



OTTO VON GUERICKE  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG



FAKULTÄT FÜR  
INFORMATIK

## **Masterarbeit**

Optimierung des Fertigungsplanungsprozesses im Karosseriebau durch  
die Entwicklung eines Konzepts zur automatisierten Generierung von  
Fertigungsanlagen mithilfe eines wissensbasierten Systems

**Verfasser:**

Sandro Hagemann

**Vorgelegt am:**

25. August 2016

**Prüfer:**

Prof. Dr. rer. pol. habil. Hans-Knud Arndt

**Betreuer:**

Dr.-Ing. Christian Bade



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt, sowie alle Zitate entsprechend kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

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

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Masterarbeit sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Wolfsburg, den 25. August 2016

.....  
Sandro Hagemann



## Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle allen Personen danken, die mich in den letzten Monaten während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und immer wieder motiviert haben.

Zuerst bedanke ich mich bei Herrn Prof. Hans-Knud Arndt und Dr. Christian Bade für die hervorragende Betreuung und anschließende Begutachtung dieser Masterarbeit. Die wertvollen Anregungen, schöpferischen Gespräche und die konstruktive Kritik haben wesentlich zum Ergebnis der Arbeit beigetragen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Jeanine, die mir über den gesamten Zeitraum den benötigten Rückhalt gegeben hat und immer ein offenes Ohr für mich hatte. Danke, dass du diese nicht immer ganz einfache und eingeschränkte Zeit gemeinsam mit mir bewältigt hast.

In besonderem Maße danke ich auch meiner gesamten Familie und insbesondere meinen Eltern Birgit und Mathias, die mich auf meinem kompletten Lebensweg unterstützt haben und immer liebevoll an meiner Seite standen.

Ich danke ebenso allen Kolleginnen und Kollegen der Fertigungsplanung Karosseriebau der Marke Volkswagen PKW, die mir sowohl fachlich als auch außerhalb fachlicher Themen zur Seite standen. Dies gilt insbesondere für die Teilnehmer der Expertenbefragung für diese Masterarbeit.



---

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	X
Tabellenverzeichnis .....	XIV
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
Abstract .....	1
1 Einleitung .....	3
1.1 Motivation .....	3
1.2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen .....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	5
2 Theoretische Grundlagen.....	7
2.1 Fertigungsplanung .....	7
2.2 Digitale Fabrik.....	9
2.3 Prozessmodellierung .....	12
2.3.1 Prozesse.....	12
2.3.2 Grundlagen der Architektur Integrierter Informationssysteme .....	12
2.3.3 Die (erweiterte) Ereignisgesteuerte Prozesskette (e)EPK.....	16
2.3.4 Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) .....	18
2.4 Wissensbasierte Systeme .....	21
2.4.1 Grundlagen wissensbasierter Systeme .....	21
2.4.2 Semantische Technologien und Ontologien .....	22
3 Der Fertigungsplanungsprozess im Karosseriebau .....	29
3.1 Aufnahme des Ist-Prozesses .....	29
3.1.1 Vorgehensweise bei der Aufnahme des Ist-Prozesses .....	30
3.1.2 Vorbereitung der Ist-Aufnahme .....	31
3.1.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches.....	32
3.1.4 Erhebung und Modellierung des Ist-Prozesses.....	33
3.1.4.1 Durchführung der Ist-Aufnahme .....	33
3.1.4.2 Ergebnisse der Expertenbefragung.....	34
3.1.4.3 Modellierung des Ist-Prozesses .....	39
3.1.5 Konsolidierung des Ist-Modells.....	44

3.2	Analyse des Ist-Prozesses .....	44
3.2.1	Identifizierung der Schwachstellen .....	44
3.2.2	Aufzeigen von Verbesserungspotentialen .....	48
3.3	Konzeption des Soll-Prozesses .....	51
4	Anforderungen an ein Konzept zur automatisierten Betriebsmittelplanung .....	53
4.1	Vorgehensmodell der Software-Entwicklung .....	54
4.2	Vorgehensmodell der Produktionssystemplanung .....	56
4.3	Beschreibung der Anwendungsfälle .....	64
4.4	Prämissen zur Erstellung einer Karosseriebaufertigungsanlage .....	69
4.5	Möglichkeiten der Modellierung von Fertigungsprozessen.....	71
4.5.1	Vorgehensweise zur Bewertung der Modellierungsarten .....	71
4.5.2	Beschreibung eines exemplarischen Fertigungsprozesses .....	73
4.5.3	Bewertung der Modellierungsarten.....	77
4.5.3.1	Beschreibung der Bewertungskriterien.....	77
4.5.3.2	Gewichtung der Bewertungskriterien .....	80
4.5.3.3	Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) .....	82
4.5.3.4	Unified Modeling Language (UML).....	86
4.5.3.5	Business Process Modeling Notation (BPMN) .....	90
4.5.3.6	Petrinetze .....	93
4.5.3.7	Modell der Fertigung (MFert).....	96
4.5.3.8	Produkt-Prozess-Ressource (PPR) – Prinzip.....	100
4.5.3.9	Parametrische Darstellung .....	103
4.5.3.10	Zusammenfassung der Bewertung.....	107
5	Konzept zur automatisierten Generierung von Fertigungsanlagen.....	111
5.1	Aufbau des Konzepts.....	111
5.2	Herleitung einer Wissensbasis für die Fertigungsplanung im Karosseriebau.....	113
5.2.1	Vorgehensweise zum Erstellen der Ontologie.....	113
5.2.2	Eine Ontologie zur Beschreibung von Fertigungsprozessen im Karosseriebau.....	116
5.3	Vorgehensweise zur Herleitung der Fertigungsanlagen .....	127
5.3.1	Analyse der Prämissen und Abbildung in Ontologie .....	127
5.3.2	Herleitung des Fertigungsprozesses .....	133
5.3.3	Herleitung der Betriebsmittelzuordnung .....	137
5.3.4	Bewertung von Anlagenkonzepten mithilfe von Kennzahlen.....	139
5.4	Zusammenfassung des Konzeptes .....	141

6	Evaluierung des Konzeptes an einem Fallbeispiel .....	143
6.1	Vorstellung des Fallbeispiels .....	143
6.1.1	Inhalt der Wissensbasis .....	143
6.1.2	Vorstellung der gegebenen Projekt-Prämissen .....	144
6.1.3	Vorstellung der gegebenen Produkt-Prämissen .....	144
6.2	Aufbereitung der Projekt- und Produkt-Prämissen .....	147
6.3	Herleitung des Fertigungsprozesses .....	148
6.3.1	Ermittlung der Fügefolgen und deren Reihenfolge .....	148
6.3.2	Bildung der Alternativengruppen und Arbeitsfolge-Varianten .....	151
6.4	Herleitung der zum Fertigungsprozess benötigten Ressourcen .....	155
6.5	Bewertung der alternativ ermittelten Anlagenkonzepte .....	159
6.5.1	Anwendung des Algorithmus von Dijkstra .....	162
6.5.2	Auswertung des Ergebnisses .....	166
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	169
7.1	Zusammenfassung und Beurteilung .....	169
7.2	Ausblick .....	172
	Literaturverzeichnis .....	173
	Anhang .....	179
A	Interviews mit Betriebsmittelplanern .....	179
B	Übersicht Gesamt-Ontologie .....	182
C	SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Produkt“ .....	183
D	SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Prozess“ .....	184
E	SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Ressourcen“ .....	185
F	Übersicht der Alternativengruppen, Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten .....	187

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung) .....	6
Abbildung 2: Produktionsprozess in Form eines Transformationsprozesses, nach (SCHENK et al. 2014) .....	7
Abbildung 3: Stufen und Phasen der Produktionssystemplanung aus (SCHENK et al. 2014) .....	8
Abbildung 4: Das Y-CIM-Modell nach (SCHEER 1987), (BRACHT et al. 2011) .....	10
Abbildung 5: ARIS-Haus aus (SCHEER 1998a) .....	13
Abbildung 6: Phasen der ARIS-Modellierung nach (SCHEER 1997) .....	14
Abbildung 7: Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung aus (BECKER et al. 2009) .....	19
Abbildung 8: Abgrenzung ausgewählter Begrifflichkeiten des Wissensmanagements nach (REHÄUSER & KRCCMAR 1996; PROBST 2006) .....	21
Abbildung 9: Beispielhafte Struktur eines wissensbasierten Expertensystems aus (LÄMMEL & CLEVE 2008) .....	22
Abbildung 10: Semiotisches Dreieck aus (GAAG 2009) .....	23
Abbildung 11: Semantische Treppe nach (PELLEGRINI & BLUMAUER 2006) .....	24
Abbildung 12: Ebenenkonzept der W3C-Standards auf dem Gebiet des semantischen Webs aus (BERNERS-LEE 2000) .....	25
Abbildung 13: Beispiel eines RDF-Tripels (eigene Darstellung) .....	26
Abbildung 14: Abgrenzung von RDF und RDFS aus (HITZLER 2008) .....	27
Abbildung 15: Vorgehensweise Prozessanalyse (eigene Darstellung) .....	29
Abbildung 16: Vorgehensweise der Prozess-Ist-Aufnahme (eigene Darstellung) .....	30
Abbildung 17: Wertschöpfungskettendiagramm für den Fertigungsplanungsprozess (eigene Darstellung) .....	35
Abbildung 18: beispielhaftes zweidimensionales Layout mit Fertigungsfluss (VOLKSWAGEN AG PLANUNG MARKE VOLKSWAGEN 2015) .....	38
Abbildung 19: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 1 (eigene Darstellung) .....	39
Abbildung 20: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 2 (eigene Darstellung) .....	40
Abbildung 21: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 3 (eigene Darstellung) .....	42
Abbildung 22: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 4 (eigene Darstellung) .....	43
Abbildung 23: Zusammenhang des PPR-Prinzips in der Fertigungsplanung (eigene Darstellung) .....	47
Abbildung 24: Zusammenhang zwischen vorhandenen Daten und dem Y-CIM-Modell nach (SCHEER 1987) .....	50
Abbildung 25: EPK zur Integration des Teil-Soll-Prozesses in Gesamtprozess (eigene Darstellung) .....	51
Abbildung 26: Ereignisgesteuerte Prozesskette des Soll-Prozesses (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 27: Drei-Schichten-Entwurfsarchitektur mit Umsetzungsgrad im Rahmen der Arbeit (eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 28: Modell zur Vorgehensweise bei der prototypischen Softwareentwicklung nach (KLEUKER 2011) .....	55
Abbildung 29: Projektschritte der Produktionssystemplanung nach (SCHENK et al. 2014) .....	57
Abbildung 30: Systemtheoretische Sichtweise eines Produktionssystems aus (SCHENK et al. 2014) .....	58
Abbildung 31: Planungsschritt der Funktionsbestimmung aus (SCHENK et al. 2014) .....	59
Abbildung 32: Planungsschritt der Dimensionierung aus (SCHENK et al. 2014) .....	61
Abbildung 33: Planungsschritt der Strukturierung aus (SCHENK et al. 2014) .....	62
Abbildung 34: Planungsschritt der Gestaltung aus (SCHENK et al. 2014) .....	63
Abbildung 35: Use-Case-Diagramm des "Prämissen"-Bildschirms (eigene Darstellung) .....	65
Abbildung 36: Use-Case-Diagramm des "Produktstruktur"-Bildschirms (eigene Darstellung) .....	66

