mindestens zwei Ebenen mit einem Werkzeug abgedeckt. Im Falle von CAD-Werkzeugen ist die entsprechende Artefaktklasse sogar fünf Ebenen zugeordnet. Durch die Leistungsfähigkeit dieser digitalen Werkzeuge lassen sich sowohl einfache mechanische Konstruktionselemente als auch komplexe mechanische Arbeitseinheiten entwerfen.

Weiterhin zeichnet sich das charakteristische *V-Modell* nach *VDI 2206* (siehe Abbildung 6, Abschnitt 2.1.1) in der Abbildung 42 ab. Es ist weniger stark ausgeprägt als in der Theorie, allerdings beschränkt sich die hier gemachte Zuordnung auf die Entwurfsphase, wohin-

gegen das *V-Modell* mit dem Betrieb abschließt. Der rechte Ast des „V“ prägt sich bei Ausweitung des zeitlichen Betrachtungsraumes weiter aus, ist hier jedoch aufgrund der Fokussierung weggelassen. Deutlich zu erkennen ist hingegen der linke Ast des „V“, kommend vom Blocklayout bis hin zur feingranularen, mechanischen und elektrischen Konstruktion.

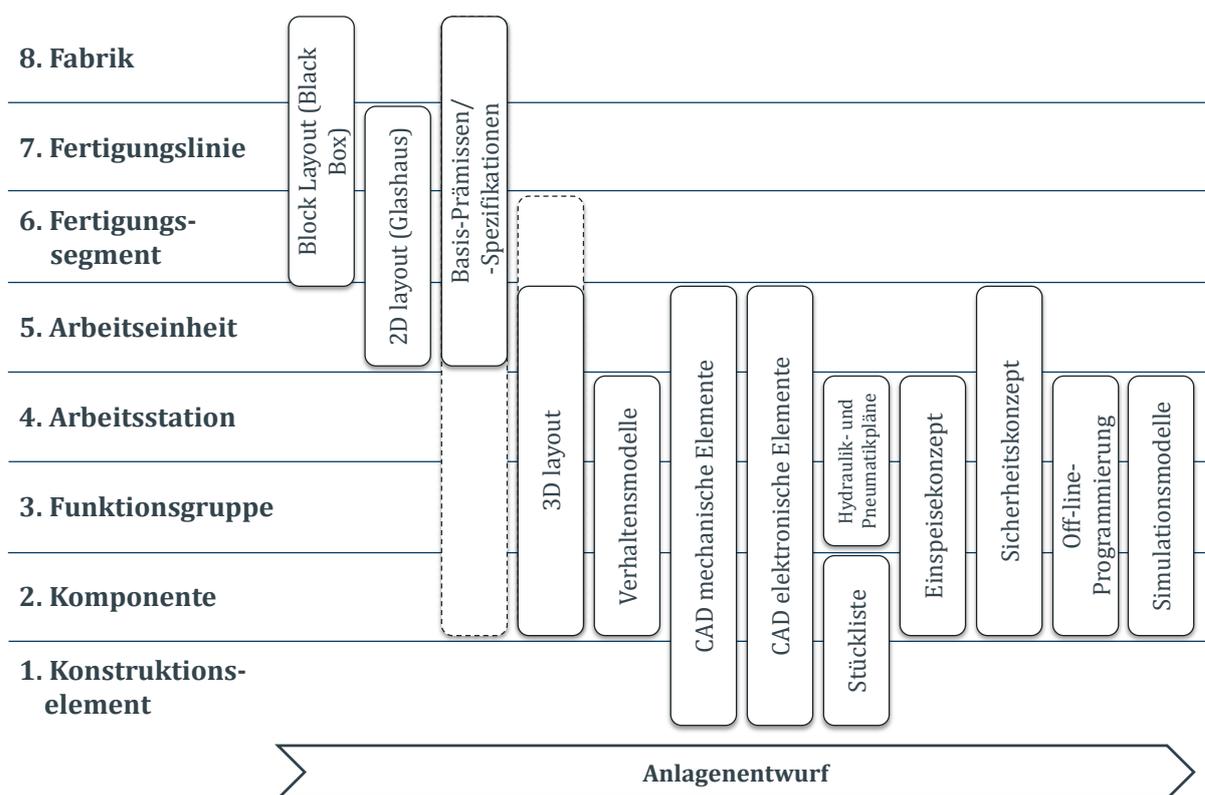


Abbildung 42: Zuordnung von identifizierten Artefaktklassen zu Entwurfsphasen und Hierarchieebenen

Werden die einzelnen Hierarchieebenen getrennt voneinander betrachtet, führt dies zu spezifischen „Artefaktpaketen“, die zur Beschreibung von Objekten auf den jeweiligen Ebenen notwendig sind. Das heißt, als Erweiterung des Konzeptes des mechatronischen Objektes (Abbildung 23, Abschnitt 2.2.4) ist dieses Konzept jetzt um die Beziehung zwischen Beschreibungsmitteln und Hierarchieebenen von Objekten ergänzt worden. Die Herstellung der Beziehung zwischen Beschreibungsmitteln inkl. der enthaltenen Informationen und der Hierarchieebenen berücksichtigt zugleich das Konzept der *Verwaltungsschalen* von *Industrie-4.0-Komponenten* (Abbildung 24, Abschnitt 2.2.5). Durch die durchgeführte Analyse können die relevanten Informationen für die *Verwaltungsschalen* der *Industrie-4.0-Komponenten* in Abhängigkeit der Granularität der Objekte eingegrenzt

werden. Damit ist das Konzept des „Gegenstandes im Gegenstand“ befolgt, welches vorsieht, die Informationen auf dezentralen *Verwaltungsschalen* abzulegen, zugeordnet zu den mechatronischen Objekten, zu denen die Informationen jeweils gehören (vgl. [Plattform Industrie 4.0 2017]).

Diese für die *Verwaltungsschalen* als relevant identifizierten Informationen bilden den Ausgangspunkt für die Beantwortung der Forschungsfrage 3. Die vorhandenen Informationen, die der *Verwaltungsschale* eines Objektes zugeordnet werden, stehen einer projektübergreifenden Wiederverwendung potenziell zur Verfügung. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Informationen letztendlich auch wirtschaftlich wiederverwendet werden können, z. B. aufgrund von starkem Anpassungsbedarf der vorhandenen Artefakte als Resultat einer Änderung der benötigten Produktionskapazität der Anlage.

Den neun Hierarchieebenen eines Produktionssystems können für den analysierten Fall des Karosseriebauentwurfes folgende charakteristische Artefaktklassen zugeordnet werden (siehe Tabelle 20):

Tabelle 20: Als relevant identifizierte Artefaktklassen je Hierarchieebene eines Karosseriebau-Produktionssystems aus Sichtweise der Entwurfsphase [Hell et al. 2016]

Hierarchieebene	Artefaktklasse
9. Produktionsnetzwerk	Ökonomische und technische Vorgaben und Restriktionen (Entwurfsprämissen)
8. Fabrik	Ökonomische und technische Vorgaben und Restriktionen (Entwurfsprämissen), Blocklayout, Logistikkonzept
7. Fertigungslinie	2D-Layouts, Grobspezifikation, Blocklayouts
6. Fertigungssegment	2D-Layouts, Grobspezifikation, Blocklayouts
5. Arbeitseinheit	Grobe Verhaltensmodelle, 2D-Layouts, 3D-Layouts, mechanische und elektrische Spezifikationen, Sicherheitskonzepte
4. Arbeitsstation	Grobe und detaillierte Entwurfsinformationen wie: Grobe und detaillierte Verhaltensmodelle, 3D-Pläne, 3D-Layouts, mechanische und elektrische Spezifikationen, Steuerungsprogramme, Pneumatik- und Hydraulikpläne, Versorgungskonzepte, Sicherheitskonzepte, Simulationsmodelle
3. Funktionsgruppe	Grobe und detaillierte Verhaltensmodelle, 3D-Layouts, mechanische und elektrische Spezifikationen, Steuerungsprogramme, Pneumatik- und Hydraulikpläne, Versorgungskonzepte, Sicherheitskonzepte, elektronische Konstruktion, detaillierte Simulationsmodelle
2. Komponente	Spezifikationen, Fügeinformationen, Spannkonzepete, 3D-Layouts, Stücklisten, mechanische und elektrische Spezifikationen, CAD-Konstruktionen, Steuerungsprogramme, Versorgungskonzepte, Sicherheitskonzepte, elektronische Konstruktion, detaillierte Verhaltensbeschreibungen, Simulationsmodelle

1. Konstruktionselement	Detaillierteste Informationen: Mechanische und elektrische Spezifikationen, CAD-Konstruktionen, Stücklisten
-------------------------	---

Die getrennte Betrachtung der Ebenen der jeweiligen Objekte und der zugehörigen Informationen im Sinne ineinander geschachtelter *Industrie-4.0-Komponenten* (Abbildung 24, Abschnitt 2.2.5) kommt jedoch nicht ohne weitere Anforderungen aus. Es konnte hier gezeigt werden, dass eine Vielzahl an Informationen gleichzeitig in den *Verwaltungsschalen* mehrerer Ebenen vorhanden sein muss. Eine Zuordnung zu genau einer Ebene konnte nicht durchgeführt werden. Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit der Informationen mehrerer Ebenen, d. h. eine Abhängigkeit zwischen Informationen in *Verwaltungsschalen* unterschiedlicher Granularität. Zusätzlich ergeben sich durch die chronologischen Entstehungs- und Verwendungszeitpunkte der Informationen (siehe Abbildung 42) Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen.

In Abbildung 43 sind die untereinander vorliegenden Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den in der Prozessanalyse identifizierten Artefakten (Abschnitt 5.1.1) über den chronologischen Entwurfsverlauf aufgetragen und die inhaltlich-logischen Abhängigkeiten durch Verbindungslinien dargestellt.

Deutlich sichtbar wird vor allem die Bedeutung der anfänglichen Prämissen (ökonomische und technische Vorgaben und Restriktionen), die mit vielen anderen Artefakten in Wechselwirkung stehen. Da die Prämissen allerdings zeitlich früh im Entwurfsprozess definiert werden, sind sie als verbindliche Vorgaben für die in einem inhaltlich-logischen Zusammenhang stehenden weiteren Artefakte anzusehen. Für die projektübergreifende Wiederverwendung sind die Prämissen demnach ein wichtiger Aspekt, um die vielen abhängigen Artefakte möglichst unverändert, projektübergreifend wiederverwenden zu können.

Eine weitere Anforderung, die sich aus der Untersuchung ergibt, ist die Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den Informationen in den *Verwaltungsschalen* verschiedener Hierarchieebenen. Es bedarf einer transparenten Änderungsverfolgung bzw. der Nachvollziehbarkeit der Auswirkung einer Artefaktänderung auf andere Artefakte. Das bedeutet, dass die Informationen aus Tabelle 20 zwar nach Hierarchieebenen aufgeteilt werden können, die logischen Abhängigkeiten aber modelliert werden sollten.

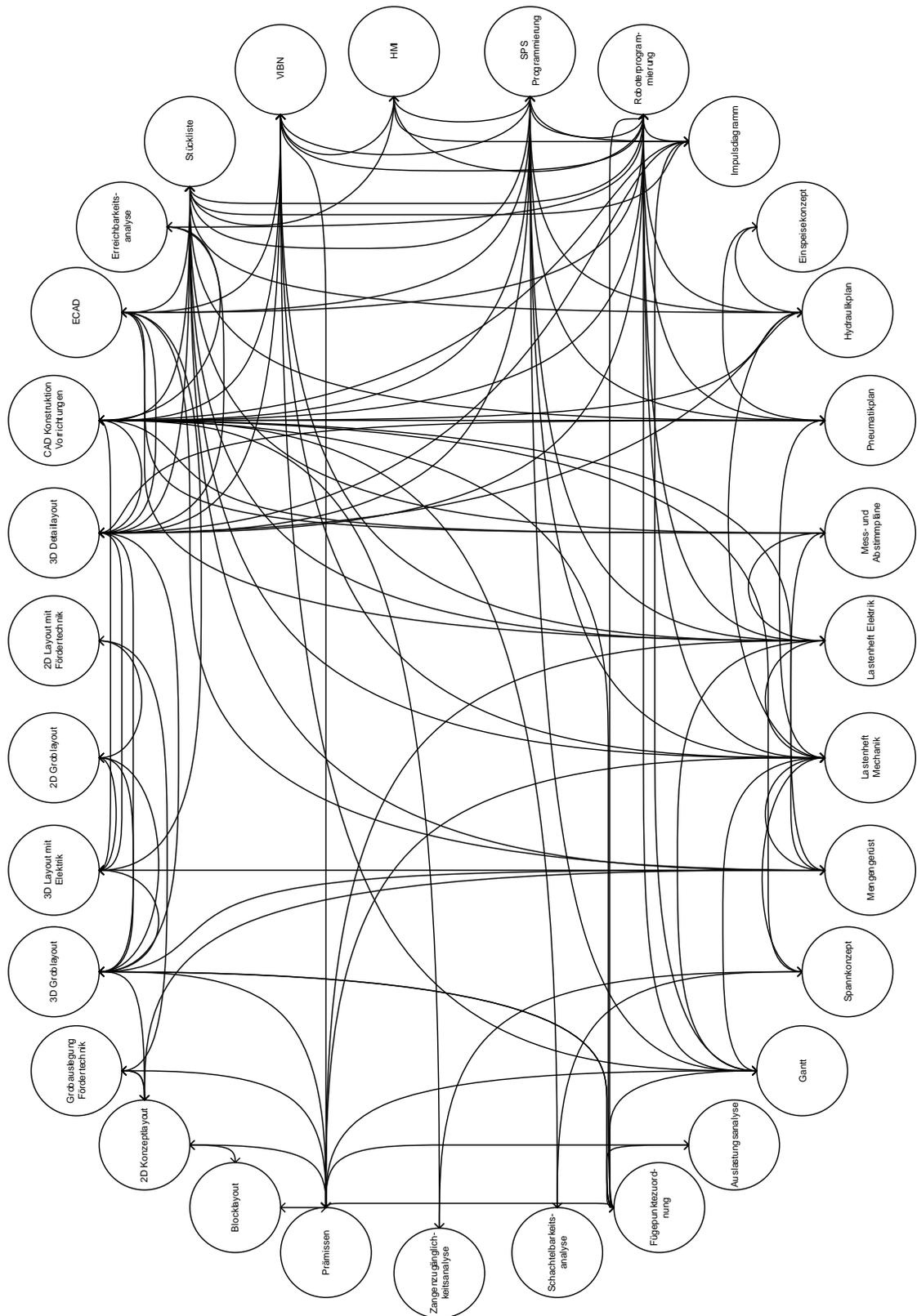


Abbildung 43: Zeitlich-logische und inhaltlich-logische Abhängigkeiten zwischen identifizierten Artefakten [Hell et al. 2016]

Des Weiteren kann in der Abbildung 43 die zunehmende Anzahl an inhaltlichen Beziehungen zwischen den Artefakten bei fortschreitendem Entwurfsprozess beobachtet werden. Parallel dazu nimmt die Hierarchieebene der zu entwerfenden Objekte mit fortschreitendem Entwurfsprozess der Gesamtkarosseriebauanlage ab (siehe Abbildung 42). Die zu entwerfenden Objekte werden folglich granularer, der Detaillierungsgrad der Informationen nimmt zu, ebenso nehmen die Abhängigkeiten zwischen den Informationen zu, was zu steigender Komplexität führt (vgl. [Ulrich und Probst 1991]). Ein Ansatz zur Komplexitätsbeherrschung wäre hier eine Modularisierung nach [Simon 1962], indem Module bzw. Einheiten abgegrenzt werden, die starke interne Beziehungen besitzen und wenig schwache Beziehungen zu anderen Modulen aufweisen (siehe auch Abschnitt 2.1.1). Als Abgrenzung zur Modularisierung werden in dieser Arbeit aber keine physischen mechatronischen Module identifiziert (vgl. *Design Structure Matrix* [Browning 2001]), sondern wiederverwendbare Einheiten für den Planungsprozess auf unterschiedlichen Hierarchieebenen in Abhängigkeit des Entwurfsfortschrittes identifiziert. Damit werden die Artefakte, die höheren Hierarchieebenen (Ebene 4-9, Tabelle 20) zugeordnet worden sind, mit berücksichtigt. Diese Artefakte können ebenfalls potenziell projektübergreifend wiederverwendet werden und sind daher nicht zu vernachlässigen.

5.1.6 Zusammenfassung Wiederverwendung innerhalb eines Projektes

Im Unterkapitel 5.1 wurde das Lösungskonzept, das im Kapitel 4 entwickelt worden ist, ausdetailliert. Ziel ist die Operationalisierung des Konzeptes für die projektübergreifende Wiederverwendung. Zur systematischen Ableitung der Anforderungen und zur systematischen Ausdetaillierung wurde das Kapitel 5 in zwei Unterkapitel aufgeteilt. Dies erfolgte anhand von definierten Referenzfällen der Wiederverwendung von Artefakten im Entwurfsprozess. Im vorliegenden Unterkapitel 5.1 wurden die Erkenntnisse für das Lösungskonzept aus dem *Referenzfall A: Wiederverwendung innerhalb eines Projektes* abgeleitet.

In Abschnitt 5.1.1 wurde zunächst mithilfe der *4D-Methode* zur Evaluation von Entwurfsprozessen nach [Schäffler et al. 2013] der Entwurfsprozess im Untersuchungsrahmen mit dem Fokus auf dem Informationsfluss und auf den entstehenden Artefakten ausgewertet.

Als Ergebnis konnte der Anlagenentwurfsprozess detailliert beschrieben werden. Auf Basis dieser detaillierten Analyse wurden in Abschnitt 5.1.2 die im Einsatz befindliche digitale Werkzeugkette herausgearbeitet. Als Ergebnis konnten die Beschreibungsmittel der im Entwurfsprozess identifizierten Informationsartefakte aufgelistet und den Entwurfsphasen zugeordnet werden. Deutlich zu erkennen war die Zunahme von Beschreibungsmitteln mit dem Entwurfsfortschritt. Die Zunahme bezieht sich sowohl auf die Menge als auch auf die notwendige Varietät der Beschreibungsmittel. Diese Tatsache ergibt sich zwangsweise anhand der entstehenden unterschiedlichen Informationen, die codiert werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Tabellen und Textformaten für zahlreiche Informationen in der Konzeptphase, wohingegen in der Konstruktionsphase viele spezielle Werkzeuge eingesetzt werden, die die Informationen in spezifischen Beschreibungsmitteln codieren. Zu nennen sind hier in erster Linie CAD-, Simulations- und Prozessplanungswerkzeuge. Zur Wiederverwendung der Artefakte ist als Anforderung das Vorhandensein spezieller Entwurfs-Werkzeuge oder passender Importer zur digitalen Verarbeitung der vorhandenen Artefakte zwingend erforderlich. Mit zunehmendem Planungsfortschritt nimmt die Anzahl an benötigten Werkzeugen zu.

In Abschnitt 5.1.3 wurde eine Methode zur einfachen Bestimmung des Abdeckungsgrades vorgestellt. Ziel war es, einen fertigen Karosseriebauanlagen-Entwurf dahingehend zu analysieren, inwiefern die mechatronischen Objekte, aus denen sich eine konkrete Anlage zusammensetzt, standardisiert und damit wiederverwendbar sind. Es konnte gezeigt werden, dass sich eine Anlage aus standardisierten, produktunabhängigen Objekten, aus funktionsgleichen bzw. konzeptgleichen Objekten und produktabhängigen Objekten zusammensetzt. Soll der vollständige Anlagenentwurf für eine projektübergreifende Wiederverwendung eingesetzt werden, dann sind diese Artefakte der Objekte gezielt nutzbar zu machen. Beispielsweise können die Artefakte funktionsgleicher Objekte für definierte Projekte mechatronisch identisch eingesetzt werden, ebenso können die Artefakte produktabhängiger Objekte durch gezielte Produktbeeinflussung zumindest für definierte Projekte wiederverwendbar gemacht werden. Für die grün und orange eingefärbten Komponenten führt demnach ein Feedback an die Fahrzeugentwicklung zu einer Steigerung der Wiederverwendbarkeit dieser Anlagenkomponenten.

Als nächster Schritt wurde in Abschnitt 5.1.4 eine Methode zur vergleichenden Bewertung der Güte von Anlagenentwürfen vorgestellt. Das Kennzahlensystem wurde aus dem betriebswirtschaftlichen *Balance-Scorecard-Ansatz* abgeleitet und zeichnet sich durch eine Übernahme der multi-perspektivischen Sichtweise aus. Die Gütebewertung eines Entwurfes ist wichtig für die Entscheidung des Rückgriffes auf vorhandene Entwürfe, wenn über eine Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten entschieden werden soll. Die Vorteilhaftigkeit des vorhandenen Entwurfes gegenüber neuen Entwürfen/Konzepten muss spätestens zu diesem Zeitpunkt nachvollziehbar dargelegt werden.

In Abschnitt 5.1.5 erfolgte dann als letzte Auswertung des *Referenzfalls A* die Zuordnung der identifizierten Artefakte mithilfe der in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten Prozessanalyse zu dem in dieser Arbeit definierten Hierarchieebenenmodell in Abhängigkeit des Entwurfsfortschrittes. Damit wurde das Lösungskonzept für die Wiederverwendung aus Kapitel 4 mit den identifizierten Informationen angereichert, die innerhalb eines Karosseriebauanlagentwurfes entstehen bzw. notwendig sind. Folglich ist das Lösungskonzept mit potenziell wiederverwendbaren Informationspaketen erweitert, die durch die Rasterung des Konzeptes abgrenzbar gemacht worden sind.

Im Unterkapitel 5.1 wurden damit diverse Anforderungen und Erkenntnisse für die projektübergreifende Wiederverwendung abgeleitet durch Analyse des Entwurfsprozesses eines einzelnen Projektes. Zudem wurde die gesamte Artefaktmenge beschrieben, die potenziell im Entwurfsprozess wiederverwendet werden kann. Als nächster Schritt soll darauf eingegangen werden, dass nicht zu jedem Zeitpunkt im Entwurf diese gesamte Artefaktmenge sinnvoll wiederverwendet werden kann, sondern je nach Aktivität relevante Informationen identifizierbar sind. Zudem können die Informationen sinnvoll auf Einheiten verschiedener Hierarchieebenen bzw. auf deren *Verwaltungsschalen* verteilt werden. Um diesen Gedanken deutlich zu machen, wird an dieser Stelle erneut auf das Konzept der *I4.0-Komponente* zurückgegriffen. Wie in der Abbildung 44 gezeigt wird, treten *I4.0-Komponenten* ineinander geschachtelt auf. Damit stehen die immateriellen Artefakte der Komponenten verschiedener Hierarchieebenen in Abhängigkeiten zueinander. In Folge dessen sind für die jeweiligen *Verwaltungsschalen* einer Hierarchiestufe nicht alle Artefakte relevant; es wird stattdessen mit Referenzen gearbeitet, um auf die primäre Daten-

quelle zu verweisen. Es stellt sich die Frage nach den relevanten Informationen in Abhängigkeit der Hierarchieebene, also welche immateriellen Artefakte primär in eine Verwaltungsschale welcher Hierarchieebene abgelegt werden sollen.

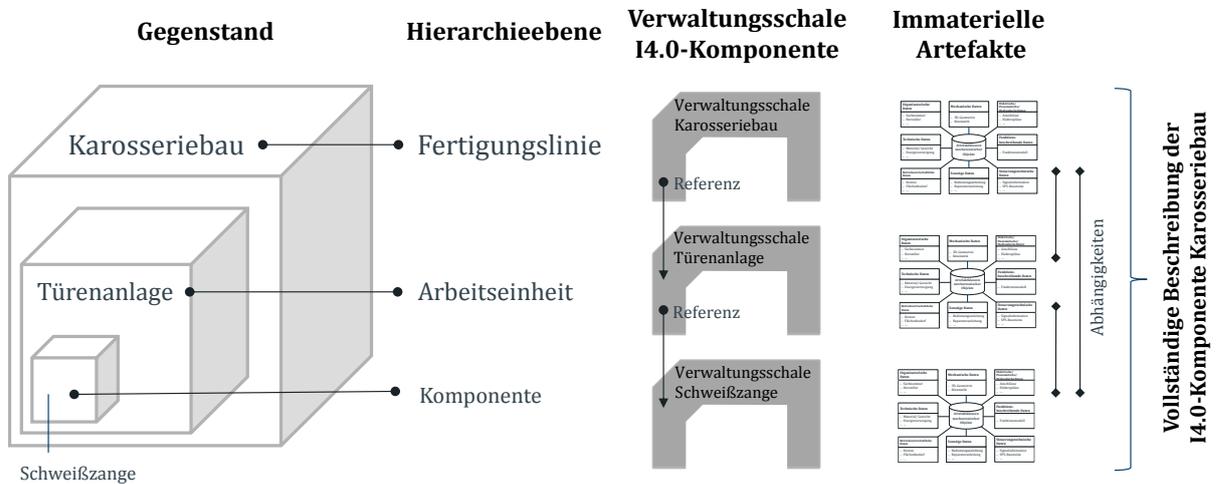


Abbildung 44: Beziehungen zwischen ineinander geschichteten I4.0-Komponenten, basierend auf [Plattform Industrie 4.0 2017]

In Unterkapitel 5.2 folgt zur Vervollständigung der Untersuchungen die Ausdetaillierung des Lösungskonzeptes für die projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten aus Erkenntnissen der Analyse des *Referenzfalls B: Projektübergreifende Wiederverwendung*. Dazu wird die Abbildung 44 inhaltlich aufgegriffen. Es werden die relevanten Informationen identifiziert, die für die jeweiligen *Verwaltungsschalen* einer Hierarchieebene in Abhängigkeit der Entwurfsphase von Bedeutung sind.

5.2 Referenzfall B: Projektübergreifende Wiederverwendung

Nach der Ausdetaillierung des Lösungskonzeptes zur Systematisierung der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf mithilfe von Untersuchungen im *Referenzfall A: Wiederverwendung innerhalb eines Projektes*, wird nun der *Referenzfall B: Projektübergreifende Wiederverwendung* (siehe Abbildung 28, Unterkapitel 3.2) in Bezug auf die projektübergreifende Wiederverwendung untersucht.

Dazu werden in Abschnitt 5.2.1 die Ergebnisse aus Unterkapitel 5.1, genauer die identifizierten Artefakte und die Strukturierung dieser, genutzt, um relevante Hierarchieebenen

und Informationen herauszuarbeiten. In Abschnitt 5.2.2 wird auf die Entstehungs- und Verwendungszeitpunkte von Informationsartefakten aus projektübergreifender Sichtweise eingegangen. Dieser Aspekt ist wichtig, um die Übertragung der Wiederverwendung innerhalb eines Projektes auf ein projektübergreifendes Wiederverwendungskonzept sicherzustellen. In einem ersten Projekt entstehen Informationen zu festen Zeitpunkten. Die Fragestellung ist jedoch, zu welchen Zeitpunkten in nachfolgenden Projekten diese Informationen sinnvoll wiederverwendet werden können. Der Entstehungszeitpunkte in Vorgängerprojekten und die Wiederverwendungszeitpunkte in Nachfolgeprojekten können im Vergleich abweichen.

In Abschnitt 5.2.3 wird die Auswahl der vorhandenen Artefakte für ein Nachfolgeprojekt thematisiert. Die Fragestellung ist hierbei, nach welchen Kriterien die vorhandenen Informationen in Abhängigkeit der Projektprämissen zur Wiederverwendung ausgewählt werden sollten. In Abschnitt 5.2.4 wird anschließend näher auf die notwendige Dokumentation für eine effiziente projektübergreifende Wiederverwendung eingegangen. Hier werden in erster Linie Anforderungen an ein Änderungsmanagement und eine Nutzungsdokumentation ermittelt. Es folgt der Abschnitt 5.2.5, in dem die Durchführung der projektübergreifenden Wiederverwendung im Untersuchungsrahmen fokussiert wird. In Abschnitt 5.2.6 wird als letzte Thematik des Unterkapitels die Erfolgs- und Nutzenmessung vorgestellt, die die Vorteilhaftigkeit der projektübergreifenden Wiederverwendung im Untersuchungsrahmen bestätigen kann. Im Anschluss an dieses Unterkapitel folgt das Kapitel 6, in dem das Konzept sowie insbesondere die entwickelten Lösungen zur Beantwortung der Forschungsfragen validiert werden.