---

Abbildung 37: Use-Case-Diagramm des "Verbindungsdaten"-Bildschirms (eigene Darstellung) .....	67
Abbildung 38: Use-Case-Diagramm des "Fertigungsprozess"-Bildschirms (eigene Darstellung).....	68
Abbildung 39: Produktstruktur des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung).....	73
Abbildung 40: visuelle Produktstruktur des Beispiel-Produktes (HOLZKAMP 2010) .....	74
Abbildung 41: Übersicht der Fertigungsreihenfolge des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung) .....	75
Abbildung 42: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung).....	76
Abbildung 43: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer eEPK (eigene Darstellung).....	84
Abbildung 44: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer eEPK (eigene Darstellung).....	85
Abbildung 45: Übersicht der Modellarten der UML nach (GRECHENIG 2010) .....	86
Abbildung 46: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung).....	88
Abbildung 47: Ergänzung des Aktivitätsdiagramms um Elemente des Objektdiagramms (eigene Darstellung).....	89
Abbildung 48: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung) .....	89
Abbildung 49: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer BPMN (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 50: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer BPMN (eigene Darstellung).....	92
Abbildung 51: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Petrinetz (eigene Darstellung).....	95
Abbildung 52: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit MFert (eigene Darstellung) ...	98
Abbildung 53: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit MFert (eigene Darstellung).....	99
Abbildung 54: schematische Produkt-Prozess-Ressourcen-Struktur im Tecnomatix Process Designer (eigene Darstellung).....	100
Abbildung 55: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer PPR-Darstellung (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 56: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit der PPR-Darstellung (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 57: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit der Parametrischen Darstellung (eigene Darstellung).....	106
Abbildung 58: Rangliste der Gesamtnutzwerte anhand der Nutzwertanalyse (eigene Darstellung).108	
Abbildung 59: Konzeptarchitektur und Funktionsweise (eigene Darstellung) .....	112
Abbildung 60: Vorgehensweise zur Erarbeitung der Ontologie nach (NOY & MCGUINNESS 2001).....	114
Abbildung 61: Word-Cloud als Ergebnis des Brainstormings (eigene Darstellung) .....	117
Abbildung 62: Teil-Ontologie auf Ebene der Entität nach Top-Down-Ansatz (eigene Darstellung) ..	117
Abbildung 63: Teil-Ontologie für das Produkt (eigene Darstellung) .....	119
Abbildung 64: Teil-Ontologie für die Verbindungen (eigene Darstellung) .....	119
Abbildung 65: Teil-Ontologie für die Aktivität (eigene Darstellung) .....	120
Abbildung 66: Teil-Ontologie der Operationen (eigene Darstellung) .....	121
Abbildung 67: Teil-Ontologie der Ressourcen (eigene Darstellung) .....	122
Abbildung 68: Datatype-Properties der Klasse "Entität" (eigene Darstellung) .....	122
Abbildung 69: Datatype-Properties der Klasse "Projekt" (eigene Darstellung) .....	123

Abbildung 70: Datatype-Properties der Klasse "Produkt" (eigene Darstellung) .....	123
Abbildung 71: Object-Properties der Klasse "Produkt" (eigene Darstellung) .....	124
Abbildung 72: Datatype- und Object-Properties der Klasse "Aktivität" (eigene Darstellung) .....	125
Abbildung 73: Datatype- und Object-Properties der Klasse "Ressource" (eigene Darstellung) .....	126
Abbildung 74: Gesamtübersicht der erarbeiteten Ontologie (eigene Darstellung) .....	127
Abbildung 75: Eingangsdaten für das Konzept (eigene Darstellung) .....	128
Abbildung 76: Zusammenhang zwischen Produktdaten in XML-Datei und Ontologie (eigene Darstellung) .....	128
Abbildung 77: Zusammenhang zwischen Verbindungsdaten in XML-Datei und Ontologie (eigene Darstellung) .....	130
Abbildung 78: automatische Schlussfolgerung der Komponentenbeziehung in Protégé (eigene Darstellung) .....	131
Abbildung 79: Ergänzung der Ontologie um die Klasse "Alternative" (eigene Darstellung) .....	136
Abbildung 80: Abbildung des fiktiven Beispiel-Produktes in der Gesamtansicht (eigene Darstellung) .....	145
Abbildung 81: Produkt-Struktur des fiktiven Beispiel-Produktes (eigene Darstellung) .....	146
Abbildung 82: Übersicht der Verbindungen zwischen den Produkt-Komponenten (eigene Darstellung) .....	146
Abbildung 83: Beschreibung der Instanzen "ZSB4" und "EBT5" in Protégé (eigene Darstellung) .....	147
Abbildung 84: Beschreibung der Instanz "CLP1" in Protégé (eigene Darstellung) .....	147
Abbildung 85: Definition der Object-Property "realisiert" in Protégé (eigene Darstellung) .....	148
Abbildung 86: Beschreibung der Instanz "CLP_Op1" in Protégé (eigene Darstellung) .....	149
Abbildung 87: Definition der Object-Property "fügt" in Protégé (eigene Darstellung) .....	149
Abbildung 88: Beschreibung der Instanz "FF5" in Protégé (eigene Darstellung) .....	150
Abbildung 89: ermittelter Fertigungsprozess (eigene Darstellung) .....	150
Abbildung 90: Herleitung der ersten Alternativengruppe (eigene Darstellung) .....	152
Abbildung 91: Herleitung der zweiten Alternativengruppe (eigene Darstellung) .....	153
Abbildung 92: Herleitung der dritten Alternativengruppe (eigene Darstellung) .....	154
Abbildung 93: Herleitung der vierten Alternativengruppe (eigene Darstellung) .....	154
Abbildung 94: Herleitung der ersten Betriebsmittel-Variante (eigene Darstellung) .....	155
Abbildung 95: Betrachtung der alternativen Betriebsmittel-Belegung (eigene Darstellung) .....	157
Abbildung 96: Komplette zweite Alternativengruppe mit allen Betriebsmittel-Varianten (eigene Darstellung) .....	158
Abbildung 97: Inhalt der Betriebsmittel-Variante 2_1_2 (eigene Darstellung) .....	159
Abbildung 98: Restriktion für aufeinanderfolgende Betriebsmittel-Varianten (eigene Darstellung) ..	160
Abbildung 99: Vorbereitung des Graphen für den Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) .....	161
Abbildung 100: Löschen der verbotenen Kanten (eigene Darstellung) .....	161
Abbildung 101: Erster Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) .....	162
Abbildung 102: Zweiter Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) .....	163
Abbildung 103: Dritter und vierter Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) .....	164
Abbildung 104: Zusammenfassung Schritt 5 bis 12 des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) ..	165
Abbildung 105: Resultat des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung) .....	166
Abbildung 106: Ergebnis des Fertigungsprozesses im Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung) ....	167
Abbildung 107: Gesamtübersicht der erarbeiteten Ontologie (eigene Darstellung) .....	182
Abbildung 108: Übersicht der Alternativengruppe 1 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung) .....	187

Abbildung 109: Übersicht der Alternativengruppe 2 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung) .....	187
Abbildung 110: Übersicht der Alternativengruppe 3 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung) .....	188
Abbildung 111: Übersicht der Alternativengruppe 4 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung) .....	189

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Notationselemente einer eEPK in ARIS Express nach (GADATSCH 2008) .....	17
Tabelle 2: Fragebogen für die Expertenbefragung .....	33
Tabelle 3: Prämissenübersicht .....	69
Tabelle 4: Übersicht der Verbindungsdaten des Beispiel-Produktes .....	74
Tabelle 5: Übersicht der genutzten Fügetechniken.....	76
Tabelle 6: Übersicht der benötigten Füge-Betriebsmittel .....	77
Tabelle 7: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskriterien .....	81
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Bewertungsskalen nach (MEIER 2002).....	82
Tabelle 9: Notationselemente der eEPK und Interpretation für Fertigungsprozesse .....	83
Tabelle 10: Bewertung der Modellierungsmethode "ARIS" .....	85
Tabelle 11: Notationselemente des Aktivitätsdiagramms und Interpretation für Fertigungsprozesse	87
Tabelle 12: Bewertung der Modellierungsmethode "UML" .....	90
Tabelle 13: Notationselemente der BPMN und Interpretation für Fertigungsprozesse .....	91
Tabelle 14: Bewertung der Modellierungsmethode "BPMN" .....	93
Tabelle 15: Notationselemente der Petrinetze und Interpretation für Fertigungsprozesse .....	95
Tabelle 16: Bewertung der Modellierungsmethode "Petrinetz" .....	96
Tabelle 17: Notationselemente von MFert und Interpretation für Fertigungsprozesse .....	97
Tabelle 18: Bewertung der Modellierungsmethode "MFert" .....	99
Tabelle 19: Notationselemente der PPR-Darstellung und Interpretation für Fertigungsprozesse ....	101
Tabelle 20: Bewertung der Modellierungsmethode "PPR aus Process Designer" .....	103
Tabelle 21: Notationselemente der Parametrischen Darstellung und Interpretation für Fertigungsprozesse .....	104
Tabelle 22: Beschriftungselemente der Parametrischen Darstellung .....	105
Tabelle 23: Bewertung der Modellierungsmethode "Parametrische Darstellung" .....	107
Tabelle 24: Zusammenfassung der Nutzwertanalyse .....	108
Tabelle 25: Gegenüberstellung XML-Datei (links) und OWL-Ontologie (rechts) zur Produktdatenbeschreibung.....	129
Tabelle 26: Gegenüberstellung XML-Datei (links) und OWL-Ontologie (rechts) zum Thema Verbindungsdaten.....	130
Tabelle 27: Regeldefinition zur Inferenz der Verbindungen .....	132
Tabelle 28: Regeldefinition zur Inferenz der Zusammenbauteile .....	132
Tabelle 29: Regeldefinition zur Inferenz von Schweißverbindungen und –operationen .....	133
Tabelle 30: Regeldefinition zur Inferenz der Operationsdauer einer Schweißoperation .....	134
Tabelle 31: Regeldefinition zur Lösung der Zuordnungs- und Reihenfolgeproblematik .....	135
Tabelle 32: Regeldefinition zur Erzeugung der Abhängigkeiten zwischen Ressourcen .....	138
Tabelle 33: Investitionskosten und Energieverbrauch der benötigten Ressourcen .....	144
Tabelle 34: Resultat in Form des Mengengerüsts mit den erforderlichen Ressourcen .....	168
Tabelle 35: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Produkt" .....	183
Tabelle 36: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Prozess" .....	184
Tabelle 37: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Ressource" .....	186

## Abkürzungsverzeichnis

---

### **A**

AFO · *Arbeitsfolge*  
AG · *Aktiengesellschaft*  
ALTGR · *Alternativengruppe*  
ARIS · *Architektur integrierter Informationssysteme*

---

### **B**

BeMi · *Betriebsmittel*  
BEVA · *Betriebsmittelvariante*  
BPMN · *Business Process Modeling Notation*

---

### **C**

CAD · *Computer Aided Design*  
CAM · *Computer Aided Manufacturing*  
CAP · *Computer Aided Planning*  
CAQ · *Computer Aided Quality Assurance*  
CIM · *Computer Integrated Manufacturing*  
CLI · *Clinchen*  
CZ · *Clinch-Zange*

---

### **D**

DV · *Datenverarbeitung*

---

### **E**

EBT · *Einzelbauteil*  
EDV · *Elektronische Datenverarbeitung*  
EE · *Energieeinheiten*  
eEPK · *erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette*  
EPK · *Ereignisgesteuerte Prozesskette*  
ERM · *Entity Relationship Modelle*

---

### **F**

FF · *Fügefølge*

---

## *G*

GoM · *Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung*

---

## *I*

IE · *Investitionseinheiten*

IR · *Industrie-Roboter*

IT · *Informationstechnologie*

---

## *J*

JPH · *Jobs Per Hour*

---

## *M*

MFert · *Modell der Fertigung*

MQB · *Modularer Querbaukasten*

---

## *O*

OMG · *Object Management Group*

OWA · *Open World Assumption*

OWL · *Web Ontology Language*

---

## *P*

PD · *Process Designer*

PERT · *Program Evaluation and Review Technique*

PPR · *Produkt-Prozess-Ressource*

---

## *R*

RDF · *Resource Description Framework*

RDFS · *Resource Description Framework Schema*

---

## *S*

SPARQL · *SPARQL Protocol and RDF Query Language*

SWRL · *Semantic Web Rules Language*

SZ · *Schweißzange*

---

## *T*

TN · *Teilnutzwerte*

---

---

**U**

UML · *Unified Modeling Language*

URI · *Uniform Resource Identifiers*

---

**V**

VDI · *Verein Deutscher Ingenieure*

---

**W**

W3C · *World Wide Web Consortium*

WPS · *Widerstandspunktschweißen*

---

**X**

XML · *eXtensible Markup Language*

---

**Z**

Zf · *Zielfaktoren*

ZSB · *Zusammenbauteil*



## **Abstract**

Das Ziel dieser Masterarbeit ist die Optimierung des Fertigungsplanungsprozesses im Bereich der Karosseriebauplanung eines Automobilherstellers. Eine Prozessanalyse führt zu der Erkenntnis, dass die Planung von Produktionssystemen auf standardisierten Fertigungsanlagen basiert, die durch Anpassungsplanung fahrzeugprojektspezifisch optimiert werden. Die intensive Wiederverwendung von Planungsergebnissen geht mit dem Risiko einher, gegebene Fertigungsprozesse einzuplanen, die nicht optimal auf das zu fertigende Produkt abgestimmt sind. Um diesem Risiko zu begegnen wird im Rahmen der Arbeit ein Konzept entwickelt, mit dem auf Basis von gegebenen Produktdaten teilautomatisiert die erforderlichen Fertigungsprozesse und Ressourcen hergeleitet werden. Dabei kommen wissensbasierte Ansätze in Form einer Ontologie zum Einsatz, wodurch das bislang implizite Wissen von Fachexperten explizit für Planungssysteme nutzbar gemacht wird. Das entwickelte Konzept wird anhand eines Beispiels evaluiert, wobei alternative Planungsvarianten einer Fertigungsanlage erzeugt und anschließend bewertet werden. Im Rahmen der Evaluierung werden Potentiale und Herausforderungen identifiziert und Handlungsbedarfe für zukünftige Arbeiten abgeleitet.

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die kürzer werdenden Entwicklungszyklen und komplexeren Kundenansprüche in der Automobilindustrie erfordern unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit eine Optimierung und Standardisierung von Prozessen und Arbeitsergebnissen. Im Bereich der Fertigungsplanung ist die konsequente Einführung und Verankerung der Digitalen Fabrik in die bereits vorhandenen Geschäftsprozesse eines Unternehmens eine Maßnahme, um diesen Herausforderungen gerecht zu werden. Weiterhin werden zur Erhöhung der Synergieeffekte zwischen ähnlichen Produkten im Karosseriebau bei der Marke Volkswagen PKW standardisierte Fertigungsanlagen für die einzelnen Baugruppen entwickelt. Diese Planung geschieht mit einem Detaillierungsgrad, der dem der Phase der Feinplanung entspricht. Bei der Neu-Planung einer Karosseriebau-Fertigung für ein Fahrzeugprojekt erfolgt in der Phase der Grobplanung oft die Auswahl einer der vorhandenen, standardisierten Fertigungsanlagen. Dadurch kommt es direkt zu einem Einstieg in die Phase der Feinplanung. Eine Planung der Fertigung ausgehend vom Produkt hin zu den Fertigungsprozessen und einer daraus folgenden Ableitung der benötigten Ressourcen ist somit nicht vorhanden. Durch die Auswahl einer vorhandenen Referenzplanung beruht die zu erarbeitende Fertigungsanlage indirekt auf den Projekt- und Produktprämissen. Im Fokus steht jedoch die Anpassung der Ressourcen an die Gegebenheiten und nicht die Erarbeitung des Fertigungsprozesses. Daraus ergibt sich das Risiko von Investitionen, die aufgrund der Optimierung der standardisierten Referenzen und somit nicht durch die direkte Herleitung der Fertigungsanlage anhand der gegebenen Produktstruktur entstehen.

Weiterhin existiert bei der Marke Volkswagen PKW momentan kein System zur Fertigungsplanung im Karosseriebau, das den Planer explizit in der Phase der Grobplanung dabei unterstützt, anhand der gegebenen Produktdaten eine Fertigungsanlage auf einem groben Niveau zu planen. Die vorhandene Software bietet einen sehr hohen Detaillierungsgrad der Arbeitsergebnisse, der nicht dem der Grobplanungsphase entspricht. Diese IT-Systeme sind in ihrem Aufbau und ihrer Art der Verwendung zudem sehr komplex. Dabei wird das implizit vorhandene Wissen der Fertigungsplaner nur unzureichend genutzt und nicht explizit zur Verfügung gestellt. Es existiert keine von anderen IT-Systemen oder Arbeitskollegen auszuwertende Wissensdatenbank, in der das Wissen und die Zusammenhänge der Fertigungsplanung einer Karosseriebauanlage explizit abgelegt sind.

## 1.2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Fertigungsplanungsprozess in der Karosseriebauplanung im Rahmen der frühen Grobplanungsphase zu verbessern. Dies soll durch ein IT-gestütztes Werkzeug zur teilautomatisierten Erzeugung einer Fertigungsanlage anhand eines gegebenen Produktes und mithilfe von wissensbasierten Methoden erreicht werden. Dabei gilt es den Grad der Machbarkeit der teilautomatisierten Herleitung einer Fertigungsanlage anhand von gegebenen Produktdaten zu ermitteln. Die Erarbeitung eines Modells zur Verarbeitung der Daten und des Wissens im Rahmen dieses Prozesses, um das implizit vorhandene Wissen der Fertigungsplaner explizit zu beschreiben, ist ein wesentlicher Aspekt dieser Ausarbeitung. Dazu wird auch der aktuelle Prozess zur groben Planung einer Fertigungsanlage im Karosseriebau in der frühen Planungsphase bei der Marke Volkswagen PKW aufgenommen und analysiert. Somit erfolgt eine Synthese von vorhandenem Ingenieurwissen auf der einen Seite und der Informationstechnologie auf der anderen Seite, um zu einer intelligenten Systemlösung zu führen. Dem Fertigungsplaner wird dadurch ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, das ihm in der Phase der Grobplanung die Arbeitsweise erleichtert und ihm die Möglichkeit gibt anhand eines gegebenen Produktes die erforderlichen Kennzahlen für Fertigungsanlagen zu ermitteln. Diese differenzierte Betrachtungsweise ermöglicht dem Planer eine Beurteilung aus einer anderen Sicht und erhöht damit die Qualität des Planungsergebnisses.

Diese Arbeit umfasst den konzeptionellen Teil eines entsprechenden IT-Systems und hat nicht das Ziel ein System final zu entwickeln. Es wird jedoch ein Anwendungsbeispiel anhand des entwickelten Konzeptes gegeben, um die Machbarkeit und die bestehenden Herausforderungen nachzuweisen. Die Wissensbasis wird in ihrem strukturellen Umfang erarbeitet, jedoch nicht vollständig mit Inhalten gefüllt, da dafür die Zusammenarbeit mit einer Vielzahl an Fertigungsplanern in einem definierten Erfassungsprozess notwendig ist. Es ist ebenso nicht vorgesehen Schnittstellen des zu entwickelnden Konzeptes zu den bestehenden IT-Systemen der IT-Infrastruktur zu untersuchen. Weiterhin beruht dieses Konzept auf einer hohen Qualität in Bezug auf den Reifegrad der zur Verfügung gestellten Produktdaten. Eine Analyse zur Verbesserung der Produktdatenqualität zum Zeitpunkt der Grobplanungsphase gehört nicht zum Umfang dieser Arbeit.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Im ersten Kapitel wird mit einer Motivation in die Thematik eingeleitet, die Zielstellung formuliert und der Aufbau der Arbeit erläutert. Dieser ist zudem in Abbildung 1 dargestellt.

Zunächst werden im zweiten Kapitel die notwendigen theoretischen Grundlagen zum weiteren Verständnis dieser Arbeit erläutert. Dabei erfolgt eine Einführung in die Themengebiete der Fertigungsplanung und der Digitalen Fabrik, die das wissenschaftliche Umfeld bilden. Da im weiteren Verlauf Prozesse analysiert und modelliert werden, sind zudem die Grundlagen der Prozessmodellierung näher beschrieben. Dazu gehört eine detaillierte Erklärung der Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) und für eine Sicherstellung der Modellierungsqualität die Ausführung der Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. Außerdem wird eine Konkretisierung der Bedeutung von wissensbasierten Systemen und insbesondere von Ontologien vorgenommen.

Das dritte Kapitel analysiert den aktuellen Prozess der Fertigungsplanung im Karosseriebau in der frühen Phase der Grobplanung bei der Marke Volkswagen PKW. Dazu wird der Prozess zunächst mithilfe von Expertenbefragungen aufgenommen und anschließend in Bezug auf Schwachstellen und Verbesserungspotentiale untersucht. Darauf aufbauend wird ein optimierter Soll-Prozess in den bestehenden Prozess integriert.

Im vierten Kapitel werden die vorbereitenden Aspekte zur Ausarbeitung des Konzeptes analysiert. Dazu wird in einem ersten Schritt herausgearbeitet, welche Anforderungen für dieses notwendig sind. Diese werden in Form von Anwendungsfällen beschrieben. Weiterhin werden verschiedene Modellierungsarten für die später erforderliche Modellierung der Fertigungsprozesse untersucht und bewertet.