5.2.1 Ebenen und relevante Informationen

Auf Basis der durchgeführten Zuordnung der identifizierten Artefakte inkl. der Informationen zu Betriebsmittelhierarchien (siehe Abbildung 45) soll nun die Relevanz der Informationen für die projektübergreifende Wiederverwendung analysiert werden. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie das „befüllte“ Lösungskonzept, nach der Zuordnung der Artefakte in Abschnitt 5.1.5, dafür genutzt werden kann, die systematische projektübergreifende Wiederverwendung zu unterstützen. Die Abbildung 45 entsteht durch in-

haltliche Abstraktion der Abbildung 44, indem die relevanten Artefakte je Hierarchieebene sichtbar gemacht werden unter Berücksichtigung ineinander geschachtelter *I4.0-Komponenten* mit vorhandenen Artefaktabhängigkeiten.

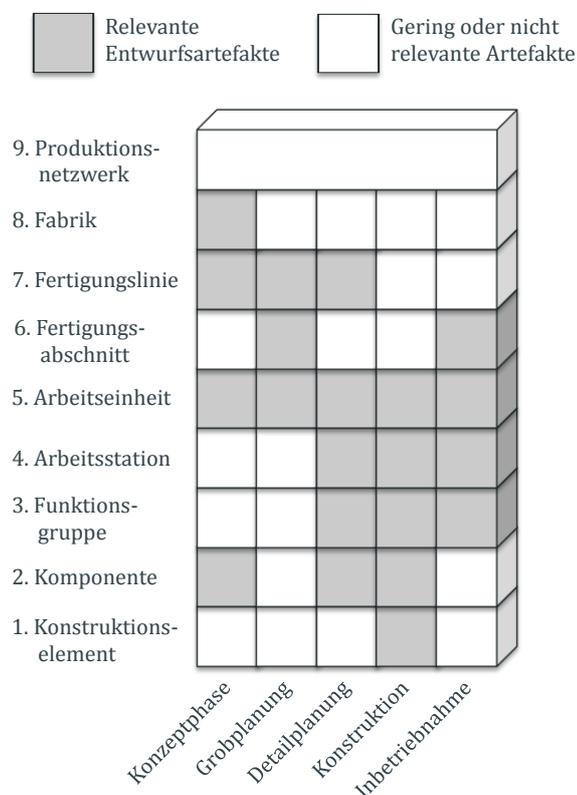


Abbildung 45: „Befülltes“ Lösungskonzept als Ausgangsbasis der Entwicklung eines Erklärungsmodells für die projektübergreifende Wiederverwendung, in Anlehnung an [Hell und Lüder 2016]

Wie aus der Abbildung 45 ersichtlich wird, sind jeder Ebene identifizierte Artefakte mit den beinhaltenden Informationen zugeordnet worden. Durch dieses Vorgehen konnten, in Anlehnung an das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente*, die notwendigen Informationen ermittelt werden, die in den *Verwaltungsschalen* der Einheiten in Abhängigkeit der Ebene vorhanden sein müssen, um einen Karosseriebauanlagenentwurf durchführen zu können. Diese in den *Verwaltungsschalen* notwendigen Entwurfsinformationen stehen demnach auch für eine Wiederverwendung zur Verfügung.

Wird der Blick auf die senkrechten Einteilungen in der Abbildung 45 gerichtet, die sich durch die Phaseneinteilung ergeben, dann können für jede Phase die für den Entwurf zwingend notwendigen und damit vorhandenen Informationen angegeben werden. Als

Ergebnis stellt sich heraus, dass für jede Entwurfsphase Informationen aus unterschiedlichen Ebenen bzw. *Verwaltungsschalen* benötigt werden. Diese Informationen unterscheiden sich zugleich deutlich bezüglich der Aktivität im Entwurfsprozess, für die sie jeweils benötigt werden, im Dateiformat, in dem sie jeweils vorliegen und in der automatisierbaren Verarbeitung der Informationen, die wiederum in direkter Abhängigkeit zu den Dateiformaten steht. Aus Sicht einer einzelnen Entwurfsphase, wie der Konzeptphase, wird keine vollständige, virtuelle Repräsentation (vgl. Abbildung 23, Abschnitt 2.2.4) der gesamten mechatronischen Karosseriebauanlage benötigt. In der Abbildung 45 sind genau die Artefaktklassen markiert, die wiederverwendet werden können, da sie für die durchzuführenden Entwurfsaktivitäten je Phase als Eingangsinformationen verwendet werden. Nach [Sametinger 1997] führe eine Auflistung nicht benötigter Informationen für die phasenbezogene Wiederverwendung zu einer Ineffizienz bei der Wiederverwendung, da der Anwender durch die Überinformation mit irrelevanten Daten behindert werden könne. Diese entwurfsphasengerechte Informationsbereitstellung kann erzielt werden mit den Konzepten der *White-Box*-, *Glass-Box*- oder *Black-Box-Darstellung* der Einheiten und der entsprechenden Art der Wiederverwendung [Sametinger 1997]. Am Beispiel eines Layouts bedeutet dieser Aspekt, dass in einer *White-Box-Darstellung* alle internen Strukturen mit abgebildet werden und somit verändert werden können. Der Informationsgehalt ist vergleichsweise hoch [Sametinger 1997]. Im Gegensatz dazu werden bei einer *Glass-Box-Darstellung* die internen Strukturen und Schnittstellen abgebildet, lassen sich aber nicht ändern oder bearbeiten. Die Wiederverwendung erfolgt demnach unverändert. Daher muss in der Folge die Peripherie angepasst werden, um eine Interoperationalität sicherzustellen [Sametinger 1997]. Bei der *Black-Box-Darstellung* werden die internen Strukturen nicht mit abgebildet, sondern nur die äußeren Schnittstellen. Der Nutzer bekommt jedoch die Information, dass die Einheit eine bestimmte Funktionalität erfüllt. Die Artefakte lassen sich nur unverändert wiederverwenden mit entsprechender Gestaltung der Peripherie, um eine Interoperationalität zu garantieren [Sametinger 1997].

Auf diese Weise lässt sich dieselbe Einheit einer Ebene je nach Entwurfsphase, in der sie wiederverwendet werden soll, unterschiedlich detailliert darstellen. Je nach zu unterstüt-

zender Aktivität können auch Mischformen verwendet werden. Eine einzige Darstellungsweise je Entwurfsphase, also eine senkrechte Artefaktmenge des Rasters in Abbildung 45 bzw. eine horizontale Artefaktmenge, also die Betrachtung Einheiten einzelner Ebenen, ist nicht ausreichend für eine ganzheitliche Wiederverwendung während des Entwurfsprozesses einer Karosseriebauanlage. Daraus lässt sich die Anforderung ableiten, dass die Artefakte eines Anlagenentwurfes für die Wiederverwendung in definierten Aktivitäten gezielt aufbereitet werden müssen. Für den hier betrachteten Fall ergibt sich die sinnvolle Modulbeschreibung direkt aus den grau markierten Feldern in der Abbildung 45.

Als nächster Schritt werden die als relevant identifizierten Artefakte in Abhängigkeit des Entwurfsfortschrittes und der Hierarchieebene der Einheiten mit den informationsbeinhaltenen Dateien sowie den Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* abgeglichen (vgl. Abschnitt 2.1.5). An dieser Stelle wird die Tatsache berücksichtigt, dass die Artefakte, die in der Abbildung 45 einzeln markiert worden sind, im Untersuchungsrahmen nicht vereinzelt vorhanden sind, sondern durch Datenaufbereitung erzeugt werden müssen. Diese Tatsache basiert darauf, dass die eingesetzten Werkzeuge umfassend sind und durch die zunehmende Leistungsfähigkeit der Hardware für mehrere unterschiedliche Aktivitäten genutzt werden können. Wie bereits beschrieben, sind spezialisierte Werkzeuge mit granularen, vereinzelt Informationspaketen vor allem in der Konstruktionsphase anzutreffen. Häufiger treten jedoch aggregierte Informationen innerhalb einer Datei bzw. eines Werkzeuges auf. Innerhalb einer einzigen Textdatei können so Informationen beinhaltet sein, die in verschiedenen Phasen wiederverwendet werden können und Einheiten verschiedener Ebenen zuzuordnen sind. Als weiteres Beispiel können die Informationen genannt werden, die in einer integrierten Prozess-Ressourcen-Planung mit *Process Designer* entstehen. Die entstehenden Informationen bilden ein Paket, das mehreren Ebenen zugeordnet werden kann und sich in mehreren Phasen wiederverwenden lässt. Auf diese Weise sind in einer angelegten Projektdatei in einem Werkzeug sowohl Informationen zu Funktionsgruppen, wie Robotern inkl. Schweißzangen, als auch Layoutinformationen des Fertigungsabschnittes enthalten. In einem digitalen Werkzeug wie dem *Process Designer* liegen die Informationen demnach nicht separiert nach Ebenen und Verwendungsphasen vor, sondern sind zusammen in einem „Paket“ vorhanden.

Wird die Tatsache berücksichtigt, dass die Informationen in der Realität gekapselt vorliegen und die gekapselten Informationspakete mit jeweils spezifischen, digitalen Werkzeugen erzeugt, verarbeitet und geändert werden, dann können aus Sicht der Wiederverwendung fünf Informationspakete gebildet werden (siehe Abbildung 46).

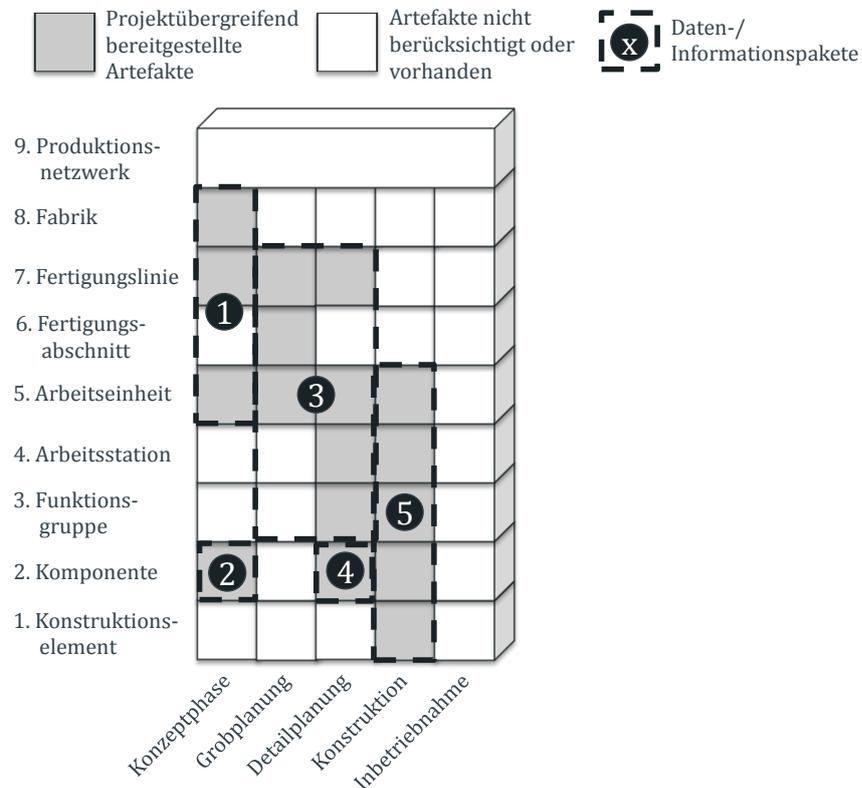


Abbildung 46: Abgeleitete Informationspakete für die projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf, basierend auf [Hell und Lüder 2016]

Kriterien für die Bildung sind die zu unterstützenden Entwurfsphasen, in denen Artefakte wiederverwendet werden sollen, die Kapselung der relevanten Informationen in den eingesetzten digitalen Werkzeugen und die Organisationseinheit, die im Untersuchungsrahmen mit dem Informationspaket arbeitet. Es wurde entschieden, aufgrund der Rahmenbedingungen im Untersuchungsrahmen, die ersten vier Entwurfsphasen zu fokussieren, da diese Phasen vollständig beim OEM durchgeführt werden können. Durch Einteilung der Informationen entsprechend der beschriebenen Kriterien ergibt sich die in der Abbildung 46 dargestellte Paketbildung.

Paket 1 bilden dabei Textdateien, die in der Konzeptphase für die Wirtschaftlichkeitsrechnung und für den ersten Layoutentwurf der Fertigungslinien genutzt werden können.

Paket 2 bilden Informationen für die Sicherstellung der Baubarkeit des Produktes mit den vorhandenen Komponenten. Dies sind unter anderem die eingesetzten Schweißzangen, um die Zugänglichkeit der Schweißpunkte sicherzustellen. Die Dateien liegen üblicherweise in CAD-Dateiformaten vor, die eine räumliche Darstellung ermöglichen.

Paket 3 bilden Informationen der integrierten Prozess-Ressourcen-Planung, die in Werkzeugen wie dem *Process Designer* durchgeführt werden. Das Informationspaket kann mit einem digitalen Werkzeug verarbeitet werden, enthält jedoch Informationen, die in den Phasen der Grob- und der Detailplanung wiederverwendet werden können. Zudem sind Informationen mehrerer Betriebsmittelebenen enthalten. Die große Menge an unterschiedlichen Informationen führt dazu, dass die Informationen in unterschiedlichen Aktivitäten genutzt werden können (vgl. Aktivitäten in Abbildung 38, Abschnitt 5.1.1).

Paket 4 bildet die Informationen zum Spannkonzent, das heißt der Positionierung der Spannwerkzeuge am zu fertigenden Produkt zur Sicherstellung der notwendigen Fixierung, damit eine qualitätsgerechte Bearbeitung ermöglicht wird. Diese Informationen liegen im Untersuchungsrahmen in CAD-Dateiformaten vor.

Paket 5 setzt sich aus vielfältigen Konstruktionsinformationen zusammen. Dieses Paket wird aus mehreren Dateien in unterschiedlichen Dateiformaten gebildet, die nur durch spezielle, digitale Werkzeuge visualisiert bzw. verarbeitet werden können. Diese Werkzeuge sind folglich für eine Wiederverwendung zwingend notwendig (vgl. Abbildung 20, Abschnitt 2.2.2). Die Informationen liegen in der Konstruktionsphase, wie bereits beschrieben, sehr vereinzelt vor in Bezug auf die Aktivität, in der die jeweiligen Informationen verwendet werden können. Die einzelnen Dateien sind deshalb genau den passenden Aktivitäten zuzuführen, in der diese Informationen genutzt werden können. Ein Beispiel ist hier die fertige Offline-Programmierung, die vereinzelt vorliegt und projektübergreifend nur für die Aktivitäten zur Erstellung einer neuen Offline-Programmierung wiederverwendet werden kann, den anderen Aktivitäten im Entwurfsprozess jedoch nicht als Eingangsgröße dienen kann. Eine mögliche Weiterentwicklung des Paketes 5 wäre die Zusammenführung der vereinzelt Informationen im Rahmen eines mechatronischen Modellierungskonzeptes, d. h. der virtuellen Informationsabbildung eines physischen

mechatronischen Objektes („digitaler Schatten“) [Lüder et al. 2013]. Mit dem XML-basierten Datenaustauschformat *AutomationML* wäre eine solche Modellierung inkl. Zuordnung zu hierarchisch angeordneten Objekten zukünftig möglich und damit die Speicherung der Informationen des Paketes 5 in einem einzigen Datenformat. Die Informationen wären zusätzlich untereinander konsistent und könnten verlustfrei ausgetauscht, übergeben und wiederverwendet werden [Lüder und Hundt 2008].

Nach der Spezifizierung der relevanten Informationen und Bildung von sinnvollen Informationspaketen aus der Sichtweise der projektübergreifenden Wiederverwendung wird im nächsten Abschnitt 5.2.2 näher auf die Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte der identifizierten Informationen eingegangen.

5.2.2 Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte

Mit den Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkten aus der Sicht projektübergreifender Wiederverwendung (Referenzfall B) sind zum einen diejenigen Zeitpunkte gemeint, an denen Informationen jeweils in einem Vorgängerprojekt entstehen und zum anderen diejenigen Zeitpunkte, an denen die vorhandenen Informationen in einem Nachfolgeprojekt wiederverwendet werden.

Ausgangspunkt für diese Detaillierung bildet die Abbildung 46 aus Abschnitt 5.2.1. Dort wurden relevante Informationen identifiziert und diese in einem weiteren Verfahren anhand von Kriterien (siehe Abschnitt 5.2.1) in Informationspakete gekapselt. Das in dieser Abbildung dargestellte Konstrukt repräsentiert ein einzelnes Projekt. Für die Übertragung dieser Darstellung auf die projektübergreifende Wiederverwendung, die in diesem Unterkapitel 5.2 behandelt wird, wird das Raster aus der Abbildung 46 gedoppelt. Durch diese Doppelung werden die relevanten Informationen aus Sicht der Wiederverwendung von zwei aufeinander folgenden Projekten repräsentiert. In einer idealen Konstellation liegen die beiden Projekte zeitlich seriell. Ideal deshalb, da die Informationen des Vorgängerprojektes vollständig vorliegen und zwar in ihrem aktuellsten und physisch realisierten Stand. In Anlehnung an die in Abbildung 22 (Abschnitt 2.2.3) dargestellte Situation nimmt das Vorgängerprojekt in dieser Konstellation die Rolle des *Domain Engineerings*

ein. Wie in der Abbildung mit der *Domain Bibliothek* angedeutet ist, liegen alle Entwurfsdaten aus dem Vorgängerprojekt vollständig vor und können von Nachfolgeprojekten genutzt werden. In dieser idealen Konstellation ist der Entstehungszeitpunkt der Information derjenige Zeitpunkt, an dem die jeweilige Information (das jeweilige Artefakt) in ihrem Endzustand vorliegt, was entweder vor dem Abschluss des Entwurfsprozesses möglich ist oder spätestens mit vollständigem Abschluss des Entwurfsprozesses der Fall ist. Der Endzustand jedes Artefaktes wird jeweils zu individuellen Zeitpunkten erreicht. Da im Abschnitt 5.2.1 erläutert wurde, dass gewisse Informationen aufgrund der Nutzung digitaler Werkzeuge nicht einzeln darstellbar sind, sondern aggregiert vorhanden sind, können die individuellen Zeitpunkte des Endzustandes auf fünf Zeitpunkte vereinfacht werden. So hat jedes der zuvor definierten fünf Datenpakete einen Endzustand im Vorgängerprozess. Ab diesem Zeitpunkt können die Datenpakete dann jeweils der *Domain Bibliothek* hinzugefügt werden und projektübergreifend wiederverwendet werden. In der Realität treten auch nach dem Abschluss des Entwurfsprozesses während der Betriebsphase Optimierungen und damit Datenaktualisierungen auf. Es ist an dieser Stelle davon auszugehen, dass die vorhandenen Daten am Ende des Entwurfsprozesses eine vollständig funktionsfähige Anlage repräsentieren und daher auch nicht aktualisiert wiederverwendet werden können.

Im Untersuchungsrahmen liegen die Entwurfsprozesse der betrachteten Projekte, in denen Entwurfsdaten wiederverwendet werden sollen, in der Regel zeitlich weitestgehend parallel, wobei das Vorgängerprojekt einen zeitlichen Versatz hat. Das heißt, dass der Entwurfsprozess des Vorgängerprojektes noch nicht abgeschlossen ist, wenn in den nächsten Projekten mit den Entwurfsprozessen begonnen wird. Dies führt dann zu einer Situation, in der Informationen in einem Vorgängerprojekt vorhanden sind, allerdings nicht in dem Endzustand, das heißt, diese Informationen repräsentieren einen virtuellen Entwurfszustand bzw. Zwischenstand der späteren Anlage, jedoch nicht die später realisierte physische Anlage. Fließt dieser Aspekt als Anforderung in das Lösungskonzept ein, dann ergibt sich ein Informations-Wiederverwendungsprozess, wie er in der Abbildung 47 dargestellt ist.

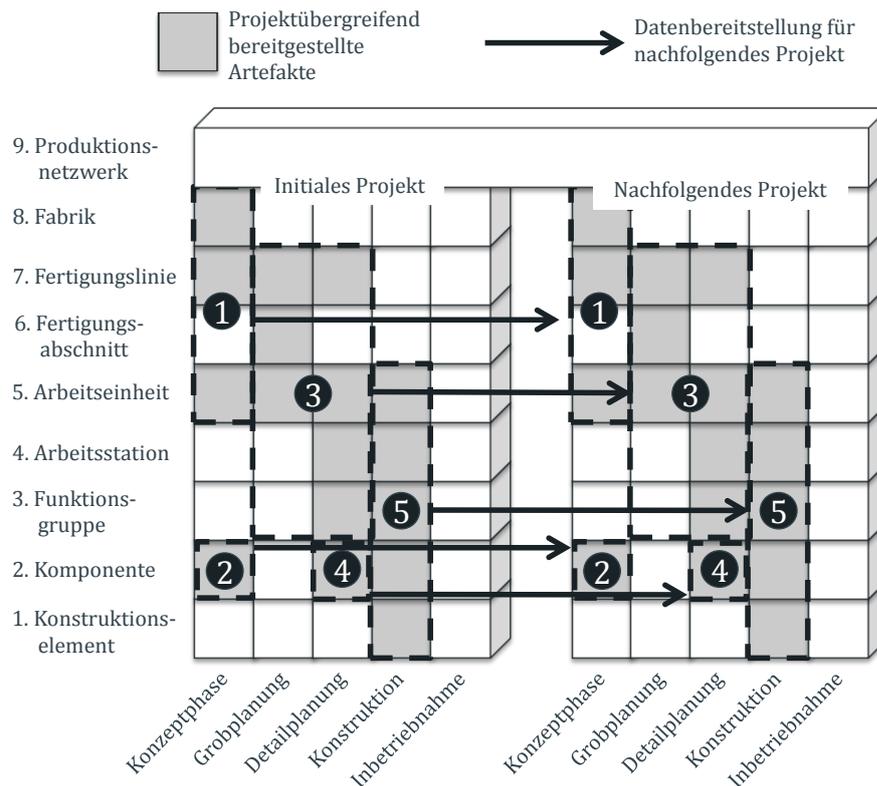


Abbildung 47: Ablauf der projektübergreifender Wiederverwendung bei teilweise überlappenden Projekten, basierend auf [Hell und Lüder 2016]

Dazu wurden die Informationen einer jeden Ebene im Vorgängerprojekt analysiert und diejenigen Zeitpunkte bestimmt, ab denen wiederverwendbare Informationen für Nachfolgeprojekte vorhanden sind. Ab diesen Zeitpunkten ist ein Informationsübertrag in Nachfolgeprojekte sinnvoll möglich, angedeutet mit gestrichelten Linien. Die relevanten Zeitpunkte sind hier für die Prozesse im Untersuchungsrahmen individuell bestimmt worden. Eine Aussage zur Allgemeingültigkeit kann nicht getroffen werden, allerdings kann das Verfahren zur Ermittlung der relevanten Zeitpunkte in anderen Fällen angewendet werden. Ein wichtiges Kriterium für die Definition der sinnvollen initialen Übertragungszeitpunkte ist das Vorhandensein von Informationen, die theoretisch die realisierte Anlage am Ende des Entwurfes repräsentieren. Das heißt, sie brauchen theoretisch im Laufe des Entwurfsprozesses nach der initialen Erstellung nicht mehr verändert werden, da sie zur Realisierung einer funktionsfähigen Anlage führen. Um das zu verdeutlichen, wird an dieser Stelle ein Beispiel gegeben.

In der Abbildung 47 ist eine sinnvolle Wiederverwendung der Informationen ab Ende der Grobplanung dargestellt. In der Konzeptphase wird auf dieser Ebene mit Informationen aus Referenzprojekten gearbeitet. Da sich die Entwicklung des später zu fertigenden Produktes ebenfalls in einem frühen Entwurfsstadium befindet (vgl. Abbildung 8, Abschnitt 2.1.2), sind die Produktdaten noch nicht vollständig vorhanden. Als Konsequenz können keine funktionsfähigen Anlagen auf *Ebene 5* entworfen werden. Die zu diesem Zeitpunkt entstehenden Informationen dienen vielmehr der Wirtschaftlichkeitsrechnung, also der Entscheidung über die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojektes mit Produktentwurf und Fabrikentwurf. Am Ende der Grobplanung werden diese auf Referenzprojekten basierenden Informationen durch projektspezifische Informationen ersetzt, da der Produktentwurf zu diesem Zeitpunkt deutlich vorangeschritten ist, sodass zumindest für die Ebene der Arbeitseinheiten (*Ebene 5*) sinnvoll projektübergreifend wiederverwendbare Informationen vorhanden sind. Ab Ende der Grobplanung können die Informationen deshalb in Nachfolgeprojekten genutzt werden. Im Vorgängerprojekt entstehen auf *Ebene 5* bei zunehmendem Entwurfsfortschritt weitere Informationen. Zudem werden bereits vorhandene Informationen im realen Prozess geändert, da mit zunehmender Konkretisierung des Projektes unter anderem Produktänderungen auftreten, die Auswirkungen auf die Fertigungsbetriebsmittel haben. Bis zum Ende der Inbetriebnahmephase können die vorhandenen Informationen laufend aktualisiert werden. Mit dem Abschluss der Inbetriebnahme repräsentieren die dann aktuellen Informationen die funktionsfähige, physische Anlage. Da diese Dissertation auf die Wiederverwendung im Anlagenentwurf eingeschränkt worden ist, ist aus dieser Sichtweise ein finaler Datenstand erreicht, wissentlich der Tatsache, dass die Artefakte während der folgenden Lebensphasen, dem Betrieb und dem Recycling, weiteren Aktualisierungen unterliegen, sodass aus Sicht des gesamten Lebenszyklus kein finaler Datenstand bestimmt werden kann. Durch Fokussierung des Entwurfsprozesses wird der finale Datenstand am Ende der Inbetriebnahme, zumindest für die Ebene der Arbeitseinheiten, erreicht. Die Wiederverwendung dieses finalen Datenstandes in Nachfolgeprojekten ist in der Abbildung 47 mit einem Pfeil mit nicht unterbrochener schwarzer Linie gekennzeichnet. Je Ebene konnte der finale Datenstand zu unterschiedlichen Zeitpunkten identifiziert werden. Auf der untersten Ebene beispielsweise,

der Einheiten der Konstruktionselemente, wird dieser Datenstand früher erreicht als auf darüber liegenden Ebenen.

Auf Seite des Nachfolgeprojektes ergeben sich umgekehrte Auswirkungen. Dort können aus der Prozessanalyse (siehe Abschnitt 5.1.1) die Aktivitäten identifiziert werden, bei denen vorhandene Informationen als Eingangsgrößen wiederverwendet werden können. In der Abbildung 47 sind im Nachfolgeprojekt auf der rechten Seite diejenigen Phasen grau markiert, in denen Informationen in den Aktivitäten der Phase als Eingangsgröße wiederverwendet werden können. Der durchgezogene Pfeil endet in derjenigen Phase je Ebene, in der die Informationen initial wiederverwendet werden können. Mit den gestrichelten Pfeilen sind weiterhin diejenigen Phasen gekennzeichnet, an denen die Informationen je Ebene spätestens im Entwurfsprozess zur Wiederverwendung genutzt werden können und demnach vorliegen müssen. Durch zeitliche Überlappung zwischen Vorgänger- und Nachfolgeprojekt, ist es möglich, dass die Informationen nicht rechtzeitig vorliegen für die Wiederverwendung in der Konzeptphase, sondern erst zur Konstruktions- oder Inbetriebnahmephase. Im Ergebnis wurde gezeigt, dass es je Ebene individuelle Zeitpunkte im Nachfolgeprojekt gibt, zu denen erstmalig Informationen wiederverwendet werden können und zu denen letztmalig auf vorhandene Informationen zurückgegriffen werden kann, damit die Informationen zu einer Verbesserung der Entwurfsaktivitäten beitragen. Der einfachste Fall ist das Auftreten einer seriellen Reihenfolge der Projekte, bei der der Entwurfsprozess im Vorgängerprozess jeweils bereits abgeschlossen ist, bevor das Nachfolgeprojekt beginnt. Des Weiteren entsteht die Anforderung, dass die Entwurfsprozesse einen minimalen Zeitversatz von einer Entwurfsphase aufweisen, damit ein Teil der Informationen auf ein Nachfolgeprojekt übertragen werden kann. Sind die Projekte zeitlich vollständig parallel, dann stellt dieser Fall keine Wiederverwendung im engen Sinn dar, sondern einen gemeinsamen Entwurf. Dieser Fall wird daher weiter nicht betrachtet, da die Informationen hier nicht übertragen werden, sondern parallel entstehen.

Durch Integration der Erkenntnisse aus der Prozessanalyse und weiterer Überlegungen wurde das initiale Lösungskonzept aus Unterkapitel 4.5 in ein Erklärungsmodell der projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten überführt. Das Lösungskonzept zeigt nun für jede Ebene die unterschiedlichen Entstehungs- und Verwendungszeitpunkte

von Informationen, die im Untersuchungsrahmen auftreten. Das gezeigte Vorgehen kann auf andere Entwurfsprozesse übertragen werden, zur Identifikation von relevanten Informationen aus Sicht der projektübergreifenden Wiederverwendung sowie zur systematischen Steuerung des Wiederverwendungsprozesses. Der Managementprozess, der zur Steuerung der Wiederverwendung benötigt wird, soll hier nicht weiter betrachtet werden. Offenkundig ist jedoch, dass weitere Managementmethoden benötigt werden (vertieft in [Paetzold 2017]).