Das fünfte Kapitel behandelt die Herleitung des Konzeptes zur automatisierten Generierung von Fertigungsanlagen mithilfe von wissensbasierten Systemen. Für die Ausarbeitung des Konzeptes bildet die Definition des Datenmodells mithilfe einer Ontologie die Grundlage. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der algorithmischen Vorgehensweise und ein Verfahren zur Bewertung der ermittelten Anlagenkonzepte.

Im Rahmen des sechsten Kapitels erfolgt die Evaluierung des zuvor erarbeiteten Konzeptes an einem konkreten Beispiel. Dies dient einerseits dazu das Konzept beispielhaft zu erklären und andererseits die Machbarkeit und Restriktionen herauszustellen.

Abschließend wird im siebten Kapitel eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit und ein Ausblick auf künftige Untersuchungen und Entwicklungen, die auf diesem Gebiet in Bearbeitung sind, gegeben.

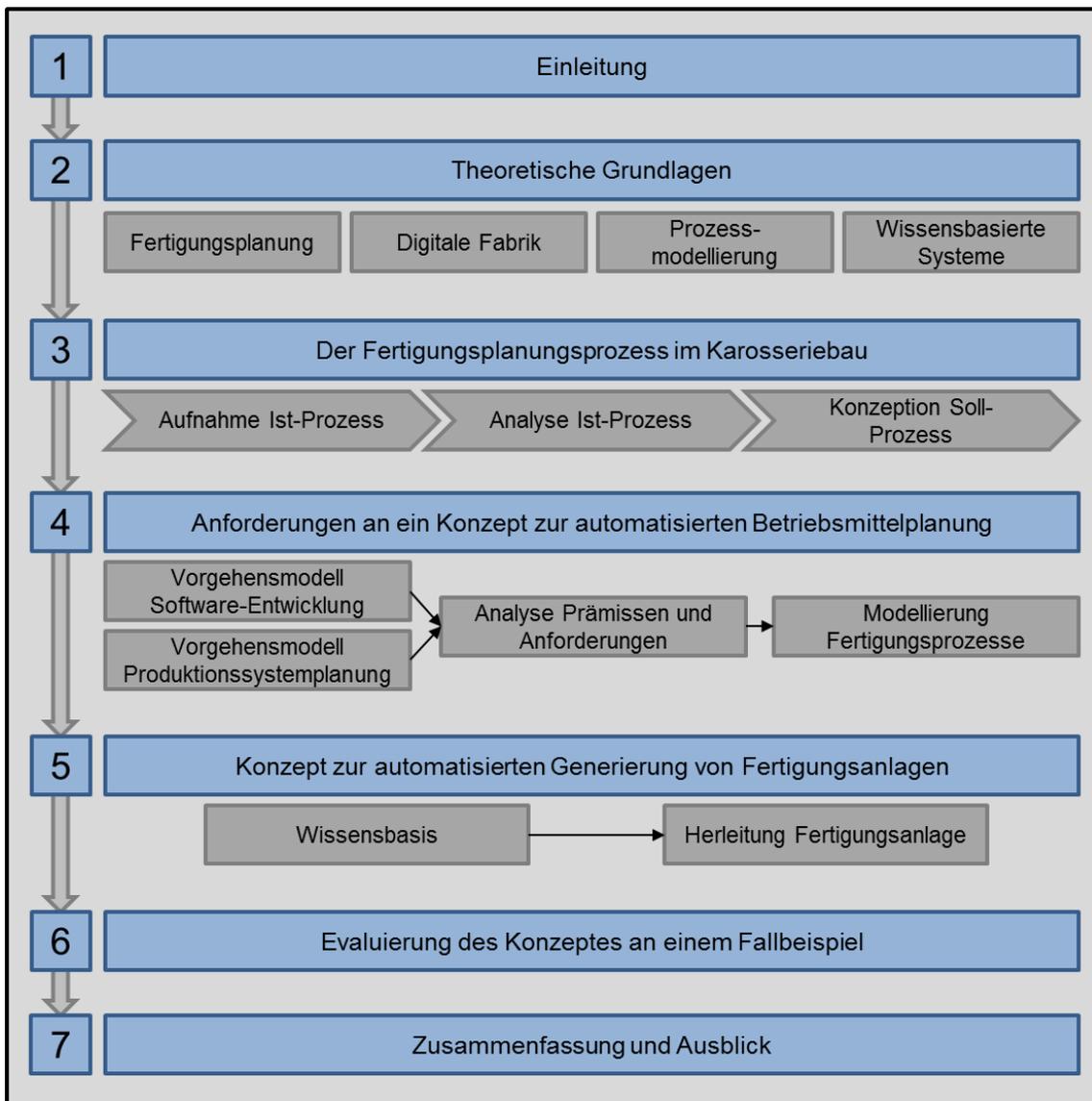


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit (eigene Darstellung)

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Fertigungsplanung

Das Umfeld dieser Arbeit ist die Fertigungsplanung für den Karosseriebau eines Automobilherstellers. Diese ist im Bereich der Produktion eingegliedert. Unter der Produktion wird der Prozess zur Umwandlung oder Transformation von Einsatzgütern zu anderen materiellen oder immateriellen Gütern beziehungsweise Dienstleistungen auf betrieblicher Ebene verstanden (WEBER et al. 2014). Die Einsatzgüter, die als Input dienen, werden in diesem Zusammenhang als Produktionsfaktoren bezeichnet (DANGELMAIER 1999). Die Abbildung 2 erläutert diesen Zusammenhang schematisch.

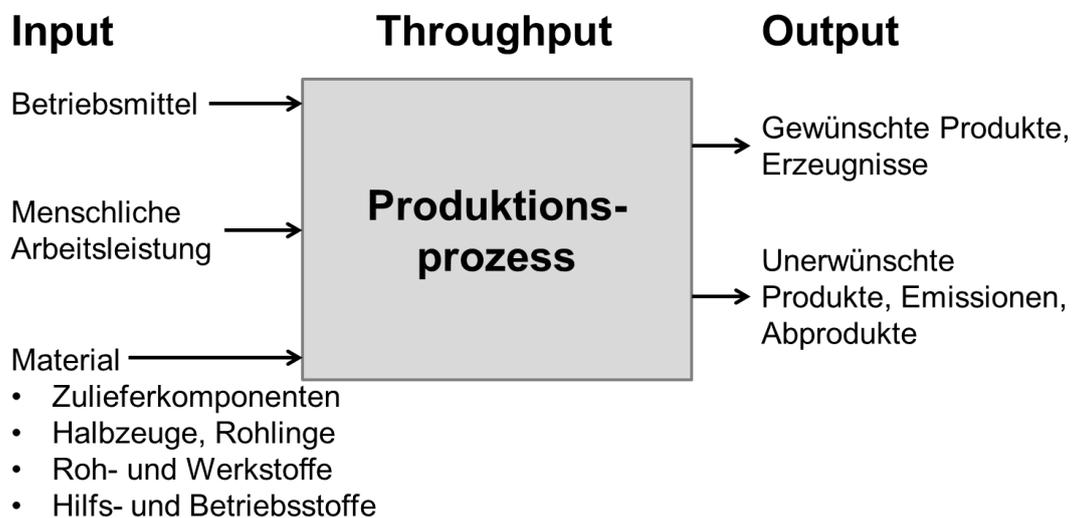


Abbildung 2: Produktionsprozess in Form eines Transformationsprozesses, nach (SCHENK et al. 2014)

Als eine spezielle Form der Produktion beschreibt die Fertigung konkret alle Maßnahmen, die technisch nötig sind, um Materialien oder Erzeugnisse herzustellen und zu montieren. Ergänzend dazu existieren Hilfstechniken, die die Fertigung unterstützen. Dazu gehören zum Beispiel die Förder- und Messtechnik. (DANGELMAIER 1999)

Die Planung wird laut (KERN 1996) als „gedankliche Vorwegnahme künftigen Geschehens durch systematische Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfällung“ definiert. Weiterhin ist der Inhalt beschrieben durch einen Prozess zur Entscheidung, „in dem zur Lösung eines Problems zielorientiert Alternativen zu suchen, zu beurteilen und auszuwählen sind“, wobei dies auf Basis einer Zielfunktion geschieht (KERN 1996). Durch die Kombination der zuvor definierten Begriffe der Fertigung und der Planung ergibt sich die Beschreibung der Fertigungsplanung. Zusätzlich werden unter der Ferti-

gungsplanung „alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Fertigungssystems und der darin stattfindenden Fertigungsprozesse“ (DANGELMAIER 1999) verstanden. In dieser Definition befinden sich zwei weitere relevante Begriffe im Bereich der Fertigung. Ein Fertigungssystem ist die „technisch, organisatorisch (und kostenrechnerisch) selbständige Allokation von Potentialfaktoren zu Produktionszwecken“ (KERN 1979). Dieses wird im Rahmen der Fertigungsplanung gestaltet und bestimmt (DANGELMAIER 1999). Ein Fertigungsprozess besteht aus mehreren Einzelprozessen, die Stoffe, Energie und Informationen umwandeln oder umformen. Er bildet somit eine Abfolge von Erzeugungen und Verbräuchen in der zeitlichen Dimension unter der Nutzung von wirtschaftlichen Gütern. (KERN 1979)

Die Planung eines Fertigungs- oder Produktionssystems wird laut (SCHENK et al. 2014) in fünf Phasen mit jeweils drei Stufen eingeteilt. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt.

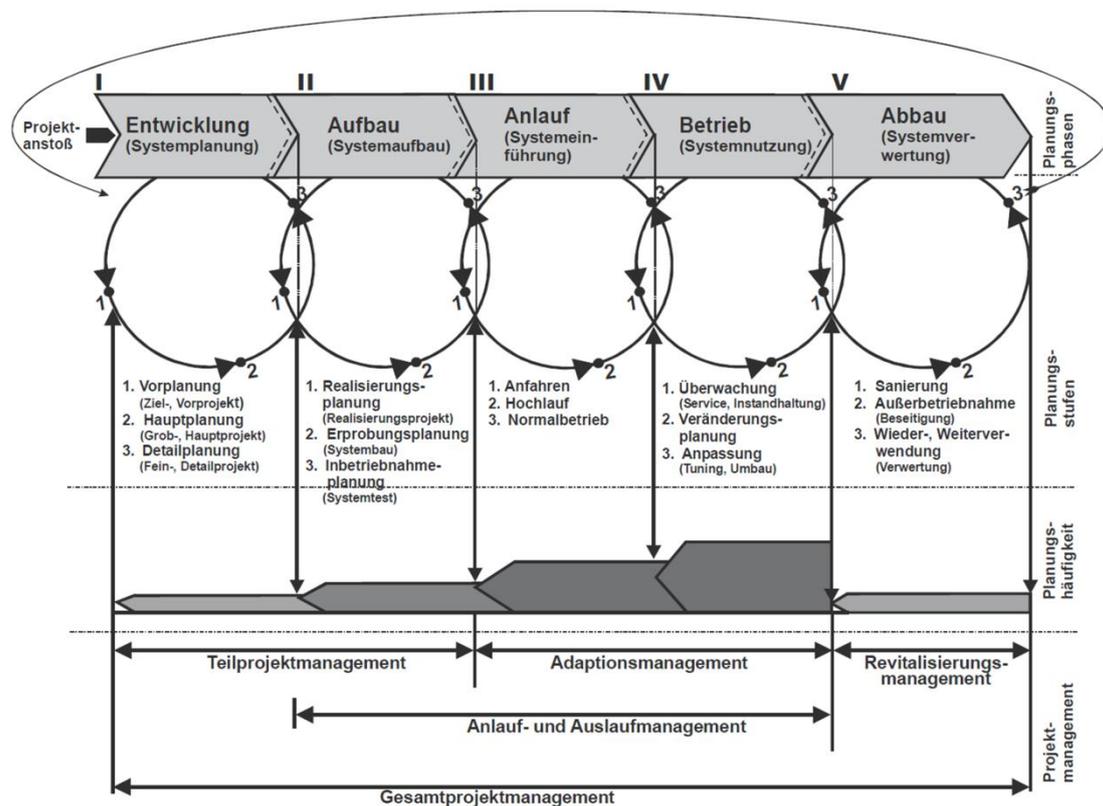


Abbildung 3: Stufen und Phasen der Produktionssystemplanung aus (SCHENK et al. 2014)

Die erste Phase ist die Entwicklung. Innerhalb dieser erfolgt zunächst die Vorplanung. Dabei wird zuerst die Machbarkeit des geplanten Projektes geprüft. Wenn diese gegeben ist, folgt sowohl die Bestimmung von Standort, Aufbau- und Ablauforganisation des Planungssystems als auch die Erarbeitung des Fabrikplanungskonzeptes. In der darauf folgenden Stufe der Grobplanung werden bereits unterschiedliche Konzeptvarian-

ten erstellt und diese bezüglich ihrer Risiken, Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit geprüft. Das Resultat daraus ist ein gesamtes Konzept, welches die Möglichkeit bietet als Entscheidungsgrundlage zu dienen. Danach werden auf der Detailplanungsstufe realisierungsreife Lösungen ausgearbeitet und einerseits auf Basis von Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen Investitionsentscheidungen getroffen und andererseits Angebote eingeholt. Die Inhalte der Grobplanung sind damit spezifiziert. Anschließend folgt die Phase des Aufbaus. Auf der Stufe der Realisierungsplanung werden die Dokumente zur Realisierung des Systems aufbereitet und sowohl das Layout als auch die Infrastruktur festgelegt. In der darauf folgenden Stufe der Erprobungsplanung wird das zuvor geplante System realisiert und in Hinblick auf Sicherheit und Ergonomie gestaltet. Die dritte Planungsstufe im Rahmen der Aufbau-Phase ist die Inbetriebnahmeplanung. Diese umfasst den Test des gesamten Systems, bevor dieses an den Systembetreiber übergeben wird. Im Mittelpunkt steht dabei die Abnahmeprüfung, in der die vorgegebenen Leistungsparameter überprüft werden. Außerdem erfolgt die Planung der anstehenden Mitarbeiterqualifikation. In der Phase des Anlaufs werden die drei Stufen vom Anfahren über den Hochlauf bis hin zum Normalbetrieb des Systems durchlaufen. Nach der Erstinbetriebnahme wird das System somit weitergeführt. Die darauf folgende Phase des Betriebs ist stark mit der Anlaufphase verknüpft. Das Fertigungssystem wird überwacht und Änderungen, die beispielsweise im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses entstanden sind, werden eingeplant und umgesetzt. Die letzte Phase, die den Abbau umfasst, regelt die Verwertung des Systems. Dabei bestehen drei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit ist die Sanierung des Systems im Sinne einer Modernisierung und Verbesserung. Als zweite Möglichkeit gilt die vollständige Außerbetriebnahme des Systems, sodass dieses stillgelegt und demontiert wird. Die dritte Möglichkeit ist die Wiederverwendung von funktionstüchtigen Komponenten des Systems. (SCHENK et al. 2014)

## **2.2 Digitale Fabrik**

Der Gedanke einer digitalen Fabrik im Sinne von durchgängig digital verknüpften Informationen existierte bereits im Jahr 1985. In diesem Jahr entstand ein Vorläufer der digitalen Fabrik in Form des Computer Integrated Manufacturing (CIM). Dahinter steht das Ziel auf der einen Seite die betriebswirtschaftlichen EDV-Funktionen innerhalb der Produktionsplanung und –steuerung und auf der anderen Seite die technischen EDV-Funktionen das Computer Aided Design und Manufacturing (CAD / CAM) zur Erstellung eines Produktes zu integrieren (BRACHT et al. 2011). Zur schematischen Erläute-

Die Abbildung zeigt das Y-CIM-Modell nach Scheer (SCHEER 1987). Dieses Modell beschreibt die unterschiedlichen Funktionen auf der betriebswirtschaftlichen und auf der technischen Seite, wobei beide Seiten während der Planung auf einer gemeinsamen Datenbasis arbeiten. Bei der Realisierung nähern sich beide Seiten noch weiter an. Eine Herausforderung dieses Ansatzes liegt jedoch in den verschiedenen Schnittstellen der beteiligten Systeme, sodass sich dieser Ansatz in vielen Fällen als unwirtschaftlich erwiesen hat. (BRACHT et al. 2011)

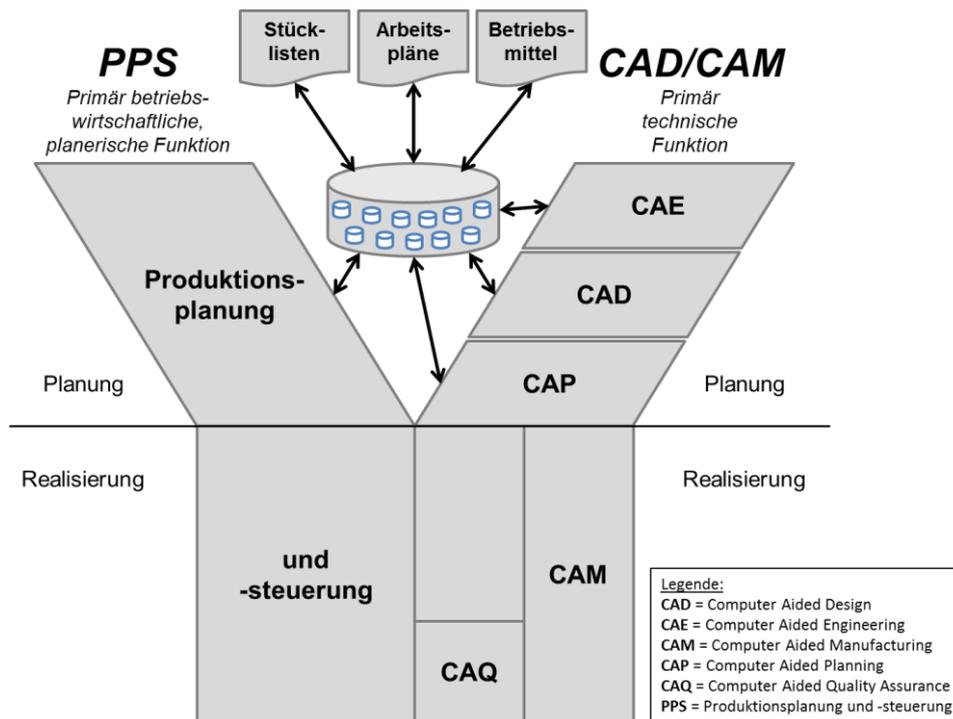


Abbildung 4: Das Y-CIM-Modell nach (SCHEER 1987), (BRACHT et al. 2011)

Für die Digitale Fabrik existiert eine Vielzahl an Definitionen. Die Definition des VDI greift dabei die Inhalte der meisten Definitionen auf und ist in der VDI 4499 folgendermaßen beschrieben: „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“ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2008). Die wesentlichen Vorreiter auf dem Gebiet der Digitalen Fabrik sind zum einen die Automobilbauindustrie und zum anderen die Luft- und Raumfahrtindustrie. Branchenübergreifend sind die Anwendungsgebiete jedoch sehr vielseitig. Laut VDI 4499 Blatt 1 (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 2008) bieten sich durch die Digitale Fabrik in den Bereichen

der Produktentwicklung, der Produktionsplanung, des Produktionsanlaufs, des Produktionsbetriebs und der Auftragsabwicklung die größten Vorteile.

In der Produktionsplanung unterstützen die Methoden der Digitalen Fabrik insbesondere bei der Erreichung der Ziele, indem sowohl Planungsalternativen in einem frühen Stadium bewertet und ausgewählt als auch Ressourcen koordiniert und möglichst ideal ausgelastet werden. Eine allgemeine Spezifizierung einer Digitalen Fabrik ist jedoch nicht möglich, da häufig unternehmensspezifische Ressourcen-Bibliotheken und Dokumentationen von Best-Practices existieren. Weiterhin erweist sich die Vielzahl an unterschiedlichen Schnittstellen innerhalb eines Unternehmens als Herausforderung. Die Eingangsdaten der Digitalen Fabrik werden in Form von Produktdaten von den Entwicklungsabteilungen eines Unternehmens zur Verfügung gestellt. Darauf basierend besteht die Möglichkeit, Analysen durch Simulationen durchzuführen und somit unterschiedliche Alternativen zu betrachten, zu bewerten und abzusichern. Außerdem ist es möglich die Auswirkungen von Änderungen im Vorfeld zu untersuchen. (BRACHT et al. 2011)

Durch die konsequente Einführung der Methoden der Digitalen Fabrik ergibt sich ein hoher Nutzen für das Unternehmen. Die Möglichkeit der parallelen Arbeit in den Bereichen Produktionsplanung und Entwicklung im Sinne des Simultaneous Engineering verkürzt die Zeit, die für die Planung und Entwicklung eines Produktes notwendig ist. Somit verschiebt sich der Aufwand aus den späteren Phasen eines Projektes in die frühe Phase. Dieses Verhalten wird als Frontloading bezeichnet. Es senkt die Kosten, die zur Entwicklung eines Produktes nötig sind, da spätere Änderungen im Projekt meistens mit höheren Kosten verbunden sind. Zudem gibt die Digitale Fabrik seinen Nutzern die Möglichkeit der Visualisierung von Planungsinhalten. Dadurch ergibt sich eine verbesserte Kommunikation und Zusammenarbeit der Mitarbeiter. Diese profitieren außerdem von einem verbesserten Wissensmanagement und einem schnelleren, einfacheren Datenaustausch. Auch im Sinne der Qualität ergeben sich Vorteile. Dabei wird sowohl die Qualität des Produktes als auch des Fertigungssystems verbessert, indem durch vorherige Simulationen die Fertigungsprozesse optimaler und störungsärmer gestaltet werden. Diese Vorgehensweise führt zu einem geringeren Bedarf an Nacharbeit. (BRACHT et al. 2011)

Neben den Vorteilen der Nutzung von Methoden im Rahmen der Digitalen Fabrik existieren jedoch auch Herausforderungen auf diesem Gebiet. Dies betrifft zu einem großen Teil die erforderliche Standardisierung der bestehenden Prozesse und Systeme. Erst diese Standardisierung ermöglicht den Einsatz der Digitalen Fabrik mit ihren Vor-

teilen. Weiterhin erweist sich die nicht vorhandene Durchgängigkeit der Daten und die Verwaltung der Vielzahl an bereits vorhandenen Schnittstellen als eine Schwierigkeit. Eine weitere Herausforderung ist der Umgang mit der Pflege von Bestandsdaten und dem Änderungsmanagement von Daten. Nur die Pflege der Daten über die Planungsphase hinaus ermöglicht die Datendurchgängigkeit und Aktualität. Außerdem ist es notwendig die Digitale Fabrik im Geschäftsprozess zu verankern und somit auch eine strategische Wichtigkeit zu signalisieren. (BRACHT & SPILLNER 2009)

### **2.3 Prozessmodellierung**

Aufgrund der Durchführung einer Prozessanalyse und der späteren Modellierung von Fertigungsprozessen erfolgt an dieser Stelle eine kurze Einführung in die Prozessmodellierung. Zunächst wird eine Definition des Prozessbegriffes gegeben. Im Anschluss werden die Grundlagen zur Prozessmodellierung im Rahmen der Architektur Integrierter Informationssysteme vorgestellt.