5.2.3 Auswahl der Artefakte

Bilden die vorhandenen Informationen des Vorgängerprojektes, wie sie in Abbildung 47 (Abschnitt 5.2.2) kenntlich gemacht sind, die Ausgangsbasis für die Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten, dann repräsentieren diese Informationen zusammen virtuell die physische Anlage (vgl. Abschnitt 2.2.4). Die Wiederverwendung vorhandener Artefakte ist dann sinnvoll, wenn der Entwurfsprozess des Neuprojektes dadurch ökonomischer wird, also mit weniger Aufwand durchgeführt werden kann oder wenn das entworfene Produkt durch die Wiederverwendung eine bessere technische Lösung darstellt als ohne Rückgriff auf vorhandene Artefakte.

Da der in dieser Arbeit betrachtete Anwendungsfall der Wiederverwendung einen *engineered-to-order Entwurfsprozess* verbessern soll, ist die Beachtung der reinen Funktionserfüllung nicht zielführend. Die *engineered-to-order* Karosseriebauanlagen sind im Ergebnis individuelle Entwürfe und deshalb nur speziell für einen Einzelfall gültig. Im Gegensatz dazu werden Konstruktionselemente, Komponenten und Funktionsgruppen (Ebenen 1-3) im Untersuchungsrahmen in der Regel als *order-to-stock* entworfen bzw. von externen Lieferanten zugekauft. Die *order-to-stock* Einheiten der Ebenen 1-3 weisen eine hohe Produktflexibilität auf, das heißt, sie liefern eine Funktionalität für die Gesamtanlage, wobei die Funktionalität zur Fertigung unterschiedlicher Produkte eingesetzt werden kann. Damit können die Einheiten der Ebenen 1-3 in der Regel in einer Vielzahl verschiedener Karosseriebauanlagen verwendet werden, obwohl das zu fertigende Produkt deutlich unterschiedlich sein kann. Die Auswahl der zu wiederverwendenden Einheit bzw. der zugehörigen Artefakte zur erneuten Anfertigung der Einheit kann in diesem Fall auf ein einzelnes Kriterium reduziert werden. Entweder sind Einheiten vorhanden,

die die im aktuellen Projekt erforderliche Funktionalität bereitstellen können oder es werden neue Einheiten entworfen, die dann in zukünftigen Projekten ebenfalls zur Verfügung stehen. Eine entsprechende Auswahl der Einheiten und ihrer Artefakte über das Kriterium der bereitgestellten Funktionalität wird unter anderem in [Hady 2013], [Weyrich und Klein 2012], [Klein 2014], [Hölttä-Otto] und [Schröck 2016] thematisiert. Dort werden kleine wiederkehrende mechatronische Einheiten bzw. Module in realisierten Projekten identifiziert und über das Kriterium Funktionalität für Nachfolgeprojekte bereitgestellt.

In Abgrenzung zu diesen bestehenden Arbeiten wird in dieser Arbeit die Wiederverwendung von *engineered-to-order* Einheiten analysiert. Da die Karosseriebauanlagen, die im Ergebnis entstehen, speziell für einen Einzelfall entworfen werden, reicht bei der Auswahl wiederverwendbarer Artefakte das Kriterium Funktionalität nicht aus. Ziel ist nicht das Auffinden einer vorhandenen Einheit, die die geforderten Funktionalitäten für das neue Projekt bereitstellen kann, sondern die Auswahl einer vorhandenen Einheit mitsamt ihrer Artefakte, die möglichst wenig Anpassung erfordert, um den Anforderungen im neuen Projekt gerecht zu werden. Zudem soll die Güte des Entwurfsergebnisses verbessert werden gegenüber einem Entwurfsergebnis ohne Wiederverwendung. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Güte wurde bereits in Abschnitt 5.1.4 vorgestellt. Dort wurde das vorhandene Entwurfsergebnis möglichst ganzheitlich mithilfe von Kennzahlen bewertet und auf diese Weise mit einem beliebigen Entwurf verglichen. Dies gilt mit der Einschränkung, dass die Entwurfsergebnisse sich auf Anlagen beziehen, auf denen das gleiche Produkt gefertigt werden kann, da nur dann ein direkter Vergleich möglich ist.

Neben der Verbesserung des Entwurfsergebnisses soll sich ebenfalls eine prozessuale Verbesserung im Anlagenentwurf ergeben, unter anderem durch weniger Zeitaufwand zur Fertigstellung des Entwurfsergebnisses, was in der Folge zu einem verkürzten Entwurfsprozess führen soll. Die Abschätzung, ob eine Verkürzung des Entwurfsprozesses durch die projektübergreifende Wiederverwendung vorhandener Artefakte eintritt, kann anhand der bisher eingeführten Gütekriterien nicht durchgeführt werden. Es bedarf einer Beurteilung des Effektes im Entwurfsprozess auf Basis der Unterschiedlichkeit zwischen den vorhandenen Artefakten und den neu zu erstellenden Artefakten. Aufgrund der großen Anzahl an Entwurfsaktivitäten und an entstehenden Artefakten sowie aufgrund der

zeitlich mehrjährigen Dauer des hier untersuchten Entwurfsprozesses (vgl. Abschnitt 5.1.1) ist die Beurteilung des Anpassungsbedarfes komplex. Unter Einbeziehung der Abhängigkeiten, die zwischen den Entwurfsartefakten in dem hier betrachteten Entwurf identifiziert worden sind (siehe Abbildung 43, Abschnitt 5.1.5), kann der starke Einfluss der Fertigungsprämissen auf die zeitlich später entstehenden Artefakte aufgezeigt werden. Diese Tatsache kann sich daher zu Nutze gemacht werden, indem die Unterschiedlichkeit der Artefakte zwischen Vorgänger- und Nachfolgeprojekt anhand der zugrundeliegenden Fertigungsprämissen beurteilt wird. Die Prämissen liegen bereits am Anfang des Entwurfes vor, was dazu führt, dass die Projekte auch bei zeitlich weitgehender Überlappung bereits zu Beginn des Entwurfes beurteilt werden können. Daneben trägt ein weiterer Aspekt im Untersuchungsrahmen zur Vereinfachung der Abweichungsbeurteilung bei. In der Automobilindustrie hat sich der Trend hin zu einer Plattform- und Modulstrategie durchgesetzt (vgl. [Hüttenrauch und Baum 2008]). Volkswagen hat in diesem Zug für Kompakt- und Mittelklassefahrzeuge den Modularen Querbaukasten (MQB) entwickelt [Walzl und Wildemann 2014]. Die Plattformstrategie hat die Auswirkung, dass insbesondere die Fahrzeugplattformen viele Gleichteile sowie gleiche Fügefolgen aufweisen. Dadurch, dass der Fügeprozess im Rahmen der Plattformstrategie definiert worden ist, sind die funktionalen Anforderungen an die Karosseriebauanlagen ähnlich, was den möglichen Freiheitsgrad beim Anlagenentwurf deutlich verringert. Aus diesen besonderen Rahmenbedingungen im Untersuchungsrahmen ergeben sich mehrere Möglichkeiten, die Artefaktauswahl vereinfacht durchzuführen.

1. Die Auswahl der vorhandenen mechatronischen Einheit und ihrer Artefakte mit der die Wiederverwendung am effizientesten durchgeführt werden kann, kann anhand des zu fertigenden Fahrzeugbaukastens oder der Plattform erfolgen. Eine Anlage kann projektübergreifend für einen bestimmten Fahrzeugbaukasten entworfen werden. In Nachfolgeprojekten, in denen die Anlagen Fahrzeugbauteile des gleichen Fahrzeugbaukastens fertigen sollen, können dann die entsprechenden vorhandenen Artefakte der bereits entworfenen Anlagen genutzt werden. Bei der angesprochenen Ähnlichkeit der Produkte eines Baukastens ist der Fertigungsprozess demnach ähnlich und damit auch die Funktionalitäten der Karosseriebauan-

lagen. Dieses Vorgehen wird für den Fall funktionieren, dass die Fertigungsprämissen nicht in Schlüsselkriterien deutlich voneinander abweichen, wie z. B. eine automatisierte zu einer manuellen Fertigung oder eine Ausbringung von 5 Fahrzeugen pro Stunde zu einer Ausbringung von 60 Fahrzeugen pro Minute. Als Ergebnis entsteht für jeden Fahrzeugbaukasten eine eigene Anlagenbibliothek mit einer Zuordnung von Fertigungsprozessen für die Herstellung unterschiedlicher Baustufen mit einer oder mehreren Anlagen.

2. Sollten keine Artefakte von bereits realisierten Anlagen zur Verfügung stehen, die Produkte des gleichen Fahrzeugbaukastens fertigen können, dann wäre die Abschätzung des Anpassungsbedarfes von beliebigen, vorhandenen Anlagen an die neuen Projektanforderungen durch Experten möglich. Durch das Wissen aus der großen Anzahl an realisierten Projekten sind die Experten in der Lage, anhand der abweichenden Fertigungsprämissen den Anpassungsbedarf der Überführung eines vorhandenen Entwurfes in einen neuen Entwurf abzuschätzen. Kenngrößen bei der Beurteilung sind die Ausbringungsmenge, die Anzahl der zu fügenden Teile, die Fügefolge, die Fügetechnologien und das Fügeäquivalent, also eine dimensionslose Vergleichskennzahl, mit der der zeitliche Aufwand der durchzuführenden Fügeprozesse mit unterschiedlichen Fügetechnologien zum Erreichen einer definierten Festigkeit angegeben wird.

3. Die Nutzung eines multikriteriellen, qualitativen Verfahrens, mithilfe dessen der Anpassungsbedarf bei der Wiederverwendung von vorhandenen Artefakten anhand der Abweichung der Fertigungsprämissen ermittelt werden kann. Ein solches Verfahren wurde in [Knabe 2015] speziell für die Wiederverwendung von Entwurfsdaten beim Karosseriebauentwurf für das *engineered-to-order* Vorgehen herausgearbeitet. Der Nutzen der Wiederverwendung von ausgewählten Artefakten wurde dort anhand des Zusammenhanges zwischen den zugrunde liegenden Prämissenunterschieden zweier Anlagenentwürfe und des damit verbundenen Aufwandes der Überführung des einen Entwurfes in den anderen berechnet. Der

Aufwand wurde differenziert nach den Auswirkungen auf Schlüssel-Entwurfsaktivitäten analysiert. Als Schlüsselaktivitäten wurden die Einzelaktivitäten bzw. Aktivitätsgruppen Investitionsabschätzung, Anlagenplanung, Konstruktion, Betriebsmittelauslegung, Inbetriebnahme, Roboterprogrammierung sowie Beschaffung definiert. Durch eine Expertenbefragung konnte für den in [Knabe 2015] betrachteten Einzelfall der Nutzen der Wiederverwendung gegenüber einem Neuentwurf separat für jede Schlüsselaktivität abgeschätzt werden. Die Auswahl der in die Bewertung einbezogenen Prämissen wurde ebenfalls durch Experten festgelegt anhand häufig auftretender Projektanforderungen im betrachteten Untersuchungsrahmen. Der Zusammenhang zwischen den Prämissenunterschieden und dem Anpassungsaufwand in den Schlüssel-Entwurfsaktivitäten wurde durch einen paarweisen Vergleich ermittelt.

Da die einzelnen Schlüssel-Entwurfsaktivitäten bei einem Neuentwurf einen unterschiedlichen Aufwand aufweisen, können diese Aktivitäten entsprechend der verursachten Kosten gewichtet werden. Die qualitativen Verbesserungen durch die Wiederverwendung bleiben in dieser Analyse unberücksichtigt, da sie im Vorfeld ohne Überprüfung des finalen Entwurfsergebnisses schwer zu beurteilen sind, wohingegen die Aufwandsreduzierungen im Entwurf gut quantitativ abgeschätzt werden können. In der Abbildung 48 wird das Verfahren schematisch in einer Darstellung gezeigt.

Die ermittelten Prämissenunterschiede wie Fügefolgen, die geforderte Ausbringungsmenge oder der Mechanisierungsgrad werden auf der linken Seite aufgelistet. Oben werden die Schlüssel-Entwurfsaktivitäten eingetragen. In der Mitte werden die ermittelten Einflüsse der Prämissen und die Schlüssel-Entwurfsaktivitäten eingetragen, die mithilfe eines paarweisen Vergleiches ermittelt werden können. Rechts neben den aufgelisteten, potenziellen Prämissenunterschieden erfolgt eine Bewertung der vorliegenden Unterschiede zwischen den beiden zu vergleichenden Entwurfsprojekten.



Abbildung 48: Auswahlverfahren für die Wiederverwendung von Entwurfsartefakten für den Karosseriebauanlagendesign in Anlehnung an [Knabe 2015]

Die Bewertung der Unterschiede kann mithilfe eines qualitativen Verfahrens durchgeführt werden, indem die Ausprägungen der Unterschiede in Textform beschrieben sind und jeweils mit Noten versehen sind. In [Knabe 2015] wird ein Notenbereich von 0 bis 10 vorgeschlagen; in [Stallinger et al. 2011] werden die Ausprägungen der qualitativen Bewertung einem Notenbereich von 1 bis 5 zugeordnet. Nach erfolgter Bewertung werden die vergebenen Notenpunkte mit dem Wert des ermittelten Einflusses multipliziert und auf diese Weise die Auswirkung der vorliegenden Prämissenunterschiede auf die Schlüssel-Entwurfsaktivitäten errechnet.

Im unteren Bereich der Abbildung 48 erfolgt eine erneute Multiplikation der ermittelten Werte für die Auswirkungen der Unterschiede mit dem gewichteten Kosteneinfluss der Aktivitäten. Die Faktoren für die Kosteneinflüsse können anhand des Aufwandes der jeweiligen Schlüssel-Entwurfsaktivitäten ermittelt werden, die für einen regulären Entwurfsprozess bekannt sind (siehe Abschnitt 5.2.6). Durch diese zweite Multiplikation

werden die Teilnutzen errechnet, die durch Summenbildung zu einem Gesamtnutzen aggregiert werden können. Dieser ermittelte Gesamtnutzen gibt an, wie hoch der Nutzen der Wiederverwendung der Artefakte einer vorhandenen Karosseriebauanlage für ein neues Projekt unter den jeweils zugrunde liegenden Prämissenunterschieden ist. Somit ist es möglich, die Wirtschaftlichkeit einer projektübergreifenden Wiederverwendung konkret für den vorliegenden Einzelfall im Projekt abzuschätzen, anhand der unterschiedlichen Randbedingungen unter denen die vorhandenen Entwürfe erstellt worden sind im Vergleich zu jenen, die im neuen Entwurfsprojekt gefordert sind. Sind die Unterschiede zu groß, ergibt sich ein kleiner Wert für den Gesamtnutzen. Zumindest Teilnutzen können in diesem Fall aber durchaus hohe Werte aufweisen. In diesem Fall kann ein Teilumfang der gesamten Artefakte der mechatronischen Einheit effizient wiederverwendet werden und zwar in denjenigen Entwurfsaktivitäten, für die ein positiver Teilnutzen-Wert berechnet werden kann. Weist kein Teilnutzen einen hohen Wert auf, dann sollten die Artefakte des neuen mechatronischen Anlagenentwurfes für eine projektübergreifende Wiederverwendung in die Bibliothek als neue, zusätzliche Einheit aufgenommen werden. Auf diese Weise werden mehrere wiederverwendbare Einheiten vorgehalten, die für unterschiedliche Prämissen in Nachfolgeprojekten jeweils einen besseren Gesamtnutzen in Bezug auf die Wiederverwendung aufweisen.

5.2.4 Projektübergreifende Dokumentation der Wiederverwendung

Zur Dokumentation der projektübergreifenden Wiederverwendung ist eine Abschätzung der Potenziale in der frühen Entwurfsphase wichtig. Ebenso relevant ist eine Abschätzung bei der Bildung eines Clusters bestehend aus einem Initialprojekt und ein oder mehreren Nachfolgeprojekten, um über die grundsätzliche Anwendung der Methode Wiederverwendung in den Entwürfen entscheiden zu können. Die Abbildung 49 zeigt die für den hier vorliegenden Anwendungsfall entwickelte Systematik.

Werk Ausbringung [JPH] Mechanisierungsgrad [%]	A 34 JPH 90 %	Kommentar	B 30 JPH 62 %	Kommentar	C 30 JPH 45 %	Kommentar	Bitte Werk eintragen xx JPH xx %
Geo UB II		(1 + 2) + 1		(1 + 2) + 1			<input type="text"/>
Aus UB II							<input type="text"/>
SGR Säule A li/re		(1 + 1) + 0	man	(1 + 0) + 0			<input type="text"/>
SGR Radhaus hinten li/re			man	(1 + 0) + 0			<input type="text"/>
SGR Radhaus vorne li/re		(1 + 1) + 0	man	(1 + 0) + 0			<input type="text"/>
SGR Stirnwand		(1 + 1) + 0					<input type="text"/>

- Basis Ausführung
- Einlegekonzept Low-Cost – Kernfertigungsbereich gleich
- Integration
- Bezugsart Kaufteil
- Synergieanlage hier unwirtschaftlich

man Manuelle Anlage
* Übernahme Greifer, Spannrahmen etc.

Abbildung 49: Dokumentation und Potenzialabschätzung der Wiederverwendung in der frühen Entwurfsphase

In den Spalten werden alle Projekte des gebildeten Clusters eingetragen (in der Abbildung 49: Projekt/Werke A-C), das hier auf Grundlage gleicher Produktbaukästen (gemeint sind Fahrzeugbaukästen) gebildet wurde. In den Zeilen werden alle notwendigen Anlagen (Ebene 5 in der Hierarchie) des Gewerkes Karosseriebau eingetragen, um aus einzelnen Blechteilen eine komplette Rohkarosse zu fügen. Zunächst werden alle Anlagen blau markiert, die aufgrund von Kaufteilbezug des zugehörigen Produkt-Zusammenbaus in dem jeweiligen Projekt nicht benötigt werden. Im Initialprojekt A werden die restlichen Anlagen neu entworfen. Die Artefakte stehen damit Nachfolgeprojekten zur Verfügung (grün markiert). In den Nachfolgeprojekten wird bei Übernahmemöglichkeit dieser Artefakte das zugehörige Feld ebenfalls grün markiert. Ist eine Übernahme des Kernbereiches der Anlage möglich und zugleich eine Anpassung des Einlegebereiches vorgesehen, meistens hin zu manuellem Einlegen, dann wird das Feld in gelb markiert. Die wiederverwendeten Artefakte, die den Einlegebereich beschreiben, sind folglich anzupassen. Soll eine bereits im Werk existierende Anlage in einem Nachfolgeprojekt weiter genutzt werden, dann wird das zugehörige Feld in orange markiert. Es können in diesem Fall nur diejenigen Artefakte wiederverwendet werden, die produktabhängige Objekte beschreiben, wie Spannkonzepete und Geometrievorrichtungen (siehe Unterkapitel 6.2). Das sind solche Artefakte, die im Hierarchiemodell den Ebenen Konstruktionselement bis Funktionsgruppe zugeordnet wurden. Anlagen, die im Projektcluster aufgrund der Anforderungen einmalig benötigt und entworfen werden, was im industriellen Lösungsgeschäft immer auftreten

kann, werden rot markiert. Hier werden keine Artefakte wiederverwendet. Die entworfene Anlage bleibt damit eine Sonderlösung, bezogen auf das definierte Projektcluster. Es ist möglich, dass erst in einem Nachfolgeprojekt (in der Abbildung Projekt B) eine Basisausführung einer Anlage entworfen wird, nämlich dann, wenn für die Anlage in Vorgängerprojekten aufgrund von Kaufteilbezug des Produktes oder Integration kein Neuentwurf benötigt worden ist (siehe Anlage SGR Radhaus hinten).

Mit der vorgestellten Systematik wird so das Ziel einer Projektclusterbildung sowie einer Potenzialabschätzung in der frühen Phase von Nachfolgeprojekten erreicht.

Eine weitere wichtige Methode für die Anwendung der Methode Wiederverwendung in realen Projekten ist eine hinreichende Änderungsverfolgung der Artefakte. Zum einen bietet sich eine technische Lösung an, in der die logischen Zusammenhänge zwischen den Artefakten modelliert sind und die Auswirkungen einer Änderung an einem Artefakt automatisiert gemeldet werden bzw. die in logischen Beziehungen stehenden Artefakte ebenfalls geändert werden. Bedingung hierfür wäre zum einen die Modellierung aller Beziehungen zwischen den Artefakten inkl. Änderungsauswirkungen und zum anderen ein Datenaustauschformat, in dem alle Artefakte vorliegen inkl. eines Metamodells mit dem die Informationen kompatibel zusammengeführt werden können, damit die Beziehungen technisch vollständig abgebildet sind (vgl. Abbildung 43). Im Untersuchungsrahmen sind diese Bedingungen nicht gegeben, demnach ist eine automatisierte Lösung des Änderungsmanagements nicht möglich. Potenzielle Ansätze für eine automatisierte Lösung wären:

- *Standardisierter Datenaustausch über AutomationML (vertieft in [Lüder, Schmidt und Drath 2017])*
Möglichkeit des verlustfreien, konsistenten Datenaustausches in multidisziplinären Entwurfsprojekten und Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den Disziplinen.
- *Interoperationale Werkzeugketten durch Daten-Meta-Modelle (vertieft in [Hundt und Lüder 2012])*

Sicherstellen der verlustfreien, konsistenten Übertragung von Informationen innerhalb eines digitalen Werkzeuges in ein Datenaustauschformat, das in der gesamten Werkzeugkette genutzt wird und vice versa.

- *Implementierung eines erweiterten Product-Life-Cycle-Managements (PLM) (vertieft in [Gerhard 2017])*

Ermöglichung einer life-cycle-orientierten Datenintegration, d. h. Zusammenbringen der Entwurfsdaten mit Daten der Betriebsphase inkl. Rückkopplungen und Konsistenzherstellung.

- *Definition von Kollaborationsobjekten für den multidisziplinären Entwurf (vertieft in [Drath, Fay und Barth 2011])*

Definition einer virtuellen Einheit inkl. derjenigen Artefakte, die im Rahmen des Entwurfsprozesses in mehreren digitalen Werkzeugen, in verschiedenen Ansichten und von unterschiedlichen Projektbeteiligten Änderungen erfahren. Die Einheiten inkl. der Artefakte müssen über die Entwurfsphasen und Werkzeuge hinweg konsistent bleiben. Ziel ist die Beschränkung des Datenaustausches auf die relevanten Informationen.

- *Bereitstellen erweiterter Interoperationalitätsfunktionen (vertieft in [Drath, Fay und Barth 2011])*

Damit sind Funktionalitäten gemeint, die durch Datenformate nicht bereitgestellt werden können wie Konfliktmanagement bei unterschiedlichen Datenständen, Sichtbarmachen der Änderungen im Quellwerkzeug und Analyse der Auswirkungen sowie transparentes Versionsmanagement inkl. Nachvollziehbarkeit.

- *Nutzung von Semantik Web Technologien (vertieft in [Sabou, Marta, Ekaputra, Fajar J. und Biffel 2017])*

Integration und Herstellung von Beziehungen zwischen multidisziplinären Entwurfsdaten aus einer Vielzahl an Quellsystemen und Möglichkeit der Konsistenzprüfung.

- *Implementierung einer Qualitätssicherung während des Entwurfes für virtuelle Einheiten (vertieft in [Winkler et al. 2017])*

Sicherstellen der Datenkonsistenz einer Einheit und der Repräsentation einer vollständig funktionsfähigen Anlage.

Als eine praktikable manuelle Lösung bietet sich eine Änderungsverfolgung an ohne eine automatisierte Änderung von Artefakten. Diese Lösung zielt darauf ab, dass ein jeweiliger Artefakt-Nutzer bei Änderungen diese den anderen Entwurfsprozessbeteiligten mitteilt. Auf diese Weise können die Beteiligten die Auswirkungen der Änderung eines in logischer Beziehung stehenden Artefaktes manuell prüfen und das eigene Artefakt nach Bedarf anpassen. Damit ist das Risiko minimiert, dass ein Artefakt unverändert wiederverwendet wird, obwohl sich andere in logischer Beziehung stehende Artefakte zeitlich vorher geändert haben und zur Wiederverwendung vorgesehene Artefakte ebenfalls angepasst werden müssen bzw. ein Neuentwurf ökonomischer ist. Die Abbildung 50 zeigt ein mögliches Vorgehen zum Management einer manuellen Änderungsverfolgung.

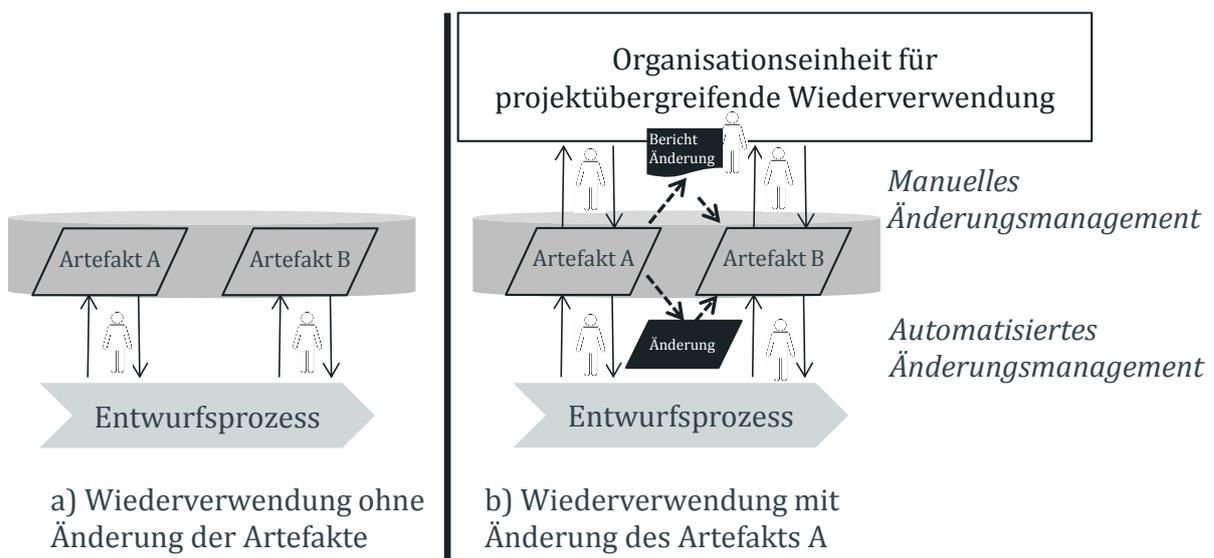


Abbildung 50: Fall a): Wiederverwendung eines Artefaktes ohne Änderung Fall b): Wiederverwendung eines Artefaktes mit zwingendem Änderungsbedarf in Anlehnung an [Hillmann 2016]

Durch eine zentrale Stelle werden Berichte von den Artefakt-Nutzern angefordert. Mindestanforderung an den Berichtsinhalt ist die Nennung der wiederverwendeten Artefakte, die Beschreibung des Änderungsumfanges, die Nennung des Änderungszeitpunktes und die namentliche Nennung des Mitarbeiters, der die Artefaktänderung durchgeführt hat. Die zentrale Stelle hat dann die Aufgabe die Auswirkungen abzuleiten und die im Entwurfsprozess nachfolgenden Akteure über die Änderung zu benachrichtigen, indem sie den Bericht an diese Personen weiterleitet. In der zentralen Stelle müssen als Anforde-

rung demnach die logischen Beziehungen zwischen den Artefakten bekannt bzw. modelliert sein. Im Vergleich zu einer rein automatisierten Lösung kann bei der Ableitung der Auswirkungen auf Erfahrungswissen der Experten in der zentralen Stelle zurückgegriffen werden und dieses Wissen gezielt im Einzelfall zur Identifikation der richtigen Empfänger der Änderungsbenachrichtigung genutzt werden. Bei einer automatisierten Lösung hingegen erfolgt die Benachrichtigung allein auf der Grundlage des Beziehungsmodells, das vollständig modelliert sein muss, neben der Anforderung an das Vorhandensein eines Datenaustauschformates über den gesamten Entwurfsprozess, damit alle Artefakte miteinander in einer bidirektionalen Verbindung technisch verbunden sind. Für den Übergang von einer manuellen zu einer automatisierten Lösung wird ein individueller Migrationspfad für den betrachteten Bereich bzw. das jeweilige Unternehmen benötigt. Dort sind die jeweils technischen und organisatorischen Maßnahmen aufzuzeigen und eine Vorgehensweise für die Implementierung festzulegen.

Durch die Paketierung der gesamten Entwurfsartefakte im ausdetaillierten Konzept in fünf Datenpakete (siehe Abschnitt 5.2.2) kann die Komplexität der Beurteilung der Änderungsauswirkung für die manuelle Änderungsverfolgung vereinfacht werden. Durch die Aggregation der Artefakte in fünf Datenpakete verringert sich die Anzahl der Subjekte und die Anzahl der Beziehungen zueinander, was zu einer deutlichen Reduktion der Komplexität führt. Das ist für die manuelle Lösung wichtig, um eine praktische Realisierbarkeit sicherzustellen. Die fünf Datenpakete können jeweils einer organisatorischen Einheit oder auch einer verantwortlichen Person zugewiesen werden, die die Änderungskontrolle durchführt. Ansonsten wären alle Beziehungen der Artefakte untereinander abzubilden und die einzelnen Artefakte zuständigen Personengruppen zuzuordnen (vgl. Abbildung 43, Abschnitt 5.1.5), was die manuelle Durchführbarkeit des Änderungsprozesses deutlich komplexer machen würde.

Für die automatisierte Variante ist die Abstraktion der Artefakte auf der Ebene von Datenpaketen nicht zielführend, da in diesem Fall jedes einzelne Artefakt geändert werden muss und damit zwingend eine detailliertere Auflösungsebene notwendig ist. Im manuellen Prozess ist es effizienter, die Nutzer von Datenpaketen darüber zu informieren, dass sich in Beziehung stehende Datenpakete geändert haben inkl. der oben genannten Mindestinhalte für den Änderungsbericht. Anschließend können die Nutzer der Datenpakete

selbstständig ableiten, welcher Anpassungsbedarf für einzelne Artefakte bei der Wiederverwendung entsteht, bzw. ob die Wiederverwendung gegenüber einem Neuentwurf vorteilhaft ist. Gleichzeitig reduziert sich der Aufwand für die zentrale Stelle, da dort wesentlich weniger Berichte bearbeitet werden müssen, durch die Abstraktion der Artefakte zu Datenpaketen. Das Änderungsmanagement wird damit deutlich praktikabler. Weiterhin wird dadurch die Verwendung der Werkzeuge der *Digitalen Fabrik* bei der Änderungsverfolgung berücksichtigt, da in einem Werkzeug mehrere Artefakte verarbeitet werden bzw. entstehen. Ein Beispiel ist hierfür die Komponentenstückliste des *Process Designers*, die in einem logischen Zusammenhang mit dem Prozess und dem 3D-Layout steht. Alle drei Artefakte werden mithilfe des Werkzeuges *Process Designer* erzeugt. Es ist hinreichend, den Anpassungsbedarf aggregiert für das ganze Datenpaket zu berichten, anstatt drei Berichte für jedes einzelne Artefakt zu erzeugen, da die Artefakte innerhalb eines Werkzeuges logisch miteinander verbunden sind. Die Änderung eines 3D-Layouts führt im Beispiel automatisch zu einer geänderten Komponentenstückliste. Der Nutzer kann auf Basis des Änderungsberichtes für ein Datenpaket im Anschluss den richtigen Stellhebel wählen, damit sich die Artefakte in einem Werkzeug entsprechend anpassen. Drei gesonderte Berichte für jedes einzelne Artefakt sind demnach zu detailliert, da innerhalb eines Werkzeuges nicht an drei Stellen geändert werden muss.

Im nächsten Abschnitt 5.2.5 erfolgt die Integration des Lösungskonzeptes für den in dieser Arbeit betrachteten Untersuchungsrahmen in das allgemeine Modell des *Domain Engineering* [Jazdi et al. 2010], bzw. in das Vorgehensmodell des projektunabhängigen Entwurfs nach *VDI 3695* [VDI und VDE 2010b] als Erweiterung der beiden Modelle.

5.2.5 Durchführung

Die Integration des in dieser Arbeit vorgestellten Lösungskonzeptes als Erweiterung des Vorgehensmodells der Wiederverwendung im Entwurf nach [VDI und VDE 2010b] ist in der Abbildung 51 dargestellt.

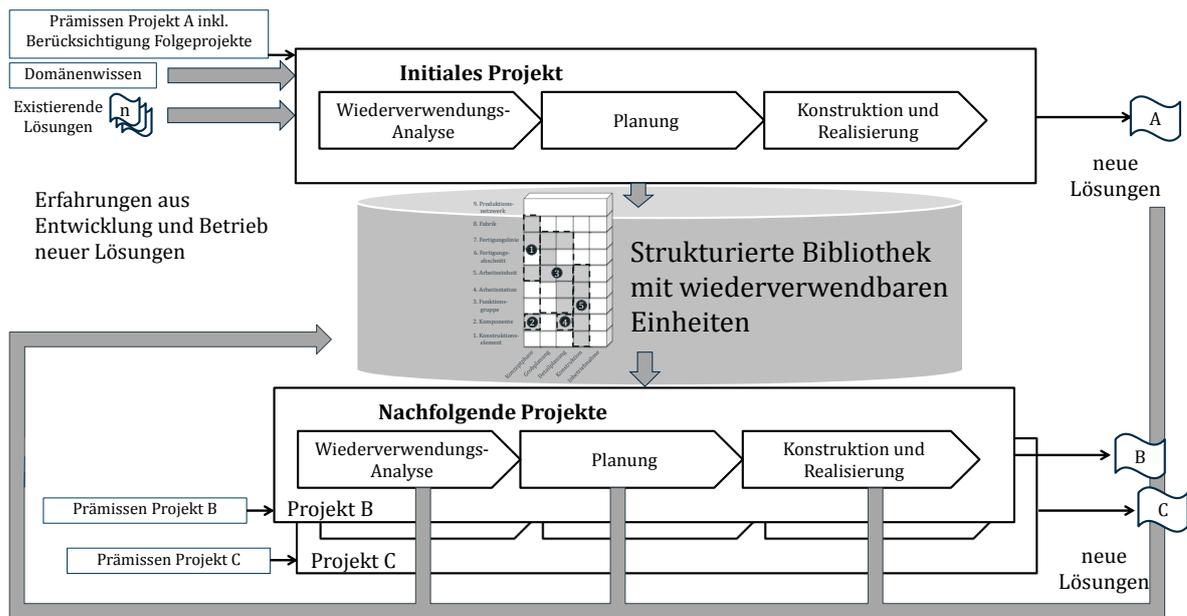


Abbildung 51: Integration des Lösungskonzeptes in das *Domain Engineering* nach [Jazdi et al. 2010] einschließlich Adaption

Im Vergleich zum Vorgehensmodell führt der vormals projektunabhängige Entwurf bereits zu physisch realisierten Lösungen. Damit wird der Prozess von einem reinen projektunabhängigen Entwurf zwecks Füllung einer Bibliothek zu einem projektübergreifenden Entwurf. Die Anforderungen der nachfolgenden Projekte an die Wiederverwendbarkeit der entstehenden Entwurfsartefakte werden in dem projektübergreifenden Entwurf bereits berücksichtigt. Grund ist die hohe Hierarchieebene der Einheiten, zu denen die zur Wiederverwendung vorgesehenen Artefakte zugeordnet sind (vgl. Abschnitt 5.1.5). Damit verbunden ist die Tatsache, dass alle hierarchisch tiefer angeordneten Einheiten einen eigenen Produktentstehungsprozess durchlaufen, der zeitlich meistens kürzer ist und obligatorisch zeitlich vor dem Produktentstehungsprozess der übergeordneten Einheit abgeschlossen sein muss. Im hier konkreten Anwendungsfall werden Artefakte der *Verwaltungsschale* von Einheiten auf Hierarchieebene 6 (Fertigungssegment) und 5 (Arbeitseinheit) wiederverwendet wie 2D-Layout-Daten für Layoutworkshops. Der mehrjährige Zeitraum bis eine so große, komplexe Einheit innerhalb der Fabrik physisch realisiert ist, bindet zahlreiche personelle Ressourcen aus unterschiedlichen Domänen. Durch die Überführung des rein projektunabhängigen Entwurfsprozesses in einen projektübergreifenden Entwurfsprozess, der physisch realisiert wird

und dessen Entwurfsartefakte zugleich der Füllung einer Bibliothek zwecks Bereitstellung zur Wiederverwendung in Nachfolge-Entwurfsprozessen dienen, zahlt sich der Ressourceneinsatz schnell aus. Grund ist die zeitnahe physische Realisierung direkt nach Abschluss des projektübergreifenden Entwurfsprozesses. Im Vergleich dazu führt der rein projektunabhängige Entwurfsprozess nicht direkt zu einem physischen Produkt, sondern dient ausschließlich dem Füllen einer Bibliothek. Die ökonomische Vorteilhaftigkeit und die eingesetzten Ressourcen rechnen sich erst deutlich später und zwar nach dem Durchlaufen der ersten projektabhängigen Projekte. Im vorliegenden Fall lägen mehrere Jahre zwischen dem Beginn des projektunabhängigen Entwurfsprozesses und dem Beginn bzw. dem Ende des ersten projektabhängigen Entwurfsprozesses, in dem eine Effizienzsteigerung auftreten würde. Durch die Größe und Komplexität der zu realisierenden Einheiten für den Karosseriebau und der damit verbundenen Dauer des Prozesses ist ein projektübergreifender Entwurfsprozess deutlich effektiver und effizienter.

Nach Abschluss eines Wiederverwendungsprojektes können die entstandenen Entwurfsartefakte die Bibliothek erweitern als zusätzliche Einheiten bzw. vorhandene Artefakte substituieren, falls sie inhaltlich eine Verbesserung zu bereits vorhandenen Artefakten aufweisen (vgl. Gütekriterien, Abschnitt 5.1.4).

Nachdem das Vorgehensmodell für die Durchführung abgeleitet worden ist, wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2.6 auf die Messung des Erfolges und des Nutzens der projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten im Karosseriebauentwurf eingegangen.

5.2.6 Erfolg und Nutzen

Die Bewertung des Nutzens der Methode Wiederverwendung in projektübergreifenden Karosseriebauanlagen-Entwürfen bei OEMs der Automobilindustrie, sowohl im Allgemeinen als auch im Speziellen für den in dieser Arbeit vorliegenden Untersuchungsrahmen, kann mithilfe qualitativer oder quantitativer Methoden erfolgen. Als Vergleichsgröße zur Ermittlung des Nutzens der Wiederverwendung kann der Aufwand eines Referenz-Entwurfsprozesses ohne Wiederverwendung bzw. mit einer vorhandenen Ad-hoc-Wiederverwendung dienen. Dieser ermittelte Aufwand bezieht sich dann auf den Status quo im

Untersuchungsrahmen. Durch Anwendung der Methode Wiederverwendung im Entwurf sollte im Erfolgsfall der Aufwand gegenüber dem Status quo, also der Vergleichsgröße, sinken.

Als Vorgehen für die Generierung einer Vergleichsgröße wird in dieser Arbeit ein rein quantitativer Ansatz (Aufwand der Realisierung von betriebsbereiten Anlagen als Investition) verfolgt, da dieser Ansatz im industriellen Umfeld zu einem objektiven Vergleich führt. Ein zweiter Grund für die Wahl eines rein quantitativen Ansatzes ist das detaillierte Vorhandensein der Eingangsgrößen einschließlich deren Zugänglichkeit. Da im industriellen Umfeld die Entwurfsprozesse mit einer Phase der Wirtschaftlichkeitsbewertung beginnen, werden die Investitionen in Betriebsmittel inkl. Entwurfsaufwand, Komponentenbeschaffung sowie Aufbau und Inbetriebnahme detailliert bewertet. Im Projektverlauf werden die Investitionssummen laufend im Rahmen des Projektcontrollings überwacht und bei Bedarf angepasst. Das führt dazu, dass die Investitionen anteilig nach Aktivitäten während des gesamten Entwurfsprozesses transparent berichtet werden und damit als Eingangsgröße für eine Vergleichsbewertung verwendet werden können. Ein alternativer Ansatz für die Erfolgsmessung auf Basis einer umfangreichen, multikriteriellen Bewertung ist in [Drath et al. 2014] zu finden. Der Ansatz wurde aufgrund der hohen Komplexität bei großen Entwurfsprojekten im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

In der Abbildung 52 wird eine anteilige, quantitative Aufwandsbewertung für die Realisierung von Anlagen im Karosseriebau gezeigt. Der Aufwand für den Entwurfsprozess nimmt einen Anteil von etwa einem Viertel ein, gemessen an den Gesamtinvestitionen einer Karosseriebauanlage. Den größten Anteil haben die Anfertigung und die Inbetriebnahme der Hardware der Anlage. Zusätzlich ausgewiesen ist der Anteil von Investitionen in Komponenten. Diese mechatronischen Komponenten sind Standardkomponenten und Funktionsgruppen, wie Industrieroboter, die funktionsfertig beschafft werden und deshalb nicht gesondert entworfen werden müssen. Der Aufwand der Integration dieser zugekauften Einheiten ist in der Darstellung dem Bereich Konstruktion + Planung sowie dem Bereich Hardware zugerechnet. Zur Berechnung der Gesamtinvestitionen von funktionsfähigen Anlagen sind Projektmanagementkosten hinzugerechnet. Dieser Bereich enthält in der Abbildung auch Investitionen, die durch die Inbetriebnahme der gesamten

Karosseriebauanlagen einer Fabrik hin zum automatisierten, verketteten Betrieb anfallen.

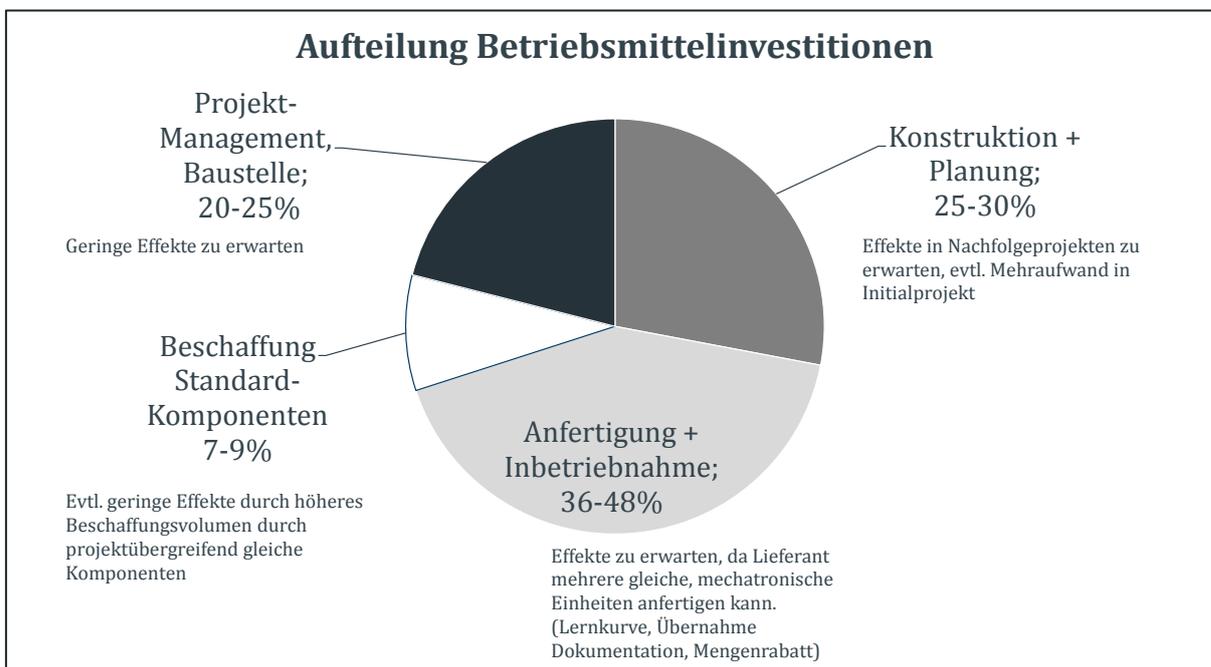


Abbildung 52: Beispielhafte, anteilige Investitionen zur Realisierung von betriebsbereiten Karosseriebauanlagen

Auf Basis der Aufteilung der anteiligen Investitionen in der Abbildung 52 kann der erwartete Nutzen abgeschätzt werden, der durch eine projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakten erwartet werden kann. Im Bereich Entwurf (Konstruktion und Planung) sind durch Wiederverwendung hohe Effizienzsteigerungen zu erwarten, da die Wiederverwendung direkt auf die Effizienzsteigerung im Entwurfsprozess abzielt (vgl. [VDI und VDE 2010c]). Zusätzlich können sich durch die Anwendung der projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten im Entwurfsprozess indirekte, positive Effekte in Bezug auf die Investitionshöhe im Bereich Anfertigung und Inbetriebnahme der mechatronischen Komponenten ergeben. Werden diese Aktivitäten durch einen externen Lieferanten durchgeführt, sind Preisnachlässe durch die sich ergebenden Lerneffekte im Umgang mit bekannten Objekten zu erwarten. Die Ähnlichkeiten der anzufertigenden mechatronischen Objekte ergeben sich unter anderem durch die Wiederverwendung von Artefakten im Entwurf, die letztendlich zu einer Ähnlichkeit der finalen Anfertigungsdaten mit bereits bekannten Objekten führen.

Ein dritter Bereich, in dem positive Effekte durch die projektübergreifende Wiederverwendung zu erwarten sind, ist der Bereich der Beschaffung von Standardkomponenten. Beim Entwurf funktional gleicher Anlagen in mehreren aufeinanderfolgenden Projekten, bei denen durch die Wiederverwendung von Komponentenlisten und Layouts die gleichen Standardkomponenten genutzt werden, erhöht sich das Beschaffungsvolumen der Komponenten, was zu Preisnachlässen bei den Lieferanten führen kann. Der Effekt im Bereich Beschaffung von Standardkomponenten beruht demnach indirekt auf der projektübergreifenden Wiederverwendung von Entwurfsartefakten.

Im vierten Bereich des Projektmanagements und der Inbetriebnahme der gesamten Fabrik, der bis zu einem Viertel der Gesamtkosten ausmacht, sind ggf. geringe Effekte zu erwarten, da die diesem Bereich zuordenbaren Tätigkeiten in jedem Projekt anfallen und gerade im Sonderanlagenbau individuelle Lösungen erfordern.

Abschließend ist festzuhalten, dass bei der Bewertung des Nutzens der projektübergreifenden Wiederverwendung nicht nur die direkten Effekte auf die Entwurfsphase einzubeziehen sind, sondern weitere Aktivitäten zu berücksichtigen sind, in denen ebenfalls indirekte Effekte zu erwarten sind. Die Bewertung des Nutzens auf Basis der Gesamtinvestitionen, die zu einer funktionsfähigen Karosseriebauanlage führen, beinhalten somit mehrere überlagerte Effekte.

Die anteiligen Investitionsverteilungen, die in der Abbildung 52 exemplarisch für Karosseriebauanlagen dargestellt sind, sind nur für den Karosseriebau gültig. Die Höhe der zu erwartenden Effekte der Wiederverwendung ist direkt von der Verteilung der anteiligen Investitionen abhängig. Die Betrachtung der Verteilung der anteiligen Investitionen nach Aktivitäten im Gewerk Montage, die zu funktionsfähigen Montageanlagen führen, ist deutlich abweichend zu der im Karosseriebau (siehe Abbildung 53).

Dreiviertel der Betriebsmittelinvestitionen ergeben sich aus der Anfertigung und der Inbetriebnahme der Montageanlagen. Die Planung und die Konstruktion, also der Entwurf der Anlage, machen hingegen nur 10 – 15 % aus, vergleichbar dem Anteil des Projektmanagements, der 8 – 12 % ausmacht.

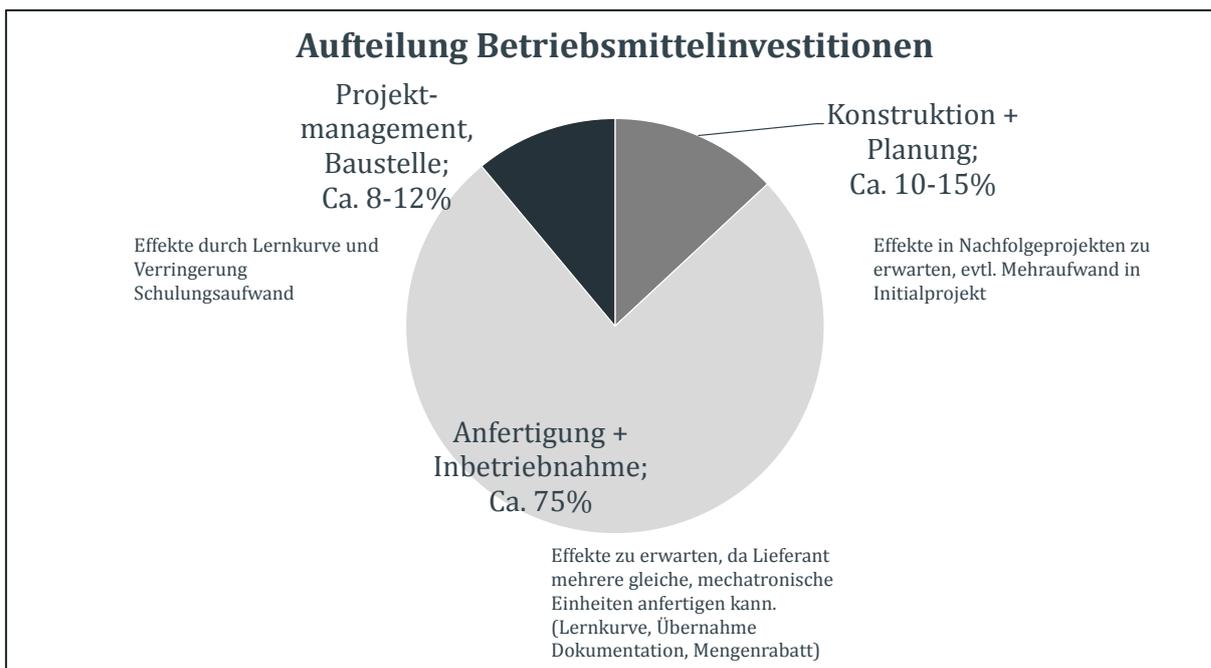


Abbildung 53: Beispielhafte, anteilige Investitionen zur Realisierung von betriebsbereiten Montageanlagen

Eine Steigerung der Effizienz des Entwurfsprozesses durch die Methode Wiederverwendung kann im Gewerk Montage ebenfalls einen positiven Effekt haben. Der absolute Einspareffekt ist jedoch im Vergleich zum Karosseriebau gering, da die durch den Entwurf verursachten Investitionen einen deutlich kleineren Anteil an den Gesamtinvestitionen ausmachen.

5.3 Zusammenfassung der Ausdetaillierung des Wiederverwendungskonzeptes

Um abschließend die Erkenntnisse des Lösungskonzeptes aus Kapitel 4 und dessen Ausdetaillierung in Kapitel 5 einschließlich der angewandten Methoden zur Unterstützung der projektübergreifenden Wiederverwendung in einen Gesamtzusammenhang zu bringen, wird für diese Zusammenfassung eine Einteilung von Dienstrollen für *14.0*-Geschäftsmodelle genutzt. Die projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakten kann als ein Spezialfall eines *14.0*-Geschäftsmodells angesehen werden, insofern kann eine Beziehung zwischen diesem Spezialfall und dem allgemeineren Modell hergestellt werden. Durch eine Zuordnung des Vorgehensmodells aus Abbildung 51 (Spezialfall) zu einer allgemeinen Strukturierung von Geschäftsmodellen der *14.0* (Allgemeinfall) in Abbildung

54, die auf dem Anbieten von Diensten beruht, lassen sich die eingeführten Methoden in dieser Arbeit anhand von drei Dienstfunktionen einteilen. Diese Dienstfunktionen sind: Dateninput, Datenaggregation und Datenverwertung. Durch die Zuordnung der in dieser Arbeit ausdetaillierten bzw. an den Spezialfall adaptierten Methoden zu den allgemeinen Dienstfunktionen der *Industrie-4.0*-Geschäftsmodelle lässt sich der Abdeckungsgrad der Methoden zeigen. Die Methoden unterstützen nicht nur eine einzelne Funktion wie die Datenaggregation, sondern unterstützen den gesamten Geschäftsmodellprozess.

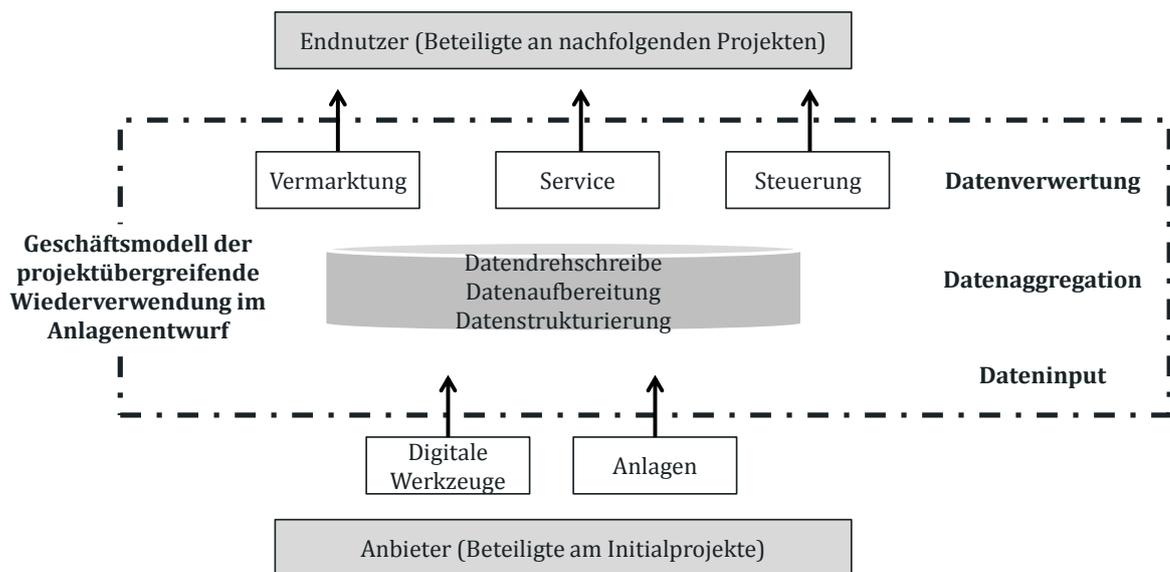


Abbildung 54: Überführung des Service- und Rollenmodells für die *Industrie 4.0* nach [Baums 2016] in ein spezifisches Modell für die Wiederverwendung im industriellen Anlagenentwurf

Die Zuordnung, der im Kapitel 4 und 5 beschriebenen Konzepte und Methoden zu den drei Dienstfunktionen von *Industrie-4.0*-Geschäftsmodellen, führt zu folgendem Ergebnis:

1. Dateninput

Im vorliegenden Vorgehensmodell wird die Rolle Dateninput durch den projektübergreifenden Entwurf ausgefüllt. In diesem Entwurf kann natürlich auch auf bereits vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden. Im weiteren Verlauf bilden die Wiederverwendungsprojekte ebenfalls eine Quelle für einen Dateninput.

Unterstützende Methoden bezogen auf die Service-Rolle Dateninput, die in dieser Arbeit ausgestaltet und angewandt worden sind:

- Analyse der entstehenden Artefakte im Entwurfsprozess (Abschnitt 5.1.1)
- Analyse Beschreibungsmittel der *Digitalen Fabrik* (Abschnitt 5.1.2)
- Ermittlung des Abdeckungsgrades (Abschnitt 5.1.3)
- Gütekriterien für die Bewertung von Entwurfsergebnissen (Abschnitt 5.1.4)
- Projektübergreifender Entwurfsprozess (Abschnitt 5.2.2)

2. Datenaggregation

Die Aufgabe der Datenaggregation ist eine Anforderung an die Funktionalität der Bibliothek als zentrale Datendrehscheibe. Die zentrale Methode des Lösungskonzepts aus Kapitel 4 für den in dieser Arbeit betrachteten Untersuchungsrahmen unterstützt die Steuerung dieser Funktionalität. Durch die Strukturierung der Entwurfsartefakte nach den Dimensionen Betriebsmittelebene (Hierarchie) und Wiederverwendungszeitpunkt lassen sich die Artefakte nach dem Dateninput strukturieren und anschließend durch den Abgleich mit den Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* inkl. der Beschreibungsmittel und den Entstehungs- und Verwendungszeitpunkten zu Datenpaketen zusammenfassen.