#### **2.3.1 Prozesse**

Der Begriff des Prozesses ist vielfältig in unterschiedlichen Fachgebieten anwendbar. Definiert wird er als „eine wiederholbare, zeitlich-logische (sequenzielle bzw. parallele) Abfolge von Aktivitäten, mit einem eindeutigen Anfang und Ende (als Ereignisse), zur zielgerichteten Erledigung einer betrieblichen Aufgabe“ (SEIDLMEIER 2015). Weiterhin erfolgt eine Transformation von Input in Output, wobei es sich dabei entweder um Materialien oder Informationen handelt.

Im Rahmen der durchzuführenden Prozessanalyse wird ein Teil des Geschäftsprozesses untersucht. Ein Geschäftsprozess dient dazu, die Ziele eines Unternehmens zu erreichen und erzeugt die Unternehmensleistungen mit wertschöpfenden Eigenschaften. Daher besitzt er zumeist eine strategische und erfolgsentscheidende Bedeutung (SEIDLMEIER 2015). Bei einem Fertigungsprozess handelt es sich um eine Folge von Aktivitäten, die Einsatzstoffe durch die Verwendung von entsprechenden Ressourcen in materielle Ausbringungen transformiert (HACHTEL & HOLZBAUR 2010).

#### **2.3.2 Grundlagen der Architektur Integrierter Informationssysteme**

Da die Modellierung des aufzunehmenden Prozesses mit ARIS vorgenommen wird, behandelt dieses Kapitel die Grundlagen von ARIS. Die Abkürzung ARIS steht für die „Architektur Integrierter Informationssysteme“. Das ARIS-Konzept wurde zunächst theoretisch an der Universität Saarbrücken entwickelt und im Jahr 1991 von der IDS Prof.

Scheer GmbH veröffentlicht (SCHEER 1998b). Im Jahr 2010 wurde die IDS Prof. Scheer GmbH von der Software AG übernommen und ARIS wird dort weiterentwickelt. Eine Architektur ist im Sinne des ARIS-Konzepts, wenn das „Modell für Unternehmensprozesse entwickelt wurde, das alle wesentlichen Merkmale zur Beschreibung von Kern-, Geschäfts-, Unterstützungs- und Führungsprozessen beinhaltet“ (SEIDLMEIER 2015). Daran lässt sich bereits erkennen, dass der Fokus dieses Konzeptes auf der Prozessorientierung von Unternehmen liegt und diese stärken soll. Weiterhin beschreibt ARIS nicht nur ein Konzept, sondern auch mehrere Software-Produkte, wie zum Beispiel ARIS Architect oder ARIS Express. Diese Systeme beruhen auf dem ARIS-Konzept und dienen als Hilfsmittel zur Umsetzung des Konzeptes, indem sie bestimmte Modellierungs-Tools bereitstellen. Zur Strukturierung und problembezogenen Beschreibung der Organisation und ihrer Prozesse beinhaltet das ARIS-Konzept verschiedene Beschreibungsebenen und -sichten. Die Beschreibungsebenen richten sich eher an die unterschiedlichen Phasen und Detaillierungsgrade innerhalb eines Projektes. Die Beschreibungssichten legen den Fokus auf verschiedene Betrachtungsgegenstände innerhalb einer Organisation. Die Zusammenführung der Beschreibungsebenen und -sichten stellt dem Anwender des ARIS-Konzeptes in den verschiedenen Anwendungsfällen die jeweiligen Methoden und Tools zur Verfügung und ist im sogenannten ARIS-Haus dargestellt (siehe Abbildung 5).

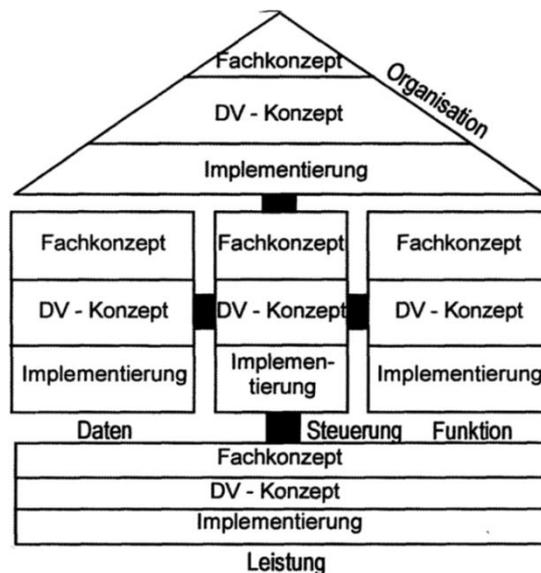


Abbildung 5: ARIS-Haus aus (SCHEER 1998a)

Im Rahmen eines Organisationsprojektes werden mehrere Phasen und Detaillierungsstufen durchlaufen. Diese haben zu Beginn einen sehr konzeptuellen Charakter und werden bis zur Phase der Umsetzung detaillierter. In Anlehnung an diese verschiede-

nen Phasen existieren in ARIS unterschiedliche Beschreibungsebenen, die sich inhaltlich an diese Phasen anpassen (SEIDLMEIER 2015).

Der Ausgangspunkt eines Projektes ist zumeist in Unternehmen eine betriebswirtschaftliche Problemstellung, die gelöst werden soll. Um diese Ausgangssituation zu erfassen, ist es notwendig den Ist-Zustand inklusive Schwachstellen zu beschreiben. Außerdem müssen die unternehmerischen Vorstellungen der Ziele und Lösungsansätze festgehalten werden, um das Projekt darauf auszurichten. Diese Beschreibung ist noch nicht formal und unterliegt keinen speziellen Regeln.

Anschließend folgt die Beschreibungsebene des Fachkonzepts. Im Gegensatz zur vorher durchlaufenen Phase gilt es hier eine formale Beschreibung zu erarbeiten. Dafür werden sowohl die Ist- als auch die Soll-Situation mithilfe von Modellen beschrieben. Die später noch erläuterten einzelnen Beschreibungssichten werden im Fachkonzept unabhängig voneinander modelliert und gemäß der Abbildung im ARIS-Haus in der Steuerungssicht integriert.

Das darauf folgende Datenverarbeitungs(DV)-Konzept umfasst die Überführung der Inhalte des zuvor erarbeiteten Fachkonzepts in eine für die Datenverarbeitung verständliche Form. Die bisher organisatorisch beschriebenen Informationen werden daher in die Sprache der Informationstechnik übertragen, wobei dies noch in einer von der Implementierung unabhängigen Form geschieht (GADATSCH 2001).

Abschließend werden bei der Implementierung die Inhalte des Fach- und DV-Konzepts konkret und computerunterstützt durch Komponenten aus Hard- und Software realisiert. Die Zusammenhänge der einzelnen Beschreibungsebenen sind in der Abbildung 6 dargestellt. (SEIDLMEIER 2015), (GADATSCH 2001)

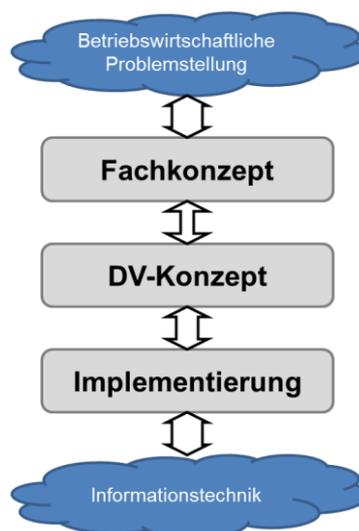


Abbildung 6: Phasen der ARIS-Modellierung nach (SCHEER 1997)

Zusätzlich zu den soeben erläuterten Beschreibungsebenen existieren noch fünf Beschreibungssichten. Innerhalb dieser werden die unterschiedlichen Objekttypen abgebildet. Bei den fünf Sichten handelt es sich um die Organisationssicht, die Datensicht, die Funktionssicht, die Leistungssicht und die Steuerungssicht. Alle Sichten werden innerhalb des ARIS-Konzeptes unabhängig voneinander erstellt und folgend näher erläutert. (SEIDLMEIER 2015)

### **Organisationssicht**

In der Organisationssicht des ARIS-Konzepts geht es um die Darstellung der Hierarchisierung und der Aufbauorganisation. Eine Organisation ist dabei so zu verstehen, dass sie „die zur Zielerreichung notwendige Aufgabenverteilung sowie Aufgabenbearbeitung“ regelt und „notwendige Kompetenzen und Ressourcen“ festlegt (SEIDLMEIER 2015). Typische Elemente dieser Sicht sind Organisationseinheiten, Stellen und Inhaber dieser Stellen. Ein Bezug zur Funktionssicht besteht darin, dass die Organisationseinheiten oder Stellen Funktionen bearbeiten. Eine klassische Modellierungsmethode dieser Sicht ist das Organigramm, in dem die verschiedenen Organisationseinheiten und Rollen hierarchisch abgebildet werden (GADATSCH 2001).

### **Funktionssicht**

Im Rahmen der Funktionssicht werden die Aktivitäten innerhalb einer Organisation strukturiert dargestellt. Eine beispielhafte Modellierungsform ist in diesem Fall die Darstellung mit Funktionsbäumen. Die ermittelten betriebswirtschaftlichen Funktionen werden mit ihren bestehenden Beziehungen beschrieben und auf verschiedenen Aggregationsstufen abgebildet. (GADATSCH 2001)

### **Datensicht**

Die Datensicht umfasst die Abbildung der logischen Datenstruktur für den jeweiligen Anwendungsfall (SEIDLMEIER 2015). Dabei werden sowohl die relevanten Informationsobjekte in Form von Entitäten und Attributen als auch deren Beziehungen zueinander modelliert (GADATSCH 2001). Aus diesem Grund sind Entity-Relationship-Modelle (ERM) eine häufig verwendete Modellierungsart dieser Beschreibungssicht. Eine besonders hohe Relevanz besitzt die Modellierung dieser Sicht bei der Konzeption von datenbankgestützten Systemen.