Unterstützende Methoden bezogen auf die Service-Rolle Datenaggregation, die in dieser Arbeit ausgestaltet und angewandt worden sind:

- Lösungskonzept der Artefaktstrukturierung (Kapitel 4.5)
- Analyse der entstehenden Artefakte im Entwurfsprozess (Abschnitt 5.1.1)
- Analyse der Beschreibungsmittel der *Digitalen Fabrik* (Abschnitt 5.1.2)
- Zuordnung von Artefakten zu Ebenen (Abschnitt 5.1.5)
- Identifikation der relevanten *Verwaltungsschalen* entsprechend der Betriebsmittelebenen zur Wiederverwendung der beinhaltenden Artefakte (Abschnitt 5.2.1)
- Analyse der Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte von Artefakten (Abschnitt 5.2.2)
- Ermittlung des Zeitpunktes ab dem eine vollständige virtuelle Repräsentation einer funktionsfähigen Anlage vorliegt (Abschnitt 5.2.3)

- Projektübergreifende Dokumentation der Wiederverwendung (Abschnitt 5.2.4)

3. Datenverwertung

Unterstützende Methoden bezogen auf die Service-Rolle Datenverwertung, die in dieser Arbeit ausgestaltet und angewandt worden sind:

- Feedback an die Produktentwicklung des Fahrzeuges auf Basis der grün und orange eingefärbten Komponenten im Rahmen der Ermittlung des Abdeckungsgrades (Abschnitt 5.1.3), um eine Anpassung der Entwurfsartefakte der Anlage zu vermeiden und die projektübergreifende Wiederverwendbarkeit zu steigern
- Auswahl der Artefakte für die konkrete Wiederverwendung in einem Projekt (Abschnitt 5.2.3)
- Projektübergreifende Dokumentation der Wiederverwendung (Abschnitt 5.2.4)
- Bewertung des Erfolges und des Nutzens der projektübergreifenden Wiederverwendung von Entwurfsartefakten (Abschnitt 5.2.6)

Die drei Dienstfunktionen, die für die projektübergreifende Wiederverwendung zwingend notwendig sind, sind im Abschnitt 5.2.5 (Durchführung) in einem Vorgehensmodell (Abbildung 51, Abschnitt 5.2.5) für den in dieser Arbeit betrachteten Spezialfall abgebildet, indem die Interaktion der Dienste dargestellt worden ist. Damit ist das allgemeine Modell aus Abbildung 54 durch die Betrachtung des Spezialfalles deutlich adaptiert und detailliert worden. Alle drei Dienstfunktionen sind abgedeckt, da sie durch unterschiedliche Methoden und Konzepte unterstützt werden.

6 Validierung und Diskussion der Ergebnisse

Nach dem Forschungsansatz von *Ulrich* bildet die Prüfung der adaptierten Methoden für den konkreten Anwendungsfall und das Ziehen von Rückschlüssen für die Praxis den Abschluss der Forschung. Zu diesem Zweck werden die Methoden in den Unterkapiteln 6.1, 6.2 und 6.3 in konkreten in der Praxis auftretenden Anwendungszusammenhängen geprüft. Dabei werden in den Unterkapiteln 6.1 und 6.2 Anwendungen im Karosseriebauanlagen-Entwurf geprüft sowie im Unterkapitel 6.3 die Methoden auf die Anwendung im Presswerkzeug-Entwurf übertragen. In Unterkapitel 6.4 werden im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse, Rückschlüsse für die konkrete Anwendung in der Praxis zu den in dieser Arbeit angewandten Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung abgeleitet und ein Ausblick auf eine unterstützende Modulbibliothek für die hier untersuchte Anwendung gegeben.

6.1 Wiederverwendung bei Neuprojekt im Karosseriebau

Mithilfe der ersten Fallstudie sollen die Forschungsfrage 1 vollumfänglich und die Forschungsfragen 2 bis 4 teilumfänglich adressiert werden. Dazu wurden in einem repräsentativen Karosseriebauentwurfsprojekt die in dieser Arbeit behandelten Methoden an die besonderen Anforderungen des Karosseriebauentwurfs adaptiert. Neuprojekt meint in diesem Zusammenhang, dass neu zu entwerfende Anlagen in eine bestehende Gebäudeinfrastruktur integriert werden müssen. Da diese erste Fallstudie alle relevanten Phasen des Entwurfsprozesses mit allen Aktivitäten abgedeckt, kann geprüft werden, ob die notwendigen Einheiten in jeder Entwurfsphase strukturiert zur Verfügung stehen. Die Forschungsfragen 2 bis 4 werden ebenfalls adressiert, allerdings unter speziellen Prämissen: Ein Fabrikgebäude ist bereits vorhanden, alle Betriebsmittel innerhalb des Gebäudes werden neu entworfen, angefertigt bzw. beschafft und in Betrieb genommen. Dieser Fall mit den entsprechenden Rahmenbedingungen tritt im betrachteten Untersuchungsrahmen häufig auf und ist deshalb für die Praxis sehr relevant.

Für diese oft auftretenden Prämissen sind die Ebenen auf der gut wiederverwendbare Einheiten im realen Projekt vorhanden waren, identifiziert worden (adressiert Forschungsfrage 2). Des Weiteren sind die Informationen identifiziert worden, die je Ebene real benötigt worden sind (adressiert Forschungsfrage 3). Die Vorteilhaftigkeit der systematischen Wiederverwendung von Entwurfsdaten im Anlagenentwurf mit den in Kapiteln 4 und 5 zusammengestellten und ausdetaillierten Methoden wird durch den ökonomischen Effekt gezeigt, der im Rahmen der Anwendung im realen Projekt (Fallstudie 1) erzielt werden konnte unter den erwähnten Prämissen (adressiert Forschungsfrage 4). In der Tabelle 21 sind die Projektprämissen der Fallstudie 1 zur Übersicht aufgelistet.

Tabelle 21: Projektprämissen der Fallstudie 1

Prämissenkategorie	Ausprägung
Projekt	Karosseriebauentwurf für PKW
Phasen	Konzeptphase bis Inbetriebnahme
Produkt	Gleiches/Konzeptgleiches Produkt
Infrastruktur	Gebäude vorhanden, Anpassungen möglich
Ausbringungsmenge des Systems	30 Karossen pro Stunde
Untersuchungsrahmen/-umfeld	Siehe Unterkapitel 3.2
Mechanisierungsgrad	Hoch (90%)
Flexibilität	2 Typen ⁴
Wandlungsfähigkeit	Flächenvorhalt für einen weiteren Typen
Art der Wiederverwendung	Projektübergreifend zwischen Initialprojekt und Nachfolgeprojekt, Zeitversatz: 3 Monate

Im einem initialen Schritt wurde die bekannte Strukturierung (siehe Kapitel 4 und 5) genutzt und darin die prinzipiell zur Verfügung stehenden Datenpakete markiert (vgl. Abbildung 46, Abschnitt 5.2.1). Die relevanten Einheiten inkl. deren Entwurfsartefakte konnten mithilfe der Struktur grafisch abgebildet werden.

⁴ Als Typen werden in diesem Zusammenhang gefügte Baugruppen bezeichnet, die am Anfang und am Ende der betrachteten Anlage einen vergleichbaren Bauzustand bzw. -fortschritt aufweisen, jedoch aufgrund der unterschiedlichen Bauteilgeometrien, Fügeverfahren, benötigter Fügeoperationen oder Anzahl der Einzelteile nicht mit genau denselben Behältern, Greifern, Geometriestationen, Spannkonzepthen oder Betriebsmitteln gefertigt werden können, wodurch die Anlage entsprechend tyflexibel zu gestalten ist.

Eine Auswahl des Projektes, aus dem Entwurfsergebnisse wiederverwendet werden sollten, erfolgte hier über die Bündelung von Projekten mit Produkten gleicher Fahrzeugbaukästen und Fahrzeugtypen (vgl. Abschnitt 5.2.3) und Angleichung der Prämissen wie der Ausbringungsmenge. Diese Projekte wurden gemeinsam betrachtet, wobei bei dem Entwurf des Initialprojektes auf eine projektübergreifende Wiederverwendbarkeit geachtet worden ist durch Berücksichtigung der Anforderungen der einbezogenen Nachfolgeprojekte. Als gutes Hilfsmittel erwies sich die Systematik zur Potenzialabschätzung durch farbliche Markierung des Wiederverwendungsumfanges (vgl. Abbildung 49, Abschnitt 5.2.4). Unter anderem wurde der Abdeckungsgrad erhöht durch die projektübergreifende Festlegung von zugekauften Komponenten und die Vereinbarung, produktunabhängige Elemente möglichst unverändert inkl. der Konstruktionsdaten zu übernehmen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Die in dem Abschnitt eingeführte Farbeinteilung der Elemente wurde demnach in Richtung dunkelblau (eine definierte Konstruktion) und orange (produktabhängige Elemente) beeinflusst, um möglichst viele Entwurfsartefakte wiederverwenden zu können. Bei gleichen zu fertigenden Produkten konnten außerdem die orange eingefärbten Elemente vereinheitlicht werden und demnach ebenfalls in dunkelblaue Elemente überführt werden. Damit wurde eine Grundvoraussetzung für die projektübergreifende Wiederverwendung von Einheiten höherer Ebenen geschaffen.

Da die projektübergreifende Wiederverwendung zwischen einem Initialprojekt und einem Nachfolgeprojekt erfolgte, entstanden die zur Wiederverwendung vorgesehenen Artefakte erst mit dem Initialprojekt und waren vor dem Projektstart dieses ersten Projektes in der Bibliothek nicht vorhanden (vgl. Abbildung 51, Abschnitt 5.2.5). Aufgrund dieser Tatsache und der Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte konnte das Datenpaket 2 nicht verwendet werden, weil es erst nach der abgeschlossenen Konstruktionsphase vorhanden ist. Bei dem vorliegenden 3-monatigen Projektversatz beträgt der Phasenversatz höchstens eine Entwurfsphase. Ein Versatz von 4 Phasen (Anfang Konzept bis Ende Konstruktionsphase) wird jedoch benötigt, damit das Datenpaket 2 entstanden ist und damit wiederverwendet werden kann. Das Datenpaket 1 konnte nur sehr eingeschränkt genutzt werden, da die Fabrikgebäude bereits vorhanden waren und die Einheiten Ebenen 6-8 an die vorhandenen Hallenflächen individuell angepasst werden mussten. Einzelne organisatorische Artefakte auf Ebenen 5-6 konnten jedoch wiederverwendet

werden, wie der grundsätzliche Fertigungsfluss, die Abmessungen der Arbeitseinheiten und die betriebswirtschaftlichen Daten zur Abschätzung der Investitionshöhe. Die Datenpakete 3-5 konnten vollständig wiederverwendet werden, wobei alle Datenpakete aufgrund des 3-monatigen Versatzes noch während des Entwurfs des Initialprojektes weitergegeben worden sind. Die Artefakte beider Projekte wiesen folglich noch Änderungsbedarf auf, z. B. als Resultat von Produktänderungen, die getrennt durchgeführt werden mussten.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Menge der zur Wiederverwendung stehenden Artefakte (hier in Datenpakete vorliegend) und der Umfang der Artefaktwiederverwendung durch die Prämisse Projektversatz, verbunden mit den Entstehungs- und Verwendungszeitpunkten sowie durch vorhandene Gebäude, reduziert werden. Zudem befinden sich beide Projekte in leichtem Versatz in der Entwurfsphase und unterliegen in der Praxis laufend Anpassungsbedarfen, auch bei jenen Artefakten, die bereits vollständig in derselben oder in weiter zurückliegenden Entwurfsphasen entworfen worden sind.

Durch die projektübergreifende Wiederverwendung mit verbundener Ähnlichkeit der Artefakte zwischen Initial- und Nachfolgeprojekten konnten die notwendigen Artefaktaktualisierungen aufgrund externer Anforderungen größtenteils doppelt durchgeführt werden, was in der Folge zu einer Aufwandsverringerung im Änderungsmanagement führte.

Voraussetzung dafür ist eine Dokumentation der wiederverwendeten Datenpakete aus dem Initialprojekt und damit das Sichtbarmachen der Beziehungen zwischen den Artefakten der beiden Projekte. Auf diese Weise werden die Artefaktänderungen im Initialprojekt laufend verfolgt. Anschließend erfolgt eine Information an das Nachfolgeprojekt inkl. des Grundes der Änderung und des Resultates der Artefaktänderung. So können im Nachfolgeprojekt die Änderungen unverändert übernommen werden oder zumindest ähnlich umgesetzt werden unter der Wiederverwendung des Änderungskonzeptes. Im Ergebnis hat sich bei diesem Vorgehen im Projekt eine Verringerung des Änderungsaufwandes gezeigt.

Die Abbildung 55 zeigt die in der Fallstudie 1 als relevant identifizierten und wiederverwendeten Datenpakete inkl. der relevanten Einheitenebenen. Zusätzlich sind mit Pfeilen die Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte ausgewiesen.

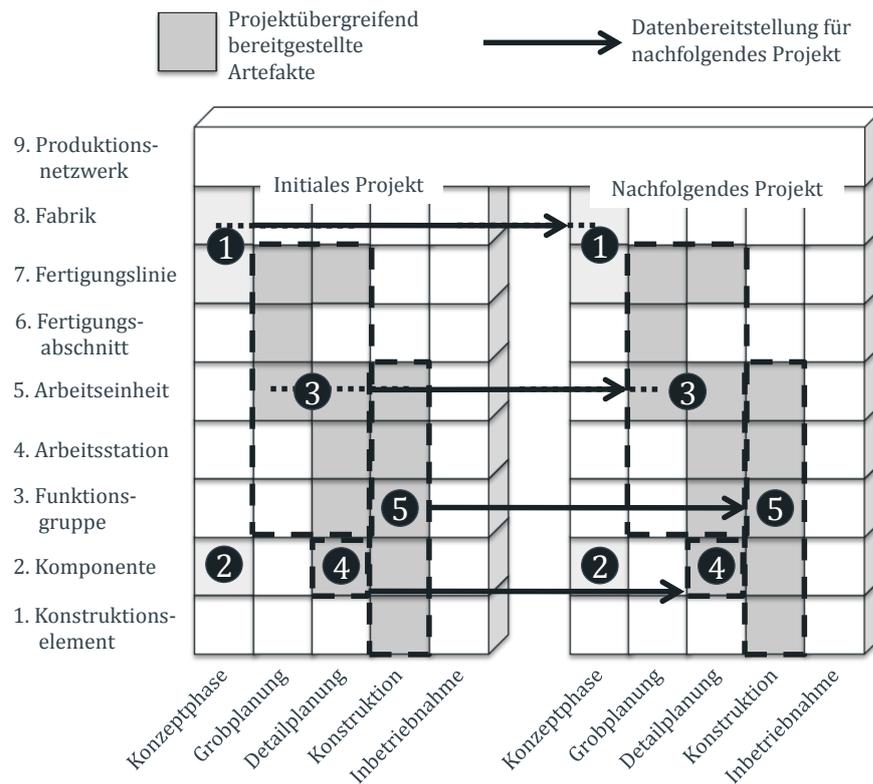


Abbildung 55: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 1

Die Effektivität des Vorgehens zeigte sich in der Verringerung des Aufwandes, der als ökonomischer Effekt in Abbildung 56 ausgewiesen ist. Die Durchführung der projektübergreifenden Wiederverwendung zwischen den beiden Projekten führte zu einer relativen Einsparung der Gesamtinvestitionen von ca. 20% unter den angegebenen Projektprämissen. Die Einsparung wurde errechnet durch den Vergleich zwischen der Investitionsschätzung zum Ende der Konzeptphase mit der tatsächlichen Investitionshöhe, die nach der Vergabe an den Lieferanten zwischen der Detailplanungs- und Konstruktionsphase ermittelt werden kann, da zu diesem Zeitpunkt alle veranschlagten Investitionen vertraglich festgelegt sind.

Risikopuffer und spätere ungeplante Investitionen werden vernachlässigt, da sie nicht mit der ursprünglichen Vergleichsgröße zum Ende der Konzeptphase verglichen werden können, aufgrund unterschiedlicher Umfänge. Zur Bewertung der Effektivität der Wiederverwendung im Anlagenentwurf werden die späteren zusätzlichen Investitionen nicht berücksichtigt, da der Auslöser in den Projekten selbst liegt (z. B. Produktänderungen) und nicht in Beziehung mit der Wiederverwendung im Entwurfsprozess steht. Des Weiteren

fallen die zusätzlichen Kosten und Investitionen teilweise außerhalb des hier betrachteten Entwurfsprozesses an und können deshalb zum Betrieb einschließlich des Anlaufes gezählt werden.

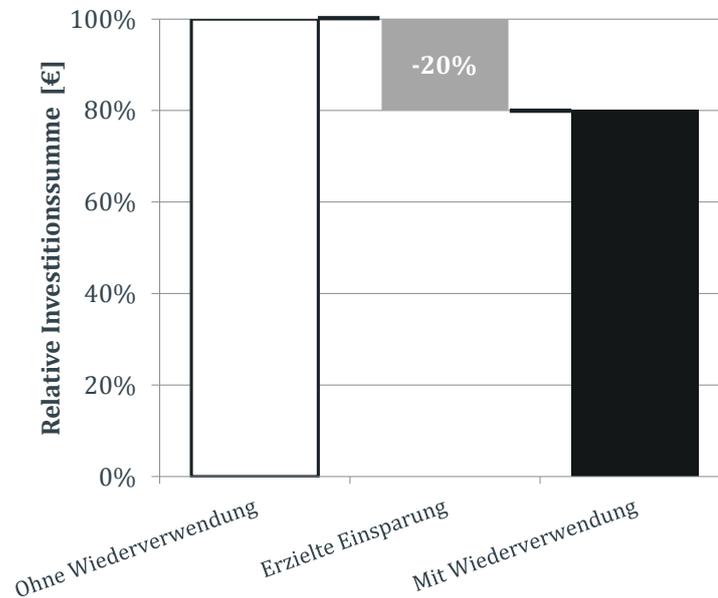


Abbildung 56: Ökonomischer Effekt durch Anwendung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 1

Eine weitere wichtige Methode ist die Ermittlung der Gütekriterien der Anlage (vgl. Abschnitt 5.1.4), um festzustellen, ob das Entwurfsergebnis des Initialprojektes vorteilhaft gegenüber den bereits vorhandenen Entwurfsergebnissen ist. Die Güte des Entwurfes, der wiederverwendet werden soll, muss höher sein als andere vorhandene Entwürfe aus früheren Projekten, damit die Methode Wiederverwendung neben den ökonomischen Effekten auch qualitativ zu einem besseren Entwurf führt. Die Bewertung des Entwurfsergebnisses des Initialprojektes im Vergleich zu einem vorhandenen Standardentwurf (alternativer Einheiten zur Wiederverwendung) hat gezeigt, dass nicht alle fünf Kriterien grundsätzlich besser erfüllt sind. Je nach Projektziel nutzen die entworfenen Arbeitseinheiten z. B. besonders gut die Fläche aus, weisen aber höhere Investitionskosten auf. In Abbildung 41 (Abschnitt 5.1.4) ist ein Ergebnis dargestellt. Da im Rahmen des Projektes der Fallstudie 1 der Fokus auf den Investitionen und dem effizienten Einsatzes der Roboter und der Werker lag, kann in der Abbildung der Entwurf A als vorteilhaft bewertet werden, der in diesem Fall das Entwurfsergebnis des Initialprojektes darstellt. Die Gütekriterien bilden zugleich eine multikriterielle Sichtweise, die für den in der Abbildung

gezeigten Fall, dem Entwurf B, eine Vorteilhaftigkeit in der Flächenausnutzung ausweist. Es bleibt die Aufgabe des Anwenders, die passenden Einheiten entsprechend der individuell definierten Projektziele auszuwählen.

Die Dokumentation der Wiederverwendung erfolgte für die Weitergabe und Verfolgung der Datenpakete durch eine zentrale Stelle. Somit waren die verwendeten Datenstände transparent nachvollziehbar. Für das Änderungsmanagement erwies sich die zentrale Stelle größtenteils als nicht notwendig, da die artgleichen Artefakte durch dieselben organisatorischen Einheiten für beide Projekte geändert worden sind und sich ein direkter Kontakt als effizienter und effektiver herausgestellt hat.

6.2 Wiederverwendung bei Integrationsprojekt im Karosseriebau

Mithilfe der zweiten Fallstudie sollen ebenfalls die Forschungsfrage 1 vollumfänglich und die Forschungsfragen 2 bis 4 teilumfänglich adressiert werden. Dazu wurden in einem repräsentativen Karosseriebauentwurfs-Projekt die in dieser Arbeit behandelten Methoden an die besonderen Anforderungen des Karosseriebauentwurfs adaptiert. Es wird ebenfalls geprüft, ob die notwendigen Einheiten in jeder Entwurfsphase strukturiert zur Verfügung stehen. Die Forschungsfragen 2 bis 4 werden ebenfalls adressiert, allerdings unter speziellen Prämissen: Ein Fabrikgebäude ist bereits vorhanden, alle Betriebsmittel innerhalb des Gebäudes werden weiterhin genutzt, es sei denn, eine Integration eines neuen Produktes ist im Einzelfall nicht möglich. Dieser Fall eines Integrationsprojektes mit den entsprechenden Rahmenbedingungen tritt im betrachteten Untersuchungsrahmen häufig auf und ist deshalb für die Praxis sehr relevant. In der Tabelle 22 sind die Projektprämissen der Fallstudie 2 zur Übersicht aufgelistet.

Tabelle 22: Projektprämissen der Fallstudie 2

Prämissenkategorie	Ausprägung
Projekt	Karosseriebauentwurf für PKW, wobei eine Integration eines Fahrzeugtyps in eine bestehende Karosseriebaufertigungslinie erfolgt
Phasen	Grobplanung bis Inbetriebnahme
Produkt	Gleiches/Konzeptgleiches Produkt wie Initialprojekt

Infrastruktur	Gebäude vorhanden, Anpassungen sind beschränkt möglich, da Anlagen weiterhin in Betrieb sind
Ausbringungsmenge des Systems	60 Karossen pro Stunde
Untersuchungsrahmen/-umfeld	Siehe Unterkapitel 3.2
Mechanisierungsgrad	mittel (50%)
Flexibilität	2 Typen
Wandlungsfähigkeit	Flächen vorhanden, die für dieses Projekt genutzt werden kann
Art der Wiederverwendung	Projektübergreifend zwischen Initialprojekt und diesem Nachfolgeprojekt, Zeitversatz: 6 Monate

Analog zum Vorgehen in Fallstudie 1 konnte hier ebenfalls die eingeführte Einheitenstrukturierung (vgl. Unterkapitel 4.5) genutzt werden und alle zur Verfügung stehenden Einheiten inkl. der zugeordneten Artefakte je Ebene abgebildet werden. Durch die Projektprämissen der Fallstudie 2, insbesondere der Tatsache, dass die bestehenden Betriebsmittel der Fertigungslinie weiterhin genutzt werden sollten und ein neues Produkt bei laufendem Betrieb zusätzlich integriert werden sollte, war der Umfang der baulichen Anpassungsmöglichkeiten an den Anlagen stark eingeschränkt. Aufgabe war es die Typenflexibilität der Fertigungslinie zu erhöhen, sodass ein weiteres Produkt gefertigt werden konnte. Dieser Fall wurde ausgewählt, um die relevanten Ebenen und Artefakte zur Wiederverwendung zu untersuchen und die Entstehungs- und Verwendungszeitpunkte von Artefakten ebenfalls für diese Projektprämissen zu analysieren.

Die Abbildung 57 zeigt die in der Fallstudie 2 als relevant identifizierten und wiederverwendeten Datenpakete inkl. der relevanten Einheitenebenen. Zusätzlich sind mit Pfeilen die Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte ausgewiesen.

Im Vergleich zum idealen Fall (siehe Abbildung 46, Abschnitt 5.2.1) konnten unter diesen Bedingungen die vorhandenen Artefakte des Initialprojektes in nur stark reduziertem Umfang genutzt werden. Da die Arbeitsstationen und Arbeitseinheiten bereits physisch vorhanden waren und weiter genutzt werden sollten, konzentrierte sich der Entwurf auf die Ebenen 1-3, Konstruktionselement bis Funktionsgruppe. Diese Elemente wurden neu entworfen und in die bestehenden Arbeitsstationen bzw. Arbeitseinheiten integriert.

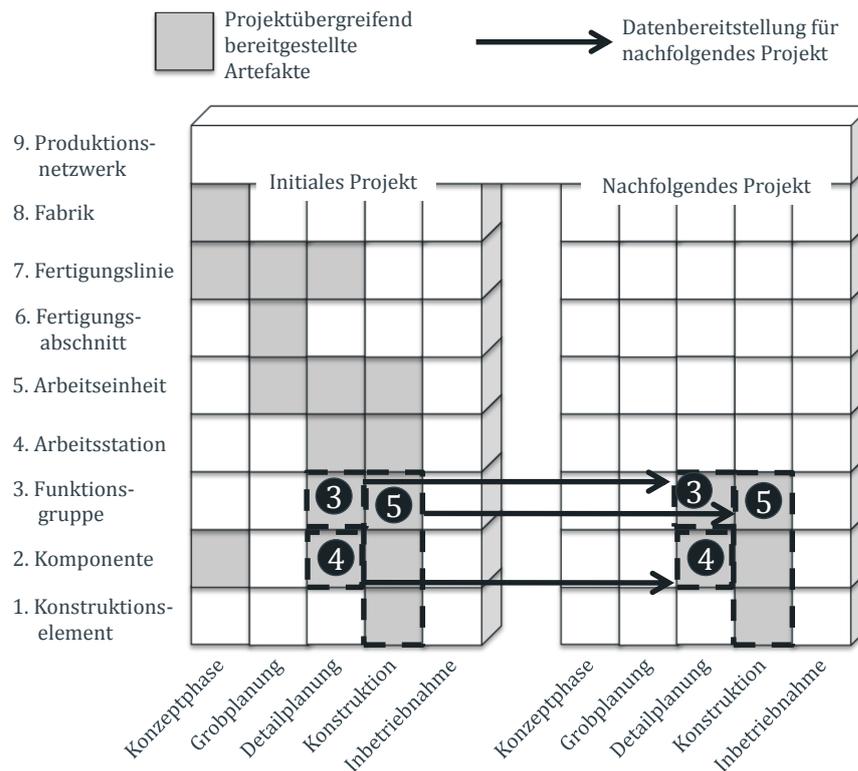


Abbildung 57: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 2

Durch das Lösungskonzept und dessen Adaptierung auf die Fallstudie 2, wie in Abbildung 57 dargestellt, konnten die relevanten Ebenen und deren Informationen sowie die Entstehungs- und Wiederverwendungszeitpunkte vor Projektstart hinreichend genau bestimmt werden. Im Projekt bestätigte sich die Tatsache, dass die Datenpakete 3-5 wiederverwendet werden konnten, allerdings nur diejenigen Informationen, die den Ebenen 1-3 zugeordnet gewesen sind. Das Datenpaket 2, d. h. die Informationen über die verwendeten Schweißzangentypen, konnte nicht genutzt werden, da die bestehenden Anlagen möglichst unverändert weitergenutzt werden sollten. Daher sind die zugehörigen Artefakte aus dem Initialprojekt für diesen *engineered-to-order* Fall nicht nutzbar, sondern bedürfen einer individuellen Lösung, die weiterhin zu fertigen Altprodukte mit berücksichtigt. Die Strukturierung der Einheiten entsprechend des Lösungskonzeptes half in diesem in der Praxis häufig auftretenden Fall zur Durchführung der systematischen, projektübergreifenden Wiederverwendung.

Die weiteren Methoden, die analog zur Fallstudie 1 angewandt werden konnten, werden an dieser Stelle mit dem Verweis auf das Unterkapitel 6.1 nicht erneut erläutert. Im Unterschied zur Fallstudie 1 sind die mechatronischen Einheiten bereits vorhanden. Sollten im Initialprojekt andere mechatronische Einheiten verbaut sein, insbesondere auf der Ebene 2: Komponente und der Ebene 3: Funktionsgruppe, dann können die vorhandenen Artefakte des Initialprojektes im aktuellen Projekt nicht wiederverwendet werden. Ein Beispiel sind andere Roboterhersteller, -typen oder eine andere -positionierung, die eine sinnvolle Wiederverwendung der Offline-Programmierung verhindert. Als besonders gut wiederverwendbar stellten sich Artefakte mechatronischer Einheiten mit direktem Produktkontakt heraus, z. B. Geometrievorrichtungen. Im industriellen Lösungsgeschäft mit *engineered-to-order* Lösungen und der Aufgabe einer Integration eines weiteren Produktes konnten wenige Artefakte des Initialprojektes wiederverwendet werden, jedoch half das Lösungskonzept bei der Identifizierung der möglichen wiederverwendbaren Einheiten und der systematischen Durchführung der Wiederverwendung. Durch die Zuordnung der Artefakte zu Ebenen konnten die vorhandenen Artefakte bzw. Datenpakete gezielt identifiziert werden und über ihre zugeordnete Ebene die Wiederverwendungszeitpunkte im Nachfolgeprojekt ermittelt werden. Eine Dokumentation der Wiederverwendung durch eine zentrale Stelle inkl. der Datenstände wurde durchgeführt. Da das Initialprojekt zum Zeitpunkt der Datenübergabe noch nicht abgeschlossen worden ist und es durch externe Anforderungen zu Artefaktänderungen kommt, sind diese Änderungen dem Nachfolgeprojekt mitzuteilen. In der Praxis erwies es sich als zielführend, dass die Personengruppen, die jeweils eine gleiche Entwurfsaktivität, aber in unterschiedlichen Projekten durchführen, einen direkten Kontakt aufnehmen.

Nach Auswertung der beiden Fallstudien 1 und 2 folgt eine Einbeziehung weiterer Projekte. Insgesamt umfasste die Wiederverwendung fünf Projekte, wobei das davon am weitesten fortgeschrittene Projekt das Initialprojekt ist. Ziel dieser Betrachtung von fünf Entwurfsprojekten, die sich in unterschiedlichen Entwurfsphasen befanden, ist die Fragestellung nach der Ebene, auf der sich gut wiederverwendbare Einheiten befinden. Die Abbildung 58 zeigt die wiederverwendeten, von den Projektbeteiligten angefragten

Datenpakete. Zu diesem Zeitpunkt waren die Projekte in unterschiedlichen Entwurfsphasen, wie es sich am Zeitstrahl und auch anhand der angeforderten Datenpakete erkennen lässt.

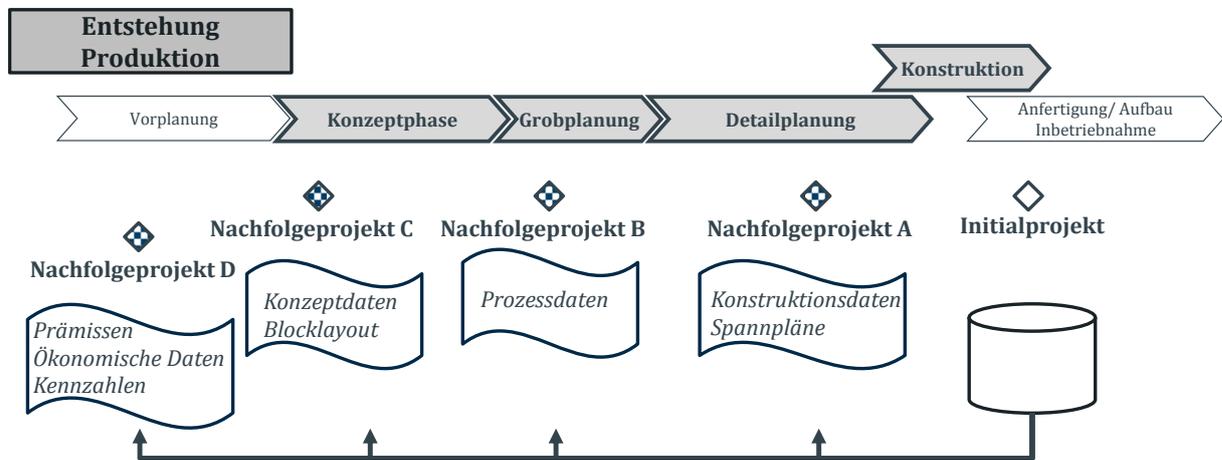


Abbildung 58: Reale Anfragen (Pull-Prinzip) nach Datenpaketen aus Initialprojekt von Projekten mit unterschiedlichem Entwurfsfortschritt

Diese Auswertung der durchgeführten, projektübergreifenden Wiederverwendung von Entwurfsartefakten zeigt, dass für die untersuchten komplexen Entwurfsprojekte, Einheiten mit ihren Artefakten einer einzigen Ebene nicht ausreichen. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Entwurf werden zur Unterstützung der jeweils anstehenden Entwurfsaktivität unterschiedliche Inputdaten benötigt, was sich zuvor durch die Prozessaufnahme (siehe Abschnitt 5.1.1) gezeigt hat. Durch die hier vorgenommene Auswertung konnte die Notwendigkeit der Artefaktstrukturierung nach Ebenen eines Produktionssystems und nach Entwurfsphasen in der Praxis bestätigt werden. Eine einzige Ebene, auf der gut wiederverwendbare Einheiten vorhanden sind, konnte somit nicht identifiziert werden. Vielmehr sind auf jeder Ebene wiederverwendbare Einheiten mit ihren Artefakten vorzuhalten, die je nach Projektanforderung (Anlageneuentwurf oder Integrationsprojekt) und Phase individuell abrufbar sind.

6.3 Wiederverwendung im Presswerkzeugentwurf

In diesem Unterkapitel 6.3 wird auf die Übertragbarkeit des Lösungskonzeptes und der Methoden auf ein anderes Gewerk der Automobilbaufertigung eingegangen. Dazu wurde das Gewerk Presswerk ausgewählt, das sich im Fertigungsfluss vor dem Karosseriebau

befindet. Im Fokus steht in diesem Gewerk der Entwurf von Presswerkzeugen, nicht aber der Entwurf von einzelnen Pressen oder Pressenstraßen, da diese zugekauft werden und eine sehr lange Lebensdauer besitzen und folglich aus Sicht eines Automobilbauunternehmens keine wiederkehrenden, regelmäßigen Entwurfsprozesse aufweisen. Die Presswerkzeuge, mit denen die Pressen bestückt werden, sind hingegen pressen- und produkt-spezifisch. Bei einer Verlagerung von Werkzeugsätzen ist ggf. eine Anpassung notwendig. Zur Fertigung eines neuen Produktes, genauer neuer Blechteile, sind in jedem Fall neue Werkzeugsätze zu entwerfen, da die Werkzeugsätze immer zur Herstellung genau eines definierten geometrischen Bauteiles dienen. Der Ablauf der Entwurfsprozesse im Gewerk Presswerk einschließlich der digitalen Werkzeugkette wird vertiefend in [Bracht, Geckler und Wenzel 2011] beschrieben.

Im betrachteten Fall sollten zwei Werkzeugsätze für identische Blechteile entworfen werden, da die Teile an unterschiedlichen Standorten gefertigt werden mussten. Eine Wiederverwendung der Entwurfsartefakte zwischen dem Initial- und dem Nachfolgeprojekt analog der Durchführung im Karosseriebauentwurf wurde beabsichtigt. Zwischen beiden Projekten war ein 3-monatiger Versatz vorhanden. Da das Lösungskonzept aus Abschnitt 4.5 im dreidimensionalen Zustand zwischen den vier Fertigungswerken der Automobilfertigung unterschieden hat, ist eine Prüfung der Übertragbarkeit auf den Presswerkzeugentwurf sinnvoll.

Als Ergebnis hat sich gezeigt, dass die Strukturierung ebenfalls im Gewerk Presswerk zur Steuerung der systematischen Wiederverwendung beitragen kann. Die Datenpakete und die Artefakte unterschieden sich gänzlich von denen im Karosseriebauentwurf. Für die Wiederverwendung im Presswerkzeugentwurf sind drei Datenpakete relevant: der Methodenplan (Paket 1, Abbildung 59), der Wirkflächenentwurf (Paket 2) und die Konstruktionsdaten (Paket 3). Diese Datenpakete fließen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den Entwurfsprozess ein und lassen sich unterschiedlichen Einheitenebenen zuordnen. Wie für die Wiederverwendung im Karosseriebauentwurf, kann im Bereich des Presswerkzeugentwurfs eine Unterscheidung nach Ebenen und Entwurfsphasen zur effektiven Strukturierung der Artefakte verhelfen. Die Abbildung 59 zeigt die in der Fallstudie 3 als

relevant identifizierte und im Idealfall (gleiches Bauteil, gleiche Pressen, Zeitversatz zwischen Projekten) wiederverwendete Datenpakete inkl. der relevanten Einheitenebenen in analoger Darstellungsweise zu den Abbildungen in den Unterkapiteln 6.1 und 6.2.

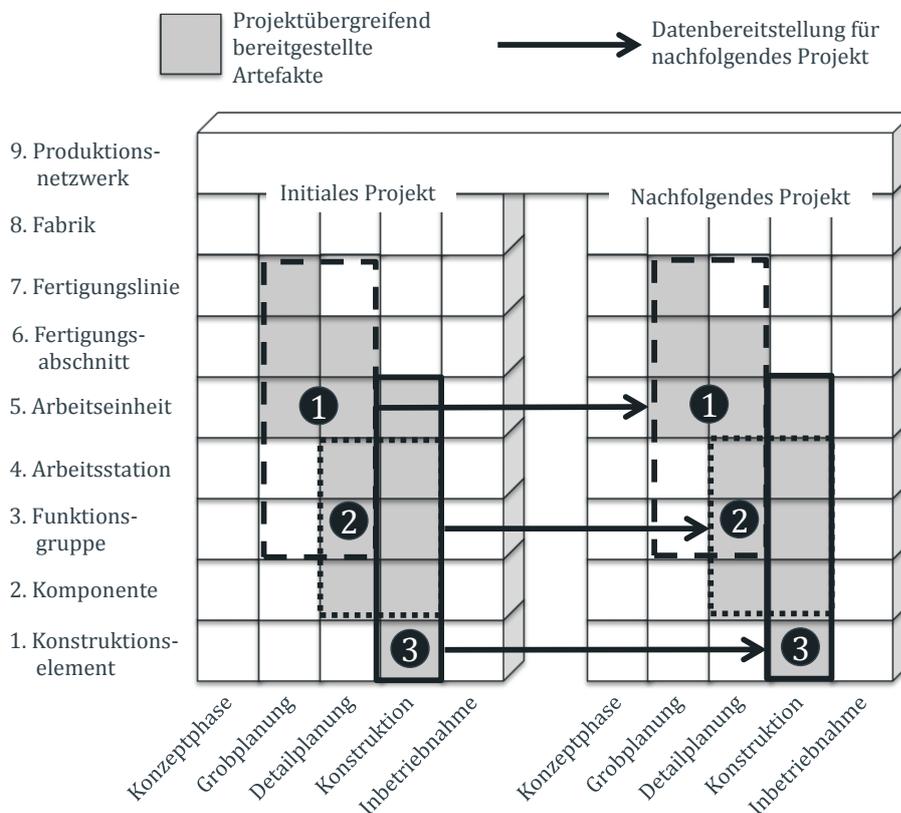


Abbildung 59: Schematische Darstellung der Wiederverwendung im Rahmen der Fallstudie 3

Wichtigste Bedingung für die projektübergreifende Artefaktwiederverwendung ist das gleiche zu fertigende Bauteil in den betrachteten Projekten. Je nach Projektprämissen, d. h. ob projektübergreifend gleiche Pressen zum Einsatz kommen und wie lang der Zeitversatz zwischen den Projekten ist, können dann die passenden Artefakte zur Wiederverwendung durch die Strukturierung zielgerichtet ausgewählt werden. Für jedes zu fertigende Bauteil mit dem zugehörigen Presswerkzeugsatz ist dann eine individuelle Artefaktwiederverwendung zu prüfen unter Berücksichtigung der projektübergreifenden Rahmenbedingungen, d. h. der zu verwendenden Presse, des Zeitversatzes im Projekt und des werkzeugaubenden Unternehmens.

Die Fallstudie im Presswerkzeugentwurf hat gezeigt, dass analog zum Entwurf im Karosseriebau Informationen von Einheiten mehrerer Hierarchieebenen für die projektübergreifende Wiederverwendung benötigt werden. Die relevanten Informationen bzw. wiederverwendbaren Einheiten können identifiziert und strukturiert werden mithilfe der für den Karosseriebau bereits genutzten Strukturierung nach Hierarchieebenen und Entwurfsphasen.

6.4 Diskussion der projektübergreifenden Wiederverwendung und Anforderungen an eine Bibliothek

Unter den in der Praxis oft auftretenden Prämissen, die in den Fallstudien 1 und 2 definiert worden sind, zeigte sich die erfolgreiche Anwendbarkeit des Lösungskonzeptes und der Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung für den Karosseriebauentwurf. Die erfolgreiche Anwendung im Untersuchungsumfeld profitierte von der Anzahl der zeitversetzten Entwurfsprojekte. Eine Vorausschau auf die Entwurfsprojekte einschließlich eines Prämissenabgleiches (bzgl. zu fertigender Produkte, Ausbringungsmenge, Automatisierungsgrad) konnte durchgeführt werden, um über identische Fahrzeugbaukästen eine initiale Einbeziehung von fünf Projekten anzustellen. Diese fünf Projekte waren der Ausgangspunkt der Untersuchung, da die Erfahrungen der Methode Wiederverwendung im IT-Umfeld eine Vorteilhaftigkeit erst ab drei Projekten zeigten (siehe Abbildung 21, Abschnitt 2.2.2). Die Anwendung der projektübergreifenden Wiederverwendung in dieser Arbeit von Entwurfsdaten in großen Entwurfsprojekten des industriellen Lösungsgeschäfts, zu denen die hier untersuchten Karosseriebauentwürfe zählen, zeigte, dass in diesem Fall bereits zwei Projekte ausreichen, um eine ökonomische Vorteilhaftigkeit zu erzielen (vgl. Fallstudie 1). Zudem profitierte die in dieser Arbeit durchgeführte Anwendung von der Verfügbarkeit der meisten und wichtigsten Entwurfsartefakte, die während des Entwurfsprozesses entstehen, aufgrund der großen Anzahl von firmenintern durchgeführten Entwurfsaktivitäten. Die Artefaktverfügbarkeit und -zugänglichkeit ist keine Selbstverständlichkeit, da in einem langen Entwurfsprozess einzelne Aktivitäten outsourced werden oder aufgrund fehlender Kompetenz zwangsweise von einem externen Lieferanten durchgeführt werden und damit die Artefakte

ohne vertragliche Regelung nicht ohne weiteres für eine Wiederverwendung in Nachfolgeprojekten zur Verfügung stehen. Umgangen werden kann dieses Problem unter anderem durch die projektübergreifende Beauftragung desselben Lieferanten für ausgewählte Entwurfsaktivitäten oder durch gezielten Einkauf des „digitalen Schattens“, also aller Entwurfsartefakte der mechatronischen Einheiten. Da rechtliche, ökonomische und organisatorische Aspekte der Artefaktverfügbarkeit und -zugänglichkeit nicht Inhalt der Forschungsfragen waren, wird auf dieses Themenfeld nicht näher eingegangen, es wäre von Interesse für zukünftige Forschungsvorhaben.

Wie in vorangegangenen Veröffentlichungen und Forschungen zum Thema Wiederverwendung im Entwurfsprozess in anderen Industriebranchen wurde unterstützend ein Prototyp einer Bibliothek zur Ablage notwendiger Informationen über vorhandene, wiederverwendbare Einheiten für das untersuchte Umfeld entworfen. Dazu wurden zunächst die besonderen Anforderungen im Untersuchungsrahmen analysiert, daraus anschließend Spezifikationen abgeleitet und diese prototypisch realisiert. Ziel der Bibliothek ist das Bereitstellen von Basisinformationen über bereits realisierte Anlagen (Ebene Arbeitseinheit) und über deren verfügbare Artefakte bzw. Datenpakete. Die Bibliothek ersetzt nicht die vorhandenen Systeme der *Digitalen Fabrik* im Untersuchungsrahmen, in denen die Artefakte weiterhin entstehen und verwaltet werden, sondern unterstützt als Front-End das Auffinden der passenden Artefakte. Zudem werden Zusammenhänge zwischen Artefakten unterschiedlicher digitaler Werkzeuge hergestellt, indem sie entsprechend der in dieser Arbeit beschriebenen Ebenenstruktur gekapselt werden. Die Ebenenstruktur bildet dabei ein werkzeugunabhängiges Metamodell und ist das zentrale Strukturelement der Informationsbereitstellung in der Bibliothek.

Die Abbildung 60 zeigt die realisierte Benutzeroberfläche der prototypischen Bibliothek sowie ein Blatt zur Beschreibung einer Einheit der Ebene Arbeitseinheit des Karosseriebaus. Auf diesem Beschreibungsblatt wird eine Anlage mit allgemeinen Attributen, wie Name und Investitionshöhe, sowie mit spezifischen Attributen, wie Fügeäquivalent, beschrieben. Außerdem wird auf die dazugehörigen Datenpakete verwiesen, die in spezifischen, digitalen Entwurfs-Werkzeugen vorliegen.

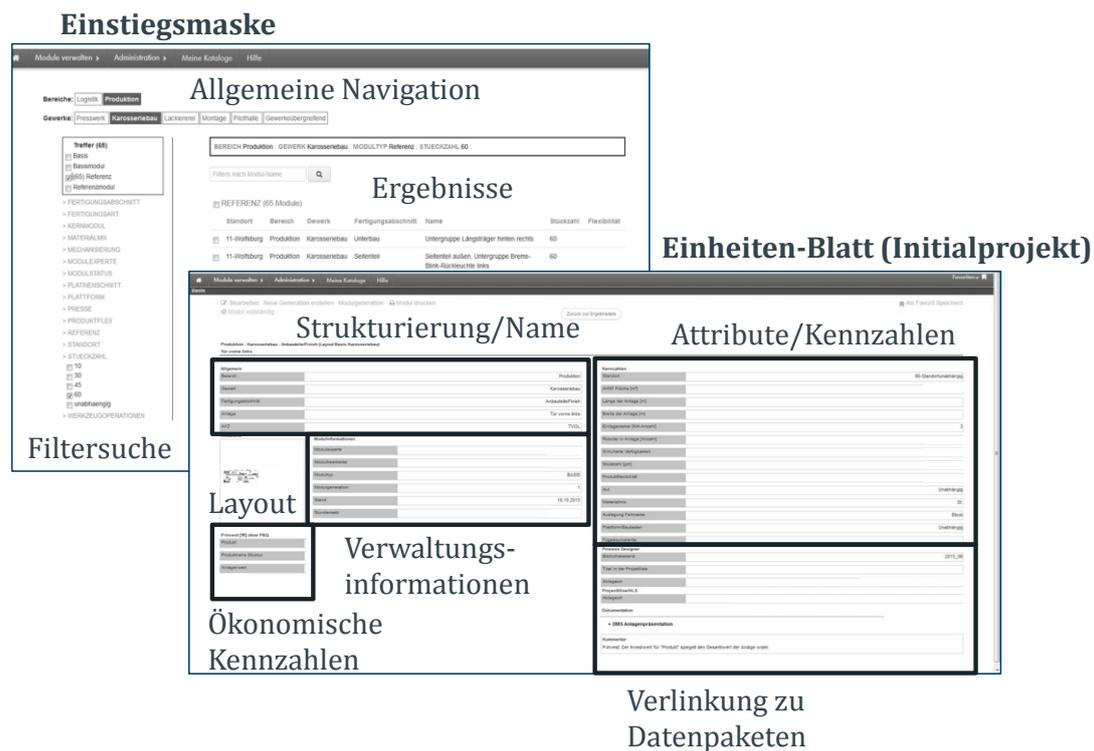


Abbildung 60: Prototyp einer Modulbibliothek für die Wiederverwendung von Entwurfsartefakten im Untersuchungsrahmen

Die Kernanforderungen an die Bibliothek, die sich aufgrund der praktischen Umsetzung im Untersuchungsrahmen ergeben, sind:

- Umsetzung der Ebenenstruktur als Navigationselement
- Bereitstellen von organisatorischen Basisinformationen und Projektprämissen auf Ebene der Arbeitseinheiten (u. a. Ausbringungsmenge, Fläche, Fahrzeugbaukasten/Fahrzeug(e), Mechanisierungsgrad, kalkulierte Investitionskosten, Version/Datenstand, realisierter Standort)
- Zuordnung von Datenpaketen zu Arbeitseinheiten inkl. Verlinkung zu Expertensystemen
- Auswählbarkeit von Arbeitseinheiten und speziell der einzelnen Datenpakete jeder Einheit zur Wiederverwendung
- Berechtigungskonzept zum Anlegen der Daten neuer Einheiten und Pflegen bereits hinterlegter Einheiten

- Je Gewerk und Ebene wird ein eigenes Einheiten-Blatt benötigt, da abgesehen von Basisdaten, wie Name, Investitionskosten, Datenstand etc., spezifische Beschreibungsattribute benötigt werden, z. B. im Presswerk: Anzahl der Operationsfolgen, im Karosseriebau: Anzahl der Fügeäquivalente oder Taktzeit (siehe Abbildung 61).

Presswerkzeug

Kennzahlen	
Standort	<input type="text"/>
Fahrzeugprojekt	<input type="text"/> + Hinzufügen
Plattform/Baukasten	<input type="text"/> --eine Auswahl treffen--
Modulstatus/Entwicklungsstand	<input type="text"/>
Bauteilnummer	<input type="text"/> + Hinzufügen
Fertigung	
Presse	<input type="text"/> + Hinzufügen
Anzahl Werkzeugoperationen	<input type="text"/>
Operationsnummer	<input type="text"/> OP20 <input type="text"/> OP30
Operationsschritt	<input type="text"/> Bitte angeben <input type="text"/> Bitte angeben
Platinenschritt	<input type="text"/>
Fertigungsart	<input type="text"/>
Ziehen	<input type="text"/>
Abstapeln	<input type="text"/>

Karosseriebauanlage

Kennzahlen	
Standort	<input type="text"/>
AHNF Fläche [m²]	<input type="text"/>
Länge der Anlage [m]	<input type="text"/>
Breite der Anlage [m]	<input type="text"/>
Einlegewerker [MA-Anzahl]	<input type="text"/>
Roboter in Anlage [Anzahl]	<input type="text"/>
Simulierte Verfügbarkeit	<input type="text"/>
Stückzahl [jph]	<input type="text"/>
Produktflexibilität	<input type="text"/>
Hut	<input type="text"/>
Materialmix	<input type="text"/>
Auslegung Fahrweise	<input type="text"/>
Plattform/Baukasten	<input type="text"/>
Fügeäquivalente	<input type="text"/>

Abbildung 61: Spezifische Beschreibungsattribute zur initialen Abschätzung der Wiederverwendbarkeit der immateriellen Artefakte

- Filtermöglichkeit der Einheitenwahl über Attribute (u. a. Ausbringungsmenge, Fläche, Fahrzeugbaukasten/Fahrzeug(e), Mechanisierungsgrad, kalkulierte Investitionskosten, Version/Datenstand, realisierter Standort)
- Unterscheidung der Einheiten zwischen Entwurfsergebnissen von Initialprojekten, deren Artefakte zur projektübergreifenden Wiederverwendung genutzt werden und Einheiten, die in Nachfolgeprojekten entstanden sind und bei denen Artefakte aus dem Initialprojekt wiederverwendet worden sind
- Dokumentation der Beziehungen zwischen Initialprojekten und Nachfolgeprojekten (Eltern-Kind-Beziehung), d. h. dokumentieren, welche Einheiten aus Initialprojekten inkl. der verwendeten Datenpakete für den Entwurf welcher Einheiten in Nachfolgeprojekten genutzt worden sind (Im Prototyp nicht vorhanden, sondern über separate Excel-Datei realisiert)
- Unterscheidung zwischen Fertigungsgewerken, da jeweils spezifische Attribute für die Beschreibung der Einheiten und für die Auswahl zur Wiederverwendung

notwendig sind sowie spezifische, digitale Werkzeuge/Werkzeugketten genutzt werden (Verlinkung zu unterschiedlichen Werkzeugen)

- Automatisierter Abgleich bei Artefaktänderungen zwischen digitalen Werkzeugen (Expertensystemen) und Beschreibung der Einheiten in der Bibliothek (im Prototyp nicht umgesetzt, sondern manueller Abgleich über zentrale Stelle bzw. benannte Verantwortliche je Einheit)
- Verwaltungsbereich zur Prüfung der letzten Aktualisierung, zum Zuweisen von Berechtigungsrollen und zum Prüfen der Vollständigkeit der Einheiten-Blätter

In der Abbildung 62 wird die Einordnung des Bibliothek-Prototyps in die bestehende Systemlandschaft gezeigt.

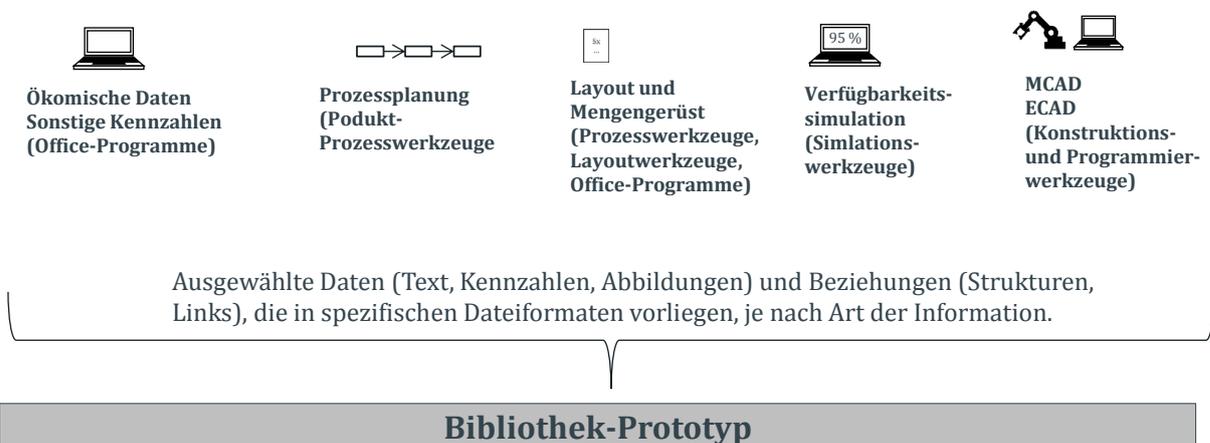


Abbildung 62: Einordnung der Bibliothek in den bestehenden Systemverbund der spezifischen *Digitalen Fabrik* am Beispiel Karosseriebauentwurf

Deutlich wird die Tatsache, dass die Bibliothek als Front-End zu den Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* eingesetzt wird und speziell die projektübergreifende Wiederverwendung von Artefakten unterstützt, indem die Artefakte unterschiedlicher Systeme gekapselt zu Einheiten der Ebenenstruktur dargestellt werden. Die Artefakte entstehen weiterhin in den digitalen Werkzeugen und werden auch dort primär geändert. Die Bibliothek dupliziert ausschließlich organisatorische und ökonomische Daten, die für die Auswahl der Einheiten zur Wiederverwendung in der frühen Entwurfsphase von Bedeutung sind. Alle anderen Artefakte sind in den jeweiligen Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* vorhanden und werden nicht erneut in der Bibliothek abgebildet. Ein zukünftiges System könnte mithilfe von *Semantik Web Technologien* realisiert werden, um das Auffinden der Informationen

zu vereinfachen, die Zugänglichkeit dazu für die Nutzer zu erleichtern sowie die Verknüpfung der Informationen in den jeweiligen Quellwerkzeugen besser herzustellen (Ansatz siehe [Sabou, Marta, Ekaputra, Fajar J. und Biffel 2017]). Dies wird durch die folgende Abbildung 63 deutlich, in der die duplizierten Artefakte kenntlich gemacht sind mit dem Ergebnis, dass die Mehrzahl der Artefakte sichtbar nur in den spezifischen digitalen Werkzeugen vorliegt.