### **Leistungssicht**

Die Leistungssicht beschreibt die unterschiedlichen Produkte und Leistungen, die innerhalb einer Organisation oder eines Unternehmens erzeugt werden. Es besteht die Möglichkeit, dass diese entweder einen materiellen oder einen immateriellen Charakter besitzen. Zusätzlich werden auch Geldflüsse betrachtet. Zur Abbildung dieser Beschreibungssicht in einem Modell dient hauptsächlich das Produktmodell. (GADATSCH 2001)

### **Steuerungssicht**

Die Aufgabe der Steuerungssicht ist es, die vier zuvor beschriebenen Sichten zu integrieren und deren Zusammenhänge innerhalb einer Sicht abzubilden. Dadurch wird eine ganzheitliche Darstellung der im Unternehmen vorhandenen Geschäftsprozesse ermöglicht (SEIDLMEIER 2015). Dabei steht die ablauforganisatorische Beschreibung der Prozesse ganz klar im Fokus. Zur Modellierung der Steuerungssicht hat sich die Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) etabliert. Diese wird im folgenden Kapitel detaillierter erklärt.

#### **2.3.3 Die (erweiterte) Ereignisgesteuerte Prozesskette (e)EPK**

Die Ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK) ist eine Modellierungssprache mit der eine logische Abfolge von aufeinanderfolgenden Ereignissen und Funktionen abgebildet wird (SEIDLMEIER 2015). Am Beginn und am Ende einer EPK stehen ein oder mehrere Ereignisse. Zwischen diesen wird der abgebildete Ablauf durch Ereignisse gesteuert. Diese Ereignisse sind „ablaufrelevante Umweltzustände“ und dienen als Auslöser für Funktionen, die wiederum Ereignisse als Ergebnis einer Funktion erzeugen (BECKER et al. 2009). Grundsätzlich wird bei einer EPK zwischen der „klassischen“ EPK und der erweiterten Ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) unterschieden. Eine EPK besteht lediglich aus den Grundelementen Funktion und Ereignis sowie den Verknüpfungsope-  
ratoren und den verbindenden Kanten in Form von Kontrollflüssen. Die erweiterte EPK bietet durch die Ergänzung der Grundelemente um Objekte aus der Daten- und Organisationssicht eine höhere Aussagekraft, die zur Verständlichkeit des Prozesses beiträgt. Durch diese Erweiterung lassen sich Input- und Output-Objekte, Anwendungssysteme und zuständige Organisationseinheiten wesentlich besser abbilden (SEIDLMEIER 2015). Im Rahmen dieser Arbeit wird aus diesem Grund die erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette verwendet. In der folgenden Tabelle 1 werden die einzelnen Objekte und deren Notation erläutert.

Symbol inkl. Bezeichnung	Bedeutung
 <p>Ereignis</p>	Beschreibung eines eingetretenen Zustandes, von dem der weitere Verlauf des Prozesses abhängt
 <p>Funktion</p>	Beschreibung der Transformation von einem Inputzustand zu einem Outputzustand
 <p>"exklusives oder" "oder" "und" Logische Operatoren</p>	Logische Verknüpfungsoperatoren beschreiben die logische Verknüpfung von Ereignissen und Funktionen
 <p>Organisations-einheit</p>	Beschreibung der Gliederungsstruktur eines Unternehmens
 <p>Dokument Datenbank Produkt IT-System Informationsobjekt</p>	Abbildung von Dokumenten, Datenbanken, Produkten und IT-Systemen
 <p>Prozessschnittstelle</p>	Horizontale und vertikale Prozessverknüpfung

Tabelle 1: Notationselemente einer eEPK in ARIS Express nach (GADATSCH 2008)

Sowohl die EPK als auch die eEPK bestehen aus einer abwechselnden Folge von Ereignissen und Funktionen. Ereignisse werden dabei als Sechseck dargestellt und beschreiben einen eingetretenen Zustand im Laufe eines Prozesses. Sie sind somit passive Elemente und beziehen sich auf einen Zeitpunkt (BECKER et al. 2009). Funktionen stellen hingegen eine aktive Komponente in einem Prozess dar. Sie werden als Viereck mit abgerundeten Ecken dargestellt und beschreiben die Transformation von Input zu Output bezogen auf einen Zeitraum. Ereignisse werden durch Kontrollflüsse verbunden, die die Kanten zwischen den beiden Elementen darstellen und den zeitlich-logischen Zusammenhang herstellen (GADATSCH 2008). Außerdem stehen logische

Konnektoren zur Verfügung. Dabei können das logische „UND“, das logische „ODER“ und das logische „XOR“ (Exklusives Oder) innerhalb des Prozesses abgebildet werden und Verzweigungen darstellen. Weiterhin existiert zur Modellierung von Teilprozessen das Element des Prozesswegweisers. Dieser bietet die Möglichkeit einen Prozess in mehrere Prozesse aufzuteilen und diese Teilmodelle wieder zu verknüpfen. Somit lässt sich sowohl eine Detaillierung eines Prozessschrittes als auch eine horizontale Verbindung mit einem anderen Teilprozess herstellen.

Zusätzlich zu diesen Elementen der EPK ist die erweiterte EPK um Elemente aus der Daten- und Organisationssicht ergänzt. Durch die Modellierung von organisatorischen Einheiten besteht die Möglichkeit, die organisatorischen Zuständigkeiten einer Funktion darzustellen. Ein Bezug zum Datenmodell wird mit dem Modellieren von Informationsobjekten und dessen Anwendung an der jeweiligen Stelle im Prozess hergestellt.

### **2.3.4 Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung (GoM)**

In Anlehnung an (BECKER 1998) bezeichnen die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung einen methodischen Ordnungsrahmen, der den Modellierer bei der Erstellung eines Modelles unterstützt. Diese Grundsätze sind somit als Werkzeug und Gestaltungsempfehlungen zu verstehen. Genau an den Stellen, wo die formalen Regeln einer Modellierungssprache an ihre Grenzen kommen, setzen die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung an. Die Anwendung dieser Grundsätze bietet die Möglichkeit, eine höhere Vergleichbarkeit von verschiedenen Modellen zu erreichen, die Qualität der erstellten Modelle zu erhöhen und eine Effizienzsteigerung bei der Modellierung zu realisieren (BECKER 1998). Gerade bei der kollaborativen Modellerstellung durch mehrere, unabhängig voneinander arbeitende Modellierer sorgen die Grundsätze für eine einheitlichere Modellierung. Es existieren sechs verschiedene Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung, die untereinander auch gewisse Abhängigkeiten aufweisen: der Grundsatz der Richtigkeit, der Grundsatz der Relevanz, der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit, der Grundsatz der Klarheit, der Grundsatz der Vergleichbarkeit und der Grundsatz des systematischen Aufbaus. Weiterhin sind diese, wie in Abbildung 7 dargestellt, in notwendige und ergänzende aufgeteilt (BECKER et al. 2009). Es folgt eine nähere Beschreibung der Inhalte der zuvor genannten Grundsätze.

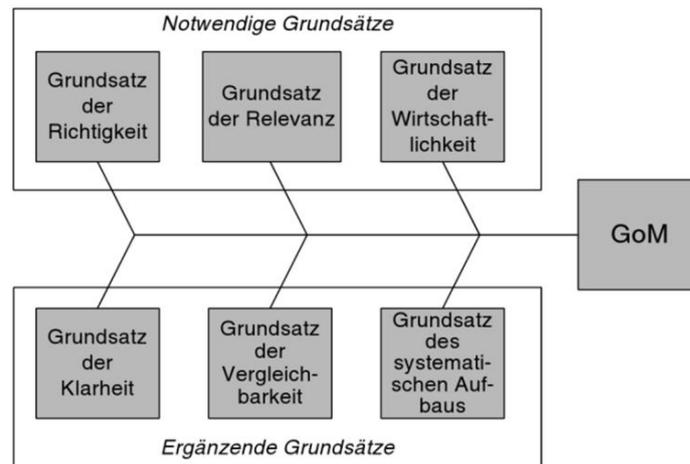


Abbildung 7: Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung aus (BECKER et al. 2009)

### Grundsatz der Richtigkeit

Der Grundsatz der Richtigkeit sagt aus, dass der gewählte Ausschnitt der realen Welt und die Abbildung dessen im Modell einer größtmöglichen Übereinstimmung unterliegen (BECKER 1998). Die Überprüfung dieses Grundsatzes erweist sich jedoch als schwierig, da der Vorgang der Modellierung stets ein subjektiver Vorgang ist, der sich nicht formalisieren lässt. Lediglich die Überprüfung durch den Ersteller und den Benutzer des Modells und deren Bestätigung der Richtigkeit gibt einen annähernden Aufschluss über die richtige Semantik des Modells. Zusätzlich zu diesem Ansatz der semantischen Richtigkeit gilt es die syntaktische Richtigkeit zu gewährleisten. Diese ist vorhanden, wenn die jeweiligen Regeln und Konventionen einer Modellierungssprache eingehalten wurden (BECKER et al. 2009). Das lässt sich durch eine Konsistenzprüfung mithilfe eines Metamodells prüfen (BECKER 1998).

### Grundsatz der Relevanz

In einem Modell lässt sich nicht die komplette reale Welt abbilden. Der Grundsatz der Relevanz besagt, dass nur die Inhalte der Realwelt vollständig im Modell abgebildet werden, die für die vorgegebenen Zwecke relevant sind (BECKER 1998). Daher gilt es vor der Modellierung die Ziele und Zwecke des Modells und dessen Zielgruppe zu ermitteln. Anhand dessen lassen sich der Abstraktionsgrad und die relevanten Inhalte ableiten. Die nicht relevanten Inhalte werden herausgefiltert. Der Grundsatz der Relevanz lässt sich aus zwei Perspektiven betrachten: aus Sicht der „externen Minimalität“ und der „internen Minimalität“ (BECKER et al. 2009). Die externe Minimalität beschreibt dabei, dass alle Inhalte, die in der realen Welt dem Modellierungszweck dienen auch

im Modell enthalten sind. Hingegen bezeichnet die interne Minimalität den Umstand, dass im Modell nur Elemente vorhanden sind, die dementsprechend ebenso in der realen Welt existieren.

### **Grundsatz der Wirtschaftlichkeit**

Der Grundsatz der Wirtschaftlichkeit wird von (BECKER 1998) so beschrieben, „dass immer dann ein optimaler Detaillierungsgrad der Modelle gefunden ist, wenn die Grenzkosten einer weiteren Informationsmodellierung gerade dem Grenznutzen einer weiteren Detaillierung entsprechen“. Das bedeutet, dass der Detaillierungsgrad bei der Modellierung gerade so hoch gewählt werden sollte, dass dessen Umsetzung im Modell noch einen Nutzen für den gegebenen Zweck ergibt. Je höher der Detaillierungsgrad, umso höher die Wahrscheinlichkeit von späteren Änderungen im Prozess und somit auch eines Anpassungsaufwandes. Gerade im unternehmerischen Sinne gilt es hier eine möglichst wirtschaftliche Lösung zu finden. Dazu zählt zum Beispiel die Auswahl der Modellierungssprache, die am besten bei Modellersteller und –nutzer bekannt ist, womit der Einarbeitungsaufwand minimiert wird (BECKER et al. 2009). Weiterhin hilft auch die Verwendung von Referenzmodellen für den jeweiligen Anwendungsbereich, um den Aufwand niedrig zu halten (BECKER 1998).