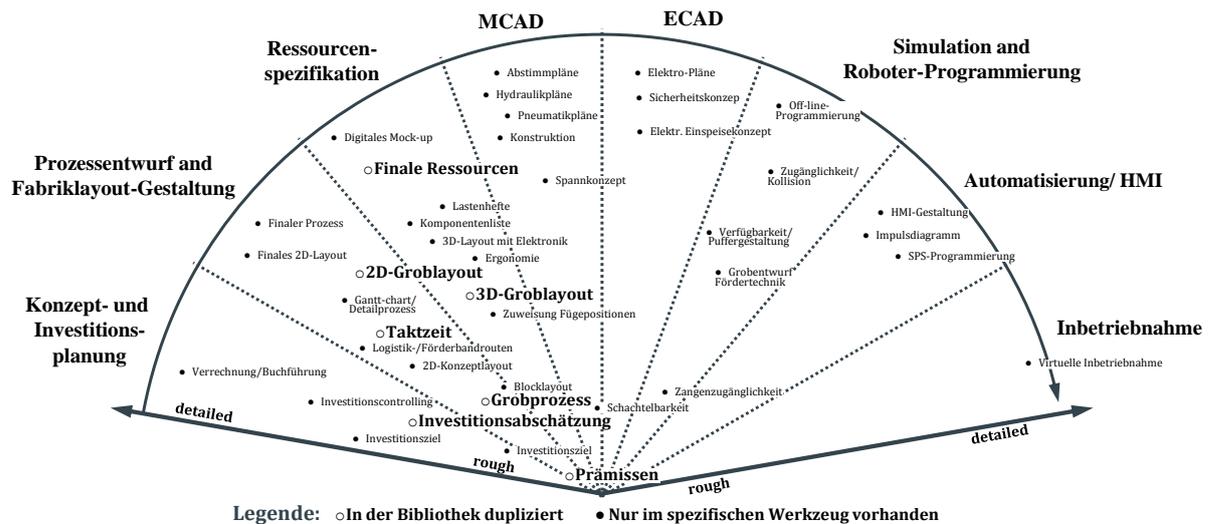


Abbildung 63: Dupliziert, zusammengeführte Artefakte zur Unterstützung der projektübergreifenden Wiederverwendung, basierend auf [Lüder et al. 2017a]

Den Schwerpunkt des Bibliothekseinsatzes bildet die Phase vor dem Initialprojekt, in der Vorüberlegungen zur projektübergreifenden Wiederverwendung angestellt werden (Bildung eines Wiederverwendungsclusters aus Initialprojekt und Nachfolgeprojekten, Suche nach vorhandenen Initialprojekten, die genutzt werden können) und die frühe Entwurfsphase in Nachfolgeprojekten, bei der die vorhandenen Einheiten und die dazugehörigen Datenpakete zur Wiederverwendung initial ausgewählt werden. Die eigentliche Wiederverwendung und Datenübertragung erfolgt dann in den Werkzeugen der *Digitalen Fabrik*, u. a. aufgrund von spezifischen Datenformaten und der damit verbundenen notwendigen Datenverarbeitung und -anpassung in aktivitätsspezifischen Werkzeugen.

Nach dieser Ableitung von Anforderungen an eine, die projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfsartefakten unterstützende Bibliothek, werden nun im Kapitel 7 die

Forschungsfragen zusammenfassend beantwortet, die Ergebnisse eingeordnet und ein Ausblick gegeben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen

In dieser Arbeit wurde der Ansatz der *VDI-Richtlinie 3695* aufgegriffen, an die Anforderungen des Entwurfes von Produktionssystemen für den Automobilbau, speziell an den Karosseriebauentwurf, angepasst, für diesen Anwendungszusammenhang ausdetailliert und mit unterstützenden Methoden erweitert. Ziel dabei war die Konzeptionierung und Realisierung eines Vorgehens zur projektübergreifenden Wiederverwendung von Artefakten im Anlagenentwurf, das heißt die Übertragung von Artefakten zwischen zeitlich gestaffelten Projekten. Grundlage des Lösungskonzeptes dieser Arbeit bildet das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente*, der Definition einer mechatronischen Einheit mit allen relevanten Artefakten, die auch für die projektübergreifende Wiederverwendung verfügbar ist.

Im ersten Teil der Arbeit wurden Grundlagen des Anlagenentwurfes bei Automobil-OEMs inkl. der digitalen Werkzeugketten beschrieben. Ebenso wurden Ansätze und Modelle der Wiederverwendung in Entwurfsprozessen und das Konzept der *Industrie-4.0-Komponente* wiedergegeben. Der Teil schloss ab mit der Identifizierung von offenen Forschungsfragen vor dem Hintergrund eines Implementierungskonzeptes für die projektübergreifende Wiederverwendung im Karosseriebauentwurf.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein Lösungskonzept präsentiert, das wiederverwendbare Einheiten in Bezug auf das Fertigungsgewerk, die Hierarchieebenen der Einheiten im Produktionssystem und die Entwurfsphasen, in denen die Wiederverwendung stattfinden soll, klassifiziert. Darauf aufbauend wurde das Konzept durch die Analyse des Entwurfsprozesses eines einzelnen Projektes und in einem zweiten Schritt die projektübergreifende Wiederverwendung zwischen Projekten inhaltlich ausdetailliert. Die Anwendbarkeit und die positiven Effekte der Konzeptrealisierung wurden mithilfe von repräsentativen Fallstudien gezeigt, in denen in der Praxis häufig auftretende Projektprämissen angenommen worden sind.

Auf der Grundlage des in dieser Arbeit präsentierten Lösungskonzeptes, den durchgeführten Analysen und der Anwendung in der Praxis werden die in Unterkapitel 3.1 aufgestellten Forschungsfragen im Folgenden zusammenfassend beantwortet.

Forschungsfrage 1:

Wie muss eine Bibliothek für wiederverwendbare Einheiten zur Unterstützung des Anlagenentwurfsprozesses eines Karosseriebaus strukturiert sein?

Das Lösungskonzept zur Wiederverwendung mit den drei Gliederungsbereichen Hierarchien eines Produktionssystems, Entwurfsphasen und den Gewerken der Automobilfertigung hat sich als sinnvoll zur guten Strukturierung von wiederverwendbaren Einheiten erwiesen. Die relevanten neun Hierarchieebenen von Fertigungsnetzwerk bis Konstruktionselement sowie die Entwurfsphasen wurden u.a. durch die Prozessanalyse und Zuordnung der gefundenen Artefakte im Untersuchungsrahmen identifiziert und die Anwendbarkeit im Rahmen der Fallstudien validiert. Die identifizierten Einheiten des automobilen Produktionssystems ließen sich eindeutig zuordnen. Durch die Analyse des Zusammenhanges zwischen der Entwurfsphase und der zu entwerfenden Einheitenebene können die Einheiten zielgerichtet für die Entwurfsphasen mit den entsprechenden Aktivitäten zur Verfügung gestellt werden. Dabei wurden die Anforderungen 2, 4, 5 und 6 adressiert (siehe Unterkapitel 3.1) in Bezug auf ein hierarchisch geschachteltes Modell, das Bereitstellen von Suchkriterien nach wiederverwendbaren Einheiten (über die dreidimensionale Gliederung) und die Berücksichtigung der besonderen Anforderungen des Entwurfes eines automobilen Produktionssystems. Ein zentraler Bestandteil ist das gewerkeübergreifende Hierarchiemodell für die mechatronischen Einheiten des automobilen Produktionssystems, das eine Verbindung zwischen gleichen Granularitätsebenen der unterschiedlichen Fertigungsgewerke herstellt. Gleiche, wiederverwendbare Objekte, die in unterschiedlichen Gewerken eingesetzt werden, werden auf diese Weise der gleichen Ebene zugeordnet. Diese eindeutige Zuordnung ist eine Grundvoraussetzung für die systematische Strukturierung von Einheiten.

Forschungsfrage 2:

Auf welcher Hierarchiestufe eines Produktionssystems befinden sich gut wiederverwendbare Einheiten für den Karosseriebauentwurf in Abhängigkeit der Entwurfsphase?

Durch die Analyse des Entwurfsprozesses und der Zuordnung der Artefakte zu den Hierarchieebenen des Produktionssystems hat sich gezeigt, dass sich die Artefakte nicht eindeutig einer einzelnen Ebene zuordnen lassen. Die Artefakte, die häufig mit den Werkzeugen der *Digitalen Fabrik* erzeugt werden, enthalten beschreibende Informationen mehrerer Ebenen. Eine Wiederverwendung der Artefakte einer mechatronischen Einheit einer einzelnen Ebene ist ohne Berücksichtigung der Beziehungen dieser Artefakte auf Einheiten bzw. Artefakte anderer Ebenen nicht möglich. Da die Artefakte in der *Digitalen Fabrik* im Untersuchungsrahmen nicht ebenenbezogen vorgelegt haben, die Beziehungen nicht vollständig modelliert waren und kein durchgängiges Datenaustauschformat implementiert war, ist die Fokussierung auf Einheiten einer einzelnen Hierarchiestufe bei der projektübergreifenden Wiederverwendung nicht zielführend.

Vielmehr konnten Datenpakete (Einheiten) identifiziert werden, die sich in Abhängigkeit der Entwurfsphasen abgrenzbaren, definierbaren Hierarchieebenen zuordnen ließen. Damit kann die Forschungsfrage beantwortet werden. Der Entstehungs- sowie der Wiederverwendungszeitpunkt der Artefakte entscheiden über die Zuordnung der Artefakte zu charakteristischen Hierarchieebenen. Je nach Entwurfszeitpunkt, zu dem Artefakte wiederverwendet werden sollen, wurden folglich ebenenübergreifende Einheiten bzw. Datenpakete gebildet. Je nach den Projektprämissen, unter denen die projektübergreifende Wiederverwendung im Einzelfall stattfindet, können in Abhängigkeit der Granularität der zu entwerfenden Einheiten und des Entwurfsfortschrittes gezielt vorhandene Einheiten mit den zugehörigen Entwurfsartefakten wiederverwendet werden. Mit der Beantwortung der Forschungsfrage wurden die Anforderungen 2, 3, 4 und 6 adressiert (siehe Unterkapitel 3.1).

Forschungsfrage 3:

Welche Informationen sind für die Verwaltungsschale von *Industrie-4.0-Komponenten* relevant für die Wiederverwendung im Karosseriebauentwurf?

Durch die Zuordnung von den als relevant identifizierten Entwurfsartefakten zu den Hierarchieebenen konnten die notwendigen Artefakte für die *Verwaltungsschale* von *Industrie-4.0-Komponenten* der unterschiedlichen Ebenen (vgl. Abbildung 44, Abschnitt 5.1.6) ermittelt werden und die Frage damit beantwortet werden. Es hat sich gezeigt, dass die Informationen von spezifischen Werkzeugen erzeugt werden und entsprechend des Inhalts in einem geeigneten, spezifischen Datenformat vorliegen. Für die *Industrie-4.0-Komponenten* ergibt sich damit die Anforderung, die erzeugten Informationen aus unterschiedlichen Werkzeugen, zu unterschiedlichen Entstehungszeitpunkten und in spezifischen Datenformaten verarbeiten zu können. Möglich wäre auch die Nutzung eines definierten Datenaustauschformates wie *AutomationML*, was die Anforderungen in diesem Aspekt reduzieren würde. In Abhängigkeit des Wiederverwendungszeitpunktes im Nachfolgeprojekt müssen jeweils die als relevant identifizierten Informationen zur Verfügung stehen. Mit der Beantwortung der Forschungsfrage wurden die Anforderungen 5 und 6 adressiert (siehe Unterkapitel 3.1).

Forschungsfrage 4:

Inwieweit muss das Modell des *Domain-Engineerings* durch die besonderen Anforderungen des Karosseriebauentwurfes angepasst werden und welche Methoden unterstützen die Durchführung?

Die Frage kann beantwortet werden auf Basis der durchgeführten Prozessanalyse, der Analyse der Anforderungen im Karosseriebauentwurf und der weiteren Ausdetaillierung des Lösungskonzeptes in Kapitel 5. Es wurde gezeigt, dass sich die Anpassung des *Domain-Engineering-Modells* in der Praxis gut implementieren ließ mit der Unterscheidung

in Initial- und Nachfolgeprojekte und mit der weiteren Ausgestaltung der Wiederverwendungsbibliothek (oft verwendeter Begriff: Repository). Das abgeänderte Modell wurde den in der Praxis auftretenden Anforderungen gerecht. Mithilfe der Fallstudien konnten außerdem die in dieser Arbeit zusammengestellten, unterstützenden Methoden für die Artefaktwiederverwendung im Entwurfsprozess getestet werden, insbesondere die Gütekriterien für Einheiten sowie die projektübergreifende Dokumentation der Wiederverwendung. Mit der Beantwortung der Forschungsfrage wurden die Anforderungen 1, 5 und 6 adressiert (siehe Unterkapitel 3.1).

7.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurden ein Konzept für die praktische Durchführung der projektübergreifenden Wiederverwendung von Entwurfsartefakten im Karosseriebauentwurf entwickelt, weitere Methoden zur Unterstützung der Durchführung an die besonderen Anforderungen adaptiert und dessen Implementierung erfolgreich umgesetzt. Das Lösungskonzept ist grundsätzlich zur Etablierung der projektübergreifenden Wiederverwendung in den Entwurfsprozessen anderer Fertigungsgewerke eines Automobilherstellers nutzbar und auf diese übertragbar. Eine Übertragung des Konzeptes und die Identifizierung der wiederverwendbaren Einheiten entsprechend des in dieser Arbeit präsentierten Vorgehens stehen noch aus. In Abgrenzung zu der inhaltlichen Zielsetzung dieser Arbeit, gibt es verwandte organisatorische und technische Aspekte, die für die Methode Wiederverwendung von großer Bedeutung sind, hier aber nicht behandelt wurden und im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Das Konzept wurde unter Beibehaltung der Werkzeuge und Werkzeugketten der *Digitalen Fabrik* des Untersuchungsrahmens entwickelt. Die Datenweitergabe und die Dokumentation erfolgten auf Basis manuell ausgeführter Tätigkeiten. Durch die Nutzung eines durchgängigen Datenaustauschformates, wie *AutomationML*, und die Schaffung einer interoperationalen Werkzeugkette ließen sich die projektübergreifende Wiederverwendung und insbesondere das Änderungsmanagement der Artefakte stark vereinfachen (vertieft in [Lüder, Schmidt und Drath 2017], [Lüder und Schmidt 2017] und [Drath, Fay und Barth 2011]). Denkbar wäre die automatisierte Benachrichtigung bei Änderungen

zwischen allen in Beziehung stehenden Artefakten inkl. der Auswirkung bzw. auch die automatisierte, selbstständige Anpassung der Artefakte, was mit der vollständigen Umsetzung des Konzeptes der *Industrie-4.0-Komponenten* möglich wäre. Damit ließe sich auch das Zusammenspiel zwischen Produktentwicklung (Fahrzeug) und Anlagenentwurf verbessern in Bezug auf die Wiederverwendung von Artefakten (siehe Abschnitt 5.1.3: orange und grün eingefärbte Komponenten). Voraussetzung dafür wäre ein stark weiterentwickeltes Datenmanagement über den Entwurfsprozess eines Objektes hinaus, das den gesamten Lebenszyklus umfasst und in dem die Daten jederzeit aktuell, verfügbar und anpassbar sind, (*Product Lifecycle Management (PLM)* vertieft in [Gerhard 2017] und [Biffl et al. 2017]). Das Konzept des erweiterten Datenmanagements wurde in dieser Arbeit durch die prototypische Umsetzung einer Bibliothek nur angerissen. Weiterhin kann der Aspekt der Datenvollständigkeit und -gültigkeit zur virtuellen Repräsentation einer funktionsfähigen Anlage zukünftig detailliert untersucht werden. Im Abschnitt 5.2.3 wurde davon ausgegangen, dass die Daten am Ende des Entwurfsprozesses eine vollständig funktionsfähige Anlage repräsentieren. In der Praxis treten laufend Artefaktänderungen auf, zum einen aufgrund von Leistungsverbesserungen der Anlage und von veränderten, funktionalen Anforderungen, zum anderen aufgrund von sich ändernden, rechtlichen Aspekten, wie Gesetze oder Richtlinien. Die virtuelle Repräsentation muss daher laufend aktualisiert werden, um eine funktionsfähige und rechtlich konsistente Anlage abzubilden. Der notwendige Änderungsprozess kann von organisatorisch-technischer Seite sowie von der Seite der Unterstützung durch digitale Werkzeuge untersucht werden. Zusätzlich könnte die Datengültigkeit, also die ggf. begrenzte Wiederverwendbarkeit jeder einzelnen Information näher analysiert werden, um eine verlässliche Aussage über den Aufwand sowie die praktische Realisierbarkeit des Änderungsmanagements treffen zu können. Deutlich geworden ist, dass die projektübergreifende Wiederverwendung stark von der Verfügbarkeit, Aktualität und Zugänglichkeit der Artefakte abhängt.

Als Erweiterung des Untersuchungsumfanges der Artefaktwiederverwendung in dieser Arbeit ist eine Einbeziehung weiterer Lebensphasen und weiterer Informationsflüsse zwischen diesen Phasen möglich (vertieft in [Lüder et al. 2017c]). So könnte unter anderem geprüft werden, wie sich Erfahrungen aus dem Betrieb des Produktionssystems (Lessons Learned) im Entwurfsprozess von Nachfolgeprojekten verwenden ließen. In [Buchta

2015] wurde dazu in einem ersten Schritt untersucht, inwieweit die Zuordnung der einzelnen Lessons Learned aus der Betriebsphase in das Strukturmodell (Abbildung 45, Abschnitt 5.2.1) dabei helfen könnte, diese immateriellen Artefakte den relevanten Entwurfsphasen, -aktivitäten und Ingenieuren zukommen zu lassen. Diese Thematik kann zukünftig vertiefend untersucht werden. Hierzu muss bewertet werden, welche Auswirkung eine jede Lessons Learned auf Objekte welcher Hierarchiestufe des Produktionssystems hat, anschließend welche Entwurfsartefakte betroffen sind und in einem letzten Schritt, wann die Entstehungszeitpunkte dieser Entwurfsartefakte sind, um die entsprechende Entwurfsaktivität mit dem Erfahrungswissen aus der Betriebsphase zu unterstützen.

Neben der praktischen Durchführung, auf der der Fokus dieser Arbeit lag, sollte sich neben dem technischen Datenmanagement zukünftig stärker mit den organisatorischen sowie eigentums- und steuerrechtlichen Aspekten der Datennutzung auseinandergesetzt werden. Äußerst relevant sind diese Aspekte vor dem Hintergrund der Vision der *14.0* und dem Anspruch, die Lebenszyklusinformationen jedes Objektes verfügbar und verwendbar zu machen (vertieft in [Roßnagel, Jandt und Marschall 2017]).

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen unter Mitwirkung des Autors, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind:

[Hell 2015]

[Hell et al. 2016]

[Schmidt et al. 2016]

[Röpke et al. 2016]

[Hell und Lüder 2016]

[Zawisza et al. 2016]

[Lüder et al. 2017a]

[Lüder et al. 2017b]

[Lüder et al. 2017c]

Betreute Abschlussarbeiten, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind und die vom Autor betreut worden sind:

[Reinhard 2015]

[Buchta 2015]

[Hillmann 2016]

- Abele, E. und Reinhart, G. (2011): Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, München.
- acatech (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Abschlussbericht_Industrie4.0_barrierefrei.pdf, abgerufen am 20.07.2015.
- AFRL (1981a): ICAM Architecture Part II, Volume V - Information Modeling Manual (IDEF1), AFWAL-TR-81-4023, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 45433.
- AFRL (1981b): ICAM Architecture Part II-Volume IV - Function Modeling Manual (IDEF0), AFWAL-TR-81-4023, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio 4543.
- Arlt, E. (1968): Rationalisierung durch Standardisierung, Berlin.
- Balser, M. und Fromm, T. (2016): Die Angst der Autobauer vor dem Google-Ei, <http://www.sueddeutsche.de/auto/selbstfahrende-autos-die-angst-der-autobauer-vor-dem-google-ei-1.2915225>, abgerufen am 10.10.2016.
- Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.) (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden.
- Baums, A. (2016): Industrie 4.0 und digitale Plattformen, <https://mooc.house/courses/industrie40-2016>, abgerufen am 27.06.2017.
- Bernecker, G. (2001): Planung und Bau verfahrenstechnischer Anlagen: Projektmanagement und Fachplanungsfunktionen, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Beste, T. (1957): Rationalisierung durch Vereinheitlichung, In: Die Mehrkosten bei der Herstellung ungängiger Erzeugnisse im Vergleich zur Herstellung vereinheitlichter Erzeugnisse, T. Beste (Hrsg.), Köln und Opladen.
- Biffel, S., Mordinyi, R., Steininger, H. und Winkler, D. (2017): Integrationsplattform für anlagenmodellorientiertes Engineering, In: Handbuch Industrie 4.0 Bd.2, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel (Hrsg.), Heidelberg, Berlin.
- Bindel, T. und Hofmann, D. (2009): Projektierung von Automatisierungsanlagen: Eine effektive und anschauliche Einführung, Wiesbaden.
- Bley, H. und Franke, C. (2001): Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: wt Werkstatttechnik online, Vol. 91, Nr. 4, S. 214–220.
- Borowski, K.-H. (1961): Das Baukastensystem in der Technik, Wissenschaftliche Normung (Band 5), Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- Bracht, U. (2002): Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik, Magdeburg.
- Bracht, U., Geckler, D. und Wenzel, S. (2011): Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele, Berlin.

- Bratzel, S. (2016): Warum Tesla die Autobauer das Fürchten lehrt, <http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-04/automobilindustrie-digitalisierung-elektromobilitaet-autonomes-fahren-tesla-wandel>, abgerufen am 10.10.2016.
- Brockhaus (1993): Brockhaus-Enzyklopädie: Band 21, SR-TEO, 19. Auflage.
- Browning, T. (2001): Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 48, Nr. 3, S. 292–306.
- Buchta, L. (2015): Konzeption eines einheitlichen Lessons Learned zur weiteren Steigerung der Qualität und Effizienz im Anlagenengineering. Bachelorarbeit, Wolfenbüttel.
- Dangelmaier, W. (2001): Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung, Algorithmen und Beispiele, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Die Zeit (2017): Großbritannien will Diesel und Benziner verbieten, <http://www.zeit.de/wirtschaft/unternehmen/2017-07/grossbritannien-verbietet-diesel-und-benziner>, abgerufen am 06.10.2017.
- Dietzsch, A. (2002): Systematische Wiederverwendung in der Software-Entwicklung. Dissertation, Dresden.
- DIN: Fertigungsverfahren, Berlin, DIN 8580:2003-09.
- DIN (2009): Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1: Grundlagen, Berlin, DIN 69901-1:2009-01.
- DIN (2011): Kennzeichnungssystematik für technische Produkte und technische Produktdokumentation - Teil 12: Bauwerke und Technische Gebäudeausrüstung, Berlin, DIN 6779-12:2011-04.
- DIN EN (2010): Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte - Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung - Teil 1: Allgemeine Regeln, Berlin, DIN EN 81346-1:2010-05.
- DIN EN ISO (2015): Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, Berlin, DIN EN ISO 9000:2015-11.
- Döbele, M. (Hrsg.) (2009): Methode zur Wiederverwendung von Planungskomponenten für die Planung automatisierter Fertigungsanlagen, Baden-Baden.
- Döbele, M. (2010): Informationsmodell für die Planung und die Ausschreibung der Automatisierungstechnik in Fertigungsanlagen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010, 1. Auflage, Göttingen.
- Dombrowski, U. und Tiedemann, H. (2005): Die richtigen Fabrikplanungswerkzeuge auswählen - Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung. In: Zeitschrift für wirtsch. Fabrikbetrieb (ZWF), Vol. 100, Nr. 3, S. 136–140.
- Dombrowski, U., Tiedemann, H. und Bothe, T. (2001): Visionen für die Digitale Fabrik. In: Zeitschrift für wirtsch. Fabrikbetrieb (ZWF), Vol. 96, Nr. 3, S. 96–100.

- Drath, R., Fay, A. und Barth, M. (2011): Interoperabilität von Engineering-Werkzeugen. In: at - Automatisierungstechnik, Vol. 59, Nr. 11, S. 598–607.
- Drath, R., Messinger, C., Schröter, B., Li, N. und Gutermuth, G. (2014): Engineering-Effizienz automatisch messen. In: atp edition, Nr. 5, S. 32–41.
- Ebner, R. (2004): Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung. Dissertation, Karlsruhe.
- ECPD (1941): The Engineers' Council For Professional Development. In: Science, Vol. 94, S. 456.
- (EG 2002): Verordnung (EG) NR. 1400/2002 der Kommission über die Anwendung von Artikel 81 Absatz 3 des Vertrags auf Gruppen von vertikalen Vereinbarungen und aufeinander abgestimmten Verhaltensweisen im Kraftfahrzeugsektor.
- Ehrlenspiel, K. (2009): Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit, 4. Auflage, München.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. und Mörtl, M. (2014): Kostengünstig entwickeln und konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Eversheim, W. (1992): Flexible Produktionssysteme, In: Handwörterbuch der Organisation, E. Frese (Hrsg.), Stuttgart.
- Fay, A. (2009): Effizientes Engineering komplexer Automatisierungssysteme, In: Wird der Verkehr automatisch sicherer? 20 Jahre - vom IfRA zum iVA - Jubiläumskolloquium; Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge des integrierten Systementwurfs zur Fahrzeug- und Verkehrsautomatisierung; 04. September 2009, E. Schnieder und T. Ständer (Hrsg.), Braunschweig.
- Feldhusen, J. und Grote, K.-H. (Hrsg.) (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre, 8. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Foehr, M. (2013): Integrated consideration of product quality within factory automation systems, Magdeburg.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T. und Schlund, S. (2013): Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0, Stuttgart.
- Gauche, M., Müller, J. und Rebel, M. (2013): Produktstrukturierung als Erfolgsfaktor. In: Zeitschr. f. wirtsch. Fabrikbetrieb (ZWF), 11/2013, S. 878–881.
- Gepp, M. (2014): Standardisierungsprogramme als Ansatz zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit im industriellen Anlagen-Engineering, Hamburg.
- Gerhard, D. (2017): Product Lifecycle Management Challenges of CPPS, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Göpfert, J. (1998): Modulare Produktentwicklung: zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation, Wiesbaden.
-

- Göpfert, J. und Steinbrecher, M. (2000): Modulare Produktentwicklung leistet mehr. In: Harvard Business manager, Nr. 3, S. 20–30.
- Große, N. und Schorn, W. (2004): Projekte, In: Taschenbuch der Automatisierung, R. Langmann (Hrsg.), München, Wien.
- Grundhoff, S. (2017): IAA 2017: Ohne Elektro geht nichts mehr. In: Automobil Produktion.
- Hab, G. und Wagner, R. (2010): Projektmanagement in der Automobilindustrie: Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungsprozesskette, 3. Auflage, Wiesbaden.
- Hady, Ł. (2013): Entwicklung einer online-basierten Modulbibliothek zur Steigerung der Planungsqualität, Know-how-Sicherung und Wiederverwendung des Engineering bei der modularen Anlagenplanung, Berlin.
- Handelsblatt (2017): Umweltministerium erwartet EU-Quote, <http://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/elektroautos-umweltministerium-erwartet-eu-quote/20195830.html>, abgerufen am 06.10.2017.
- Hell, K. (2015): Durchgängigkeit wiederverwendbarer Bibliothekselemente im industriellen Lösungsgeschäft, In: Tagungsband der 12. Magdeburger Maschinenbautage, R. Kasper (Hrsg.), Magdeburg.
- Hell, K., Hillmann, R., Lüder, A., Röpke, H., Zawisza, J., Schmidt, N. und Calà, A. (2016): Demands on Virtual Representation of Physical Industrie 4.0 Components, In: Proceedings of the INCOSE Italia Conference on Systems Engineering (CIISE 2016), V. Arrichello, A. D'Ambrigo, A. Garro und C. Leardi (Hrsg.), Aachen.
- Hell, K. und Lüder, A. (2016): Wiederverwendung im Engineering. In: Zeitschrift für wirtsch. Fabrikbetrieb (ZWF), Vol. 2016, Nr. 6, S. 337–341.
- Hillmann, R. (2016): Entwicklung einer Dokumentationsmethode zur Sicherstellung der Wiederverwendung von Entwurfsergebnissen im Anlagenengineering. Masterarbeit, Magdeburg.
- Himmler, F. (2015): Function Based Engineering with AutomationML – Towards better standardization and seamless process integration in plant engineering, In: WI 2015 Proceedings, O. Thomas und f. Teuteberg (Hrsg.).
- Hirzle, A. (2012): AutomationML - ein Überblick: Ein Standard für die Verbesserung des Datenaustauschs von Engineeringwerkzeugen. In: SPS Magazin, Nr. 12, S. 65–66.
- Höffken, E. und Schweitzer, M. (Hrsg.) (1991): Beiträge zur Betriebswirtschaft des Anlagenbaus, Düsseldorf.
- Hölttä-Otto, K.: Modular Product Platform Design. Dissertation, Espoo.
- Horvath, P. und Kaufmann, L. (1998): Balanced Scorecard - ein Werkzeug zur Umsetzung von Strategien. In: Harvard Business manager, Nr. 5, S. 39–48.
- Hundt, L. und Lüder, A. (2012): Development of a method for the implementation of interoperable tool chains applying mechatronical thinking – Use case engineering of
-

- logic control, In: Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), IEEE (Hrsg.).
- Hüttenrauch, M. und Baum, M. (2008): Effiziente Vielfalt: Die dritte Revolution in der Automobilindustrie, Berlin, Heidelberg.
- IEC (1997): Batch control - Part 1: Models and terminology, 25.040.40; 01.040.25, IEC 61512-1:1997.
- IEC (2013): Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology, 01.040.25; 25.040.40, IEC 62264-1:2013.
- ISA (2000): Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology, ISA-95.00.01-2000.
- ISA (2013): Procedural Automation for Continuous Process Operations - Models and Terminology, ISA-TR106.00.01-2013.
- ISO/IEC (2011): System and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models, Genf, Vol. 24140, ISO/IEC 25010:2011.
- Jazdi, N., Maga, C., Göhner, P., Ehben, T., Tetzner, T. und Löwen, U. (2010): Mehr Systematik für den Anlagenbau - Gesteigerte Effizienz durch Domain Engineering. In: at - Automatisierungstechnik, Vol. 58, Nr. 9, S. 524–532.
- Kaplan, R. und Norton, D. (1992): The Balanced Scorecard: Measures that Drive Performance. In: Harvard Business Review, Vol. 70, Nr. 1, S. 71–79.
- Kaplan, R. und Norton, D. (1996): The balanced scorecard: Translating strategy into action, 1. Auflage, Boston, Mass.
- Kerber, S. (2016): Prozessgestaltung zum Einsatz digitaler Fabrikgesamtmolelle: Anwendung in der Produktionsplanung eines Automobilherstellers, Wiesbaden.
- Kiefer, J. (2007): Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau, Saarbrücken.
- Klein, P. (2014): Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen. Dissertation, Siegen.
- Klug, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Heidelberg, Dordrecht, London, New York.
- Knabe, S. (2015): Bewertung der Verwendbarkeit von Komponenten im Produktionssystem am Beispiel Karosseriebau. Masterarbeit, Magdeburg.
- Köhlein, A., Bohm, B., Elger, J., Gewalt, N., Stallinger, F., Neumann, R., Plösch, R. und Hehenberger, P. (2012): Potentials of mechatronic objects for improving mechatronic engineering: Results and insights from an online survey, In: Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), IEEE (Hrsg.).
- Lindemann, U. (Hrsg.) (2016): Handbuch Produktentwicklung, München.