### **Grundsatz der Klarheit**

Beim Grundsatz der Klarheit geht es darum, die Lesbarkeit, die Verständlichkeit und die Anschaulichkeit von Modellen bestmöglich zu gestalten (BECKER et al. 2009). Dabei gilt die Maxime „so einfach wie möglich und so kompliziert wie nötig“ (BECKER 1998). Beispielsweise umfasst dieser Grundsatz, dass die Anzahl der sich kreuzenden Kanten innerhalb eines Modelles möglichst gering ist oder dass Teilprozesse verständlich aufgegliedert werden. Weiterhin kann die Einführung neuer Operatoren, die für eine bessere Übersicht sorgen, sinnvoll sein (BECKER 1998).

### **Grundsatz der Vergleichbarkeit**

Die Zielstellung des Grundsatzes der Vergleichbarkeit ist es, zwei Modelle, die die gleichen Inhalte abbilden, aber mit unterschiedlichen Modellierungsmethoden erstellt wurden, vergleichbar zu gestalten. Diese Situation ermöglicht die Überführung eines Modells in ein zweites Modell mit einer anderen Modellierungssprache, somit beispielsweise von einer Ereignisgesteuerten Prozesskette in ein Petrinetz. Teilweise existieren bereits Software-Tools, die diese Aufgabe durchführen. (BECKER 1998)

## Grundsatz des systematischen Aufbaus

Der Grundsatz des systematischen Aufbaus sagt aus, dass die Konsistenz zwischen den modellierten Beschreibungssichten vorhanden ist (BECKER 1998). Wenn also beispielsweise ein Umfang an Daten oder eine Organisationseinheit innerhalb der Steuerungssicht von ARIS in einer EPK modelliert wird, dann müssen diese Objekte auch innerhalb der Daten- oder Organisationssicht abgebildet sein. Außerdem wird ein struktureller Zusammenhang zwischen den verschiedenen Teilmodellen und deren Elementen vorausgesetzt (BECKER et al. 2009). Hilfreich für die Anwendung dieses Grundsatzes ist ein „übergreifendes Architekturkonzept“, wie zum Beispiel ARIS (BECKER 1998).

## 2.4 Wissensbasierte Systeme

### 2.4.1 Grundlagen wissensbasierter Systeme

Um zu erläutern, was wissensbasierte Systeme charakterisiert, ist es notwendig eine Definition für Wissen zu erlangen. Eine mögliche Herleitung des Begriffes wird anhand der Abbildung 8 von (REHÄUSER & KRCMAR 1996) und (PROBST 2006) gegeben. In dieser ist erkennbar, dass auf der untersten Beschreibungsebene die Zeichen als elementarer Bestandteil stehen. Wenn die Zeichen in einer syntaktischen Ordnung sind, werden sie als Daten bezeichnet. Diese repräsentieren bereits etwas Wahrnehmbares. Eine Stufe darüber steht die Information. Sie ergänzt die Daten um einen bestimmten Kontext, sodass die Daten in diesem Moment eine Bedeutung erhalten. Wenn nun im nächsten Anreicherungsschritt die Informationen miteinander vernetzt werden, der Informationsträger diese versteht und daraus Handlungen zur Problemlösung ableiten kann, handelt es sich um Wissen. (PROBST 2006)

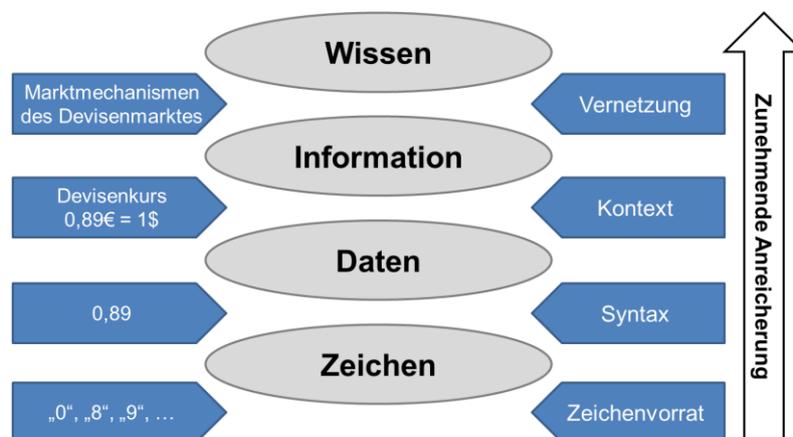


Abbildung 8: Abgrenzung ausgewählter Begrifflichkeiten des Wissensmanagements nach (REHÄUSER & KRCMAR 1996; PROBST 2006)

Dieses vorhandene Wissen kann mithilfe informationstechnischer Systeme in Form von wissensbasierten Systemen oder Expertensystemen beschrieben und verarbeitet werden. Wissensbasierte Systeme trennen strikt zwischen der Wissensbasis und drei darauf aufbauenden Komponenten. Konkret handelt es sich dabei um die Erklärungs-, die Problemlösungs- und die Wissenserwerbskomponente. Jede dieser Komponenten erfüllt ihren Zweck, nach dem sie benannt ist und arbeitet auf der Wissensbasis. Die Interaktion mit dem Benutzer erfolgt über die Dialogkomponente, die mit den anderen drei genannten Komponenten kommuniziert. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Vorgehensweise beruht auf der Grundlage, dass bekannt ist, auf welche Art und Weise ein Problem zu lösen ist. Dieses Wissen wird anhand von Regeln generiert. Durch die Anwendung der definierten Regeln auf die Wissensbasis wird eine Lösung ermittelt. (LÄMMEL & CLEVE 2008)

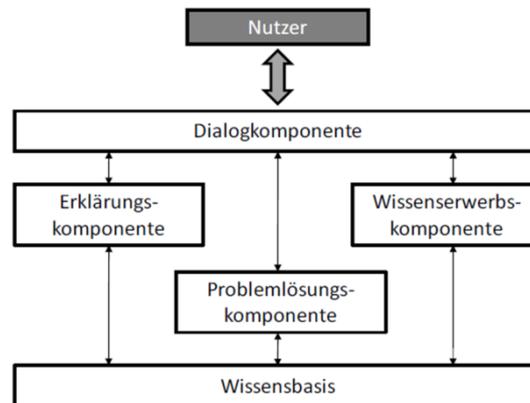


Abbildung 9: Beispielhafte Struktur eines wissensbasierten Expertensystems aus (LÄMMEL & CLEVE 2008)

### 2.4.2 Semantische Technologien und Ontologien

Für die Verwendung des in wissensbasierten Systemen vorhandenen Wissens werden semantische Technologien benutzt. Die Basis ist in dem Fall die Nutzung von semantischen Informationen, die in einem semantischen Netz gespeichert sind (GAAG 2009). Ein semantisches Netz wird definiert als ein Modell, das begriffliche Entitäten und deren Beziehungen zueinander umfasst und somit eine Art eines Wissensmodells darstellt (HAUN 2000). Um sich dem Begriff der Semantik weiter zu nähern, ist es sinnvoll einen kurzen Einblick in die Semiotik zu geben. Bei dieser handelt es sich um die Zeichenlehre. Sie befasst sich mit der Repräsentation von Zeichen und der Beziehungen zwischen dem Sender und dem Empfänger von Informationen (GAAG 2009). Die begriffliche Einordnung der Semantik ergibt sich aus dem semiotischen Dreieck nach (SCHOLES 1982). In diesem wird die Abgrenzung zwischen Zeichen, deren Bedeutung

und der Realität gegeben. Das semiotische Dreieck ist in Abbildung 10 dargestellt. Dort wird die Syntax als formale und strukturelle Beziehung zwischen den einzelnen Zeichen angegeben. Ein weiterer Teil des semiotischen Dreiecks ist die Pragmatik, die einen Zusammenhang zwischen einer Bezeichnung und einem realen Gegenstand erzeugt. Die dritte Komponente ist die Semantik, die wiederum die Bedeutung eines Begriffes in Bezug zur Realität setzt.

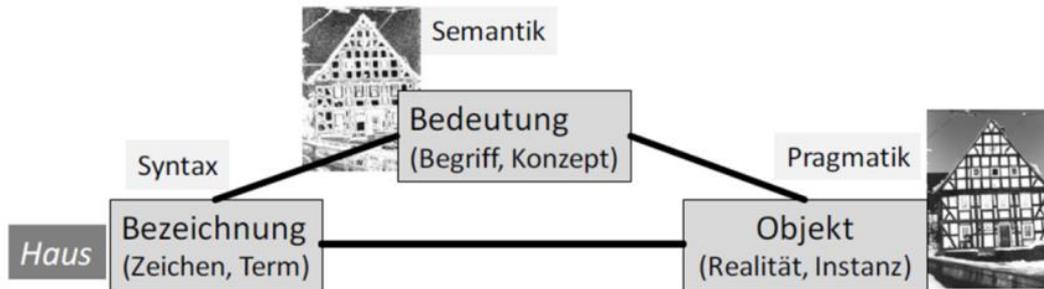


Abbildung 10: Semiotisches Dreieck aus (GAAG 2009)

Die verschiedenen Modelle zur Nutzung semantischer Technologien bieten einen unterschiedlichen Grad an semantischer Reichhaltigkeit. Die semantische Treppe nach (PELLEGRINI & BLUMAUER 2006) stellt genau diese Ordnung nach der semantischen Reichhaltigkeit dar und ist in Abbildung 11 angegeben. Die unterste Stufe bildet das Glossar, welches lediglich Begriffe zu einem bestimmten Thema sammelt. Darüber liegt die Taxonomie, die zusätzlich zur Sammlung der Begriffe eine Hierarchisierung dieser zur Verfügung stellt. Eine weitere Stufe darüber steht der Thesaurus, der zusätzlich eine Anreicherung von weiteren Informationen, wie beispielsweise Synonymen und Beschreibungen, anbietet. Wenn dazu die enthaltenen Begriffe noch strukturiert und bestimmten Themen zugeordnet sind, handelt es sich um Topic Maps, die auf der zweithöchsten Stufe der semantischen Treppe stehen. Mit ihnen ist es möglich ein besseres Suchverhalten von relevanten Dokumenten und Informationen für ein bestimmtes Themengebiet zu erhalten. Das semantisch reichhaltigste Modell ist die Ontologie. Diese ist nach (GRUBER 1995) wie folgt definiert: „An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization“. Dieser sehr abstrakt formulierte Satz wird folgend näher betrachtet. Bei einer Ontologie handelt es sich um eine Konzeptualisierung. Dies bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sie reale und im Rahmen der Anwendungsdomäne relevante Objekte innerhalb eines Konzeptes projiziert. Die gemeinsame Konzeptualisierung drückt hier aus, dass das Wissen als ein gemeinsames und nicht als ein subjektives