- Lüder, A., Foehr, L., Wagner, T., Zaddach, J.-J. und Holm, T. (2010): Manufacturing system engineering with mechatronical units, In: 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs 2010), IEEE (Hrsg.).
- Lüder, A., Foehr, M., Hoffmann, M., Langer, Y. und Frank, S. (2011): Aggregation of engineering processes regarding the mechatronic approach, In: 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs 2011), IEEE (Hrsg.).
- Lüder, A., Foehr, M., Schmidt, N., Schäffler, T. und Elger, J. (Hrsg.) (2013): Roadmap zur Integration mechatronischer Konzepte in Werkzeugketten, Baden-Baden.
- Lüder, A. und Hundt, L. (2008): Neues Datenaustauschformat deckt alle Phasen des Engineering-Prozesses ab. In: etz, 5/2008, S. 38–41.
- Lüder, A. und Schmidt, N. (2017): AutomationML in a Nutshell, In: Handbuch Industrie 4.0 Bd.2, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel (Hrsg.), Heidelberg, Berlin.
- Lüder, A., Schmidt, N. und Drath, R. (2017): Standardized Information Exchange Within Production System Engineering, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Lüder, A., Schmidt, N., Hell, K., Röpke, H. und Zawisza, J. (2017a): Description Means for Information Artifacts Throughout the Life Cycle of CPPS, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Lüder, A., Schmidt, N., Hell, K., Röpke, H. und Zawisza, J. (2017b): Fundamentals of Artifact Reuse in CPPS, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Lüder, A., Schmidt, N., Hell, K., Röpke, H. und Zawisza, J. (2017c): Identification of Artifacts in Life Cycle Phases of CPPS, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Maga, C., Jazdi, N. und Göhner, P. (2011): Reusable Models in Industrial Automation: Experiences in Defining Appropriate Levels of Granularity, In: Proceedings of the 18th IFAC World Congress Milano(Italy) August 28 - September 2, 2011, S. Bittanti, A. Cenedese und S. Zampieri (Hrsg.).
- Manzei, C., Schleupner, L. und Heinze, R. (Hrsg.) (2016): Industrie 4.0 im internationalen Kontext.
- Marczinski, G. (2006): Zur Bedeutung der Digitalen Fabrik. In: Zeitschrift für wirtsch. Fabrikbetrieb (ZWF), Vol. 101, Nr. 4, S. 218–221.

- Miller, T. und Elgard, P. (1998): Defining Modules, Modularity and Modularization: Evolution of the Concept in a Historical Perspective, In: Proceedings of the 13th IPS research seminar, J.O. Riis (Hrsg.).
- Naisbitt, J. (1982): Megatrends: Ten New Directions Transforming Our Lives, 6. Auflage.
- NAMUR (2003): Abwicklung von PLT-Projekten, NA 35, Namur-Arbeitsblatt, 24.03.2003.
- Nyhuis, P., Kolakowski, M. und Heger, C. (2005): Evaluation of Factory Transformability, In: Proceedings of 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing.
- Obst, M. und Urbas, L. (2012): Wissensbasierte Assistenzsysteme für modulares Engineering, In: Tagungsband der 12. Fachtagung EKA 2012, U. Jumar, E. Schnieder und C. Diedrich (Hrsg.).
- Paetzold, K. (2017): Product and Systems Engineering/CA* Tool Chains, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- PAS (2006): Planung einer verfahrenstechnischen Anlage - Vorgehensmodell und Terminologie, PAS 1059.
- Plattform Industrie 4.0 (2015): Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/I/industrie-40-verbaendeplattform-bericht,property=pdf,bereich=bmwi2012>, abgerufen am 06.10.2016.
- Plattform Industrie 4.0 (2016): Weiterentwicklung des Interaktionsmodells für Industrie 4.0-Komponenten, https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/interaktionsmodell-i40-komponenten-it-gipfel.pdf?__blob=publicationFile&v=12, abgerufen am 12.10.2017.
- Plattform Industrie 4.0 (2017): Beziehungen zwischen I4.0-Komponenten – Verbundkomponenten und intelligente Produktion: Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente SG Modelle und Standards. Ergebnispapier, <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/beziehungen-zwischen-i40-komponenten-verbundkomponenten-und-intelligente-produktion/>, abgerufen am 06.11.2017.
- Pohl, K., Böckle, G. und van der Linden, F. (2005): Software Product Line Engineering: Foundations, Principles, and Techniques, Berlin, Heidelberg.
- Ponn, J. und Lindemann, U. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Reinhard, D. (2015): Entwicklung und Anwendung einer Methode zur ganzheitlichen Bewertung von Anlagenkonzepten am Beispiel der Karosseriebauplanung. Masterarbeit, Bingen am Rhein.
- Renner, I. (2007): Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil, München.

- Reschke, H. und Svoboda, M. (1984): Projektmanagement: Konzeptionelle Grundlagen, 2. Auflage, München.
- Rodenacker, W. (1991): Methodisches Konstruieren, 4. Auflage, Berlin.
- ROI Management Consulting AG (2016): Logistik-Lexikon, Stichwort: Variantenmanagement, <http://www.logistiklexikon.de/lexikon/liste/V/>, abgerufen am 30.08.2016.
- Röpke, H., Hell, K., Zawisza, J., Lüder, A. und Schmidt, N. (2016): Identification of "Industrie 4.0" component hierarchy layers, In: Proceedings of the 21th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE (Hrsg.), Piscataway, NY.
- Ross, D. (1977): Structured Analysis (SA): A Language for Communication Ideas. In: IEEE Transactions on Software Engineering, SE-3, Nr. 1, S. 16–34.
- Roßnagel, A., Jandt, S. und Marschall, K. (2017): Juristische Aspekte bei der Datenanalyse für Industrie 4.0, In: Handbuch Industrie 4.0 Bd.2, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel (Hrsg.), Heidelberg, Berlin.
- Rude, S. (1998): Wissensbasiertes Konstruieren: Habilitationsschrift.
- Sabou, Marta, Ekaputra, Fajar J. und Biffel, S. (2017): Semantic Web Technologies for Data Integration in Multi-Disciplinary Engineering, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.
- Sametinger, J. (1997): Software engineering with reusable components, Berlin.
- Sauer, O. und Ebel, M. (2007): Plug-and-work von Produktionsanlagen und übergeordneter Software, In: GI Proceedings 110: INFORMATIK 2007: Informatik trifft Logistik. Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), R. Koschke, H. Otthein, K.-H. Rödiger und M. Ronthaler (Hrsg.), Bonn.
- Schäffler, T., Foehr, M., Kodes, R. und Lüder, A. (2014): Regionalization of engineering, In: 2014 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE), IEEE (Hrsg.).
- Schäffler, T., Foehr, M., Lüder, A. und Supke, K. (2013): Engineering process evaluation: Evaluation of the impact of internationalisation decisions on the efficiency and quality of engineering processes, In: Proceedings of the 22nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), IEEE (Hrsg.).
- Schenk, M., Wirth, S. und Müller, E. (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg.
- Schertl, A., Löwen, U., Fay, A. und Schleipen, M. (2008): Systematische Beurteilung und Verbesserung des Engineerings von automatisierten Anlagen, In: Automation 2008, VDI/VDE-Gesellschaft (Hrsg.), Düsseldorf.
- Schmidt, N., Lüder, A., Hell, K., Röpke, H. und Zawisza, J. (2016): A generic model for the end-of-life phase of production systems, In: Proceedings of the 42nd Annual Confer-

- ence focussing on industrial and manufacturing theory and applications of electronics, controls, communications, instrumentation and computational intelligence (IECON 2016), IEEE (Hrsg.), New York.
- Schröck, S. (2016): Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen: Anforderungen, Konzepte und Umsetzungen für die Prozessindustrie. Dissertation, Hamburg.
- Schuh, G., Lenders, M., Arnoscht, J. und Rudolf, S. (2010): Effizienter innovieren mit Produktbaukästen, Aachen.
- Schuh, G., van Brussel, H., Böer, C., Valckenaers, P., Sacco, M., Bergholz, M. und Harre, J. (2003): A Model-Based Approach to Design Modular Plant Architectures.
- Schulze, O. (2000): Datenmodell für die NC-Programmierung. Dissertation, Aachen.
- Simon, H. (1962): The architecture of complexity. In: PROCEEDINGS OF THE AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY, Vol. 106, Nr. 6, S. 467–482.
- Smith, J. und Duffy, A. (2001): Re-using knowledge - why, what and where, In: Proceedings of ICED 01, S. Culley, A. Duffy, McMahon, C. A. und K.W. Wallace (Hrsg.).
- Springer Gabler Verlag (Hrsg.) (o. J.): Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Standardisierung.
- Stallinger, F., Neumann, R., Plösch, R., Hehenberger, B., Böhm, B., Köhnlein, N. und Gewalt, N. (Hrsg.) (2011): Improving Mechatronic Engineering: an Artifact-Assessment-Based Approach.
- Tauchnitz, T. und Maier, U. (2009): Prozessleittechnik (PLS), In: Handbuch der Prozessautomatisierung - Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen, K.F. Früh, U. Maier und D. Schaudel (Hrsg.), 4. Auflage, München.
- Thoben, K.-D. (1990): CAD : Sparen durch Wiederhol-Konstruktionen, Düsseldorf.
- Thramboulidis, K. (2008): Challenges in the development of Mechatronic systems: The Mechatronic Component, In: 2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, IEEE (Hrsg.).
- Tomer, A., Goldin, L., Kuflik, T., Kumchi, E. und Schach S.R. (2004): Evaluating Software Reuse Alternatives: A Model and Its Application on to an Industrial Case Study. In: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 30, Nr. 9, S. 601–612.
- Ulrich, H. (1981): Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft, In: Die Führung des Betriebes, M. Geist und R. Köhler (Hrsg.), Bern, Stuttgart.
- Ulrich, H. (1982): Anwendungsorientierte Wissenschaft. In: Die Unternehmung, Vol. 36, Nr. 1, S. 1–10.
- Ulrich, H. und Probst, G. (1991): Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln - Ein Brevier für Führungskräfte, 3. Auflage, Bern.
- Ulrich, K. (1995): The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy, Vol. 24, S. 419–440.

- Ulrich, K. und Eppinger, S. (2011): Product Design and Development, 5. Auflage.
- Urbas, L. und Krause, A. (2012): Process Control Systems Engineering, München.
- van Beek, Thom J., Erden, M. und Tomiyama, T. (2010): Modular design of mechatronic systems with function modeling. In: Mechatronics, Vol. 20, Nr. 8, S. 850–863.
- VDI (1993): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Berlin, VDI 2221.
- VDI (1994): Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik, Berlin, VDI 2422.
- VDI (2001): Blatt 1: Recycling elektrischer und elektronischer Geräte: Grundlagen und Begriffe, Berlin, 13.030.50; 01.020, VDI 2343.
- VDI (2004): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Berlin, Vol. 03.100.40, VDI 2206.
- VDI (2006a): Blatt 1: Projektingenieur Berufsbild, Berlin, 03.100.30, 03.100.40, VDI 6600.
- VDI (2006b): Blatt 2: Projektingenieur Anforderungsprofil an die Qualifikation, Berlin, 03.100.30, 03.100.40, VDI 6600.
- VDI (2008): Digitale Fabrik, Berlin, 03.100.50, 35.240.50, VDI 4499.
- VDI (2011): Blatt 1: Fabrikplanung - Planungsvorgehen, Berlin, Vol. 03.100.99, VDI 5200.
- VDI und VDE (2005): Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik, Berlin, Vol. 25.040.40, VDI/VDE 3681.
- VDI und VDE (2010a): Blatt 1: Engineering von Anlagen, Evaluieren und Optimieren des Engineerings; Grundlagen und Vorgehensweise, Berlin, Vol. 35.240.50, VDI/VDE 3695.
- VDI und VDE (2010b): Blatt 2: Engineering von Anlagen, Evaluieren und Optimieren des Engineerings; Themenfeld Prozesse, Berlin, Vol. 35.240.50, VDI/VDE 3695.
- VDI und VDE (2010c): Blatt 3: Engineering von Anlagen, Evaluieren und Optimieren des Engineerings; Themenfeld Methoden, Berlin, Vol. 35.240.50, VDI/VDE 3695.
- VDI und VDE (2010d): Blatt 4: Engineering von Anlagen, Evaluieren und Optimieren des Engineerings; Themenfeld Hilfsmittel, Berlin, Vol. 35.240.50, VDI/VDE 3695.
- VDI und VDE (2010e): Blatt 5: Engineering von Anlagen, Evaluieren und Optimieren des Engineerings; Themenfeld Aufbauorganisation, Berlin, Vol. 35.240.50, VDI/VDE 3695.
- VDI/VDE-Gesellschaft (2014): Statusreport Industrie 4.0: Wertschöpfungsketten, Düsseldorf.
- VDI/VDE-Gesellschaft und ZVEI (2015): Statusreport Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0), Düsseldorf.

- Vogel-Heuser, B., Fuchs, J., Feldmann, S. und Legat, C. (2015): Interdisziplinärer Produktlinienansatz zur Steigerung der Wiederverwendung. In: at - Automatisierungstechnik, Vol. 63, Nr. 2, S. 99–110.
- Volkswagen Classic (o. j.): Magazin: Special 05: Der Golf - Modellgeschichte, <https://www.volkswagen-classic.de/en/magazin/special/modellgeschichte/golf1>, abgerufen am 11.10.2016.
- Wagner, T., Hausner, C., Elger, J., Löwen, U. und Lüder, A. (2010): Engineering Processes for Decentralized Factory Automation Systems, In: Factory Automation, J. Silvestre-Blanes (Hrsg.).
- Waltl, H. und Wildemann, H. (2014): Modularisierung der Produktion in der Automobilindustrie, München.
- Weidemann, D. und Drath, R. (2010): Einleitung, In: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML, R. Drath (Hrsg.), Berlin, Heidelberg.
- Wemhörner, N. (2005): Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Dissertation, Aachen.
- Wenzel, S. (2006): Die Digitale Fabrik – Wirtschaftliche Notwendigkeit und wissenschaftliche Faszination, In: Aspekte der Wirtschaftsinformatik. Methoden, Werkzeuge und Anwendungen. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Peter Gmilkowsky, L. Mönch und J. Beyer (Hrsg.), San Diego, Erlangen.
- Wenzel, S., Hellmann, A. und Jessen, U. (2003): e-Services – a Part of the „Digital Factory“, In: Proceedings 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, CIRP (Hrsg.), Saarbrücken.
- Westkämper, E. (2006): Digital Manufacturing in the global Era, In: 3rd CIRP sponsored Conference on Digital Enterprise Technology, P.F. Cunha (Hrsg.), Berlin.
- Westkämper, E., Bierschenk, S. und Kuhlmann, T. (2003): Digitale Fabrik - nur was für die Großen? In: wt Werkstatttechnik online, Vol. 93, 1/2, S. 22–26.
- Weyrich, M. und Klein, P. (2012): Modulbasiertes Engineering von Produktionsanlagen: Wissensbasierte Konzeption mit funktionsorientierter Modularisierung. In: wt Werkstatttechnik online, Vol. 102, Nr. 9, S. 592–597.
- Wiendahl, H.-P. (2002): Auf dem Weg zur "Digitalen Fabrik". In: wt Werkstatttechnik online, Vol. 92, Nr. 4, S. 121.
- Wildemann, H. (2004): Advanced Purchasing: Leitfaden zur Einbindung von Beschaffungsmärkten in den Produktentstehungsprozess, 4. Auflage, München.
- Winkler, D., Wimmer, M., Berardinelli, L. und Biffel, S. (2017): Towards Model Quality Assurance for Multi-Disciplinary Engineering: Needs, Challenges and Solution Concept in an AutomationML Context, In: Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects, S. Biffel, A. Lüder und D. Gerhard (Hrsg.), Cham.

- Wortmann, J. (1983): A classification scheme for master production schedule, In: Efficiency of Manufacturing Systems, B. Wilson, C.C. Berg und D. French (Hrsg.), Boston, MA.
- Zawisza, J., Hell, K., Röpke, H., Lüder, A. und Schmidt, N. (2016): Generische Strukturierung von Produktionssystemen der Fertigungsindustrie, In: Automation 2016. 17. Branchentreffen der Mess- und Automatisierungstechnik, VDI/VDE-Gesellschaft (Hrsg.), Düsseldorf.

Anhang A: 4D-Analyse Konzeptphase

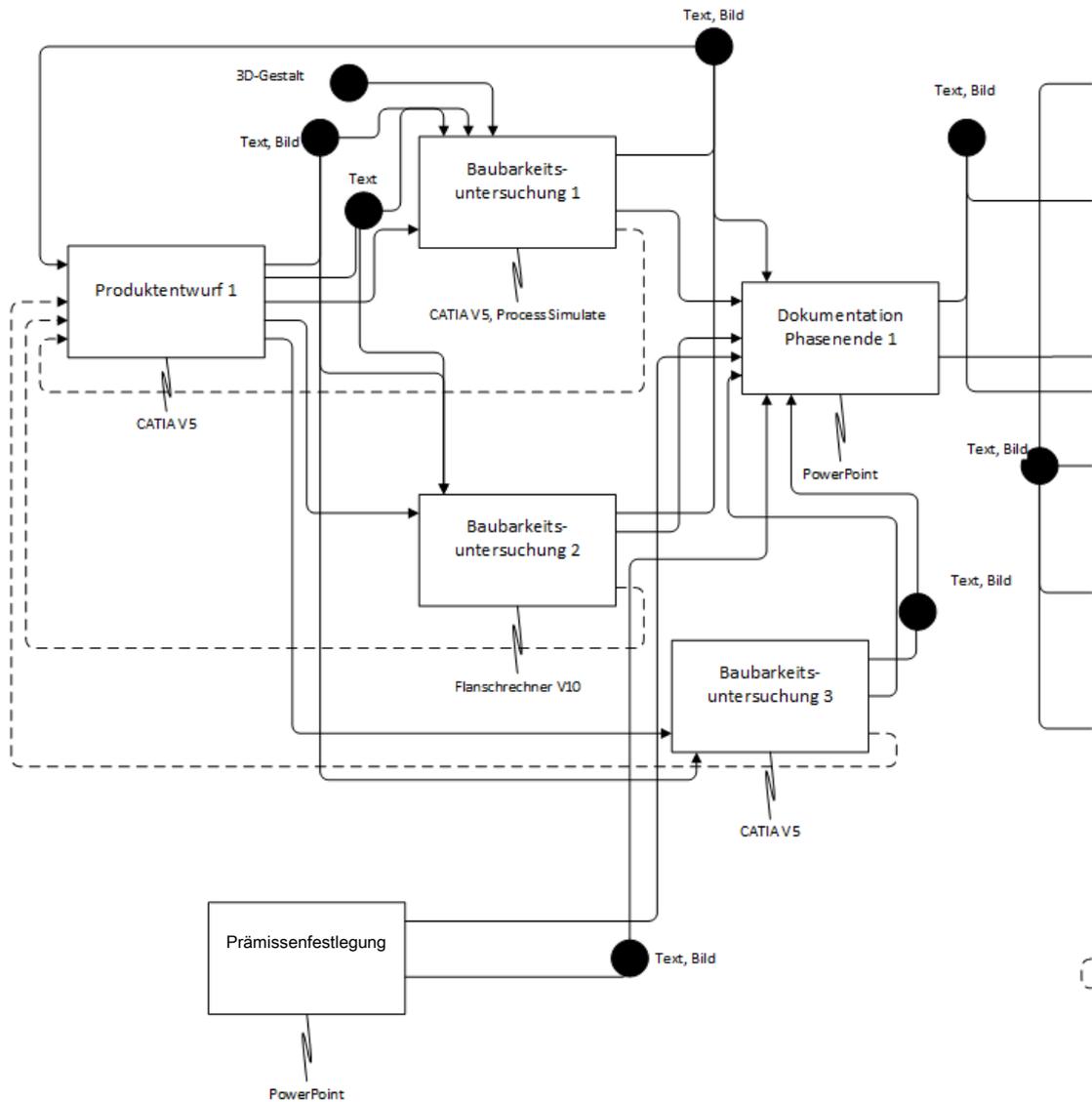


Abbildung basierend auf [Hillmann 2016]

Anhang B: 4D-Analyse Grobplanung

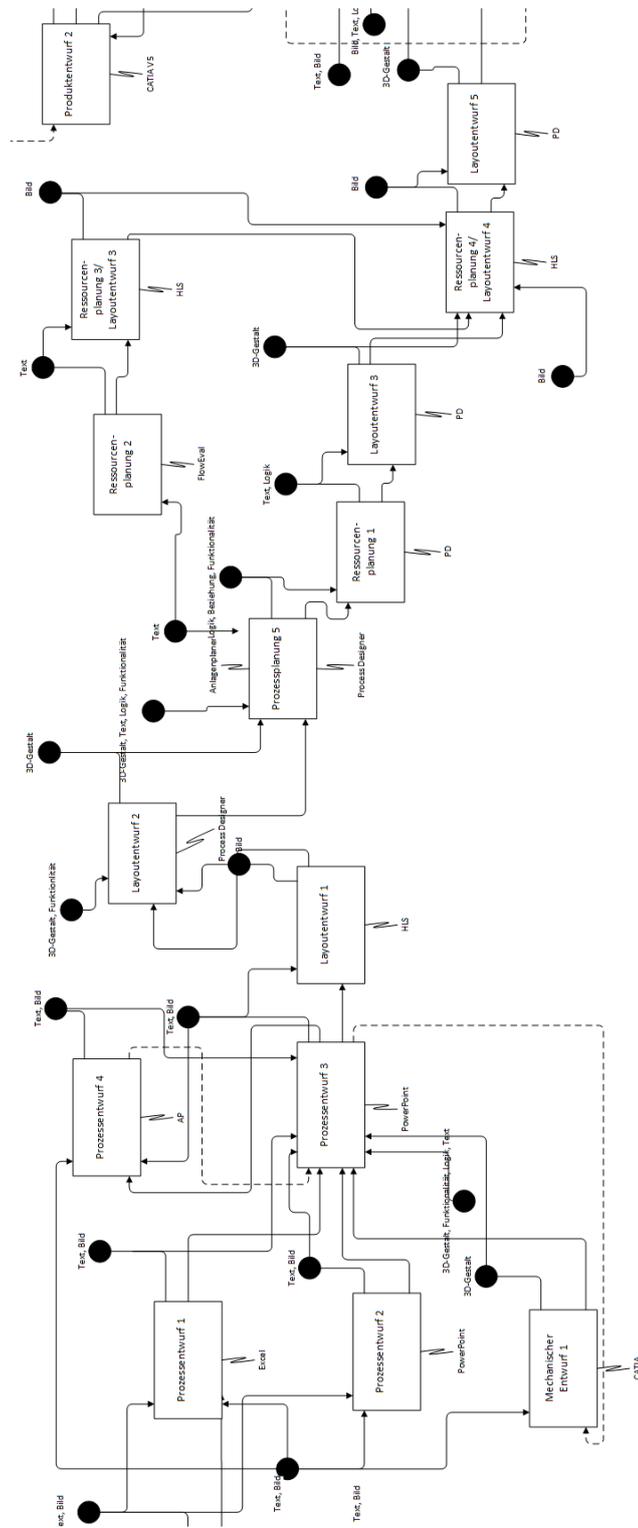


Abbildung basierend auf [Hillmann 2016]

Anhang C: 4D-Analyse Detailplanung

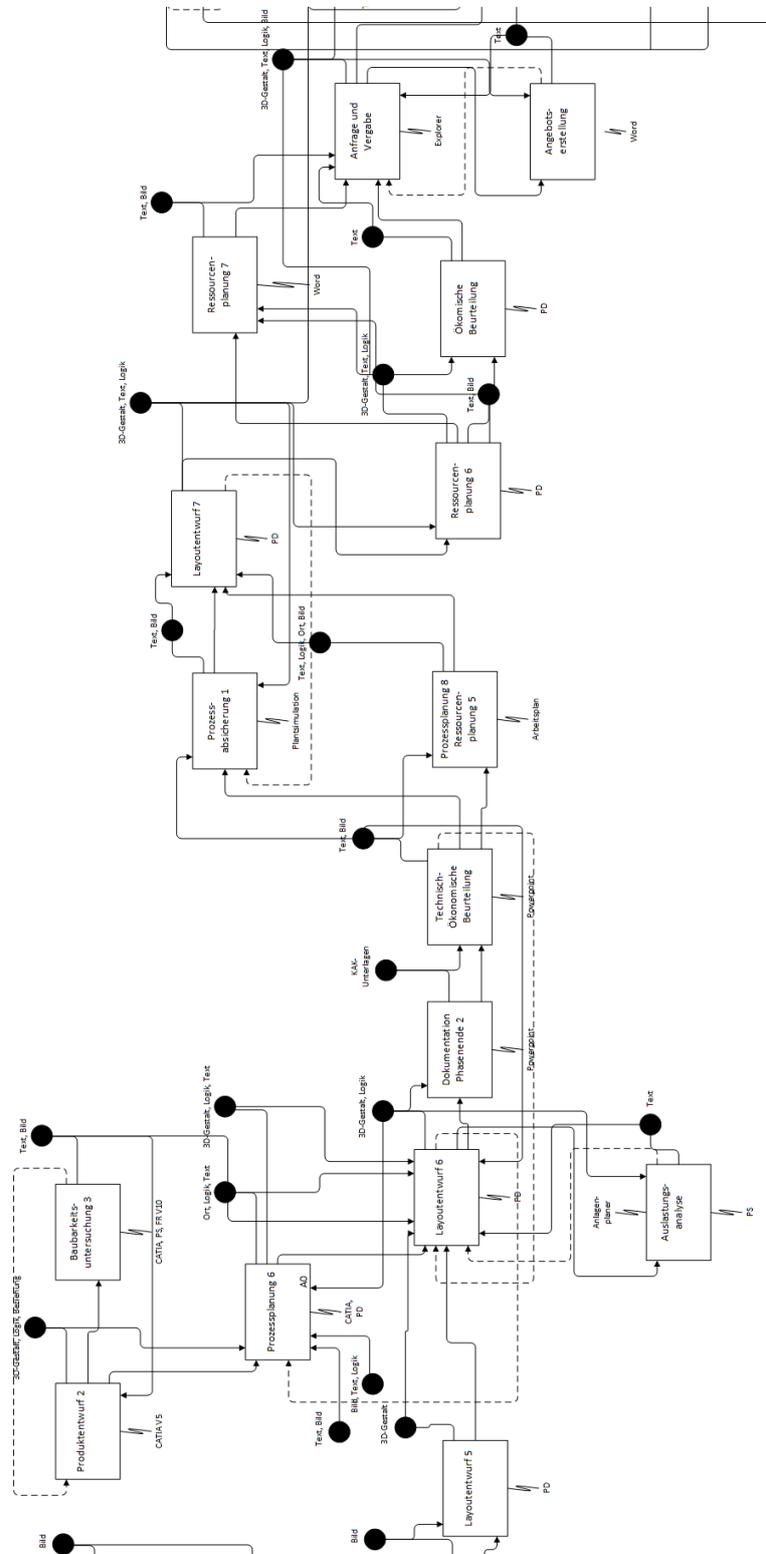


Abbildung basierend auf [Hillmann 2016]

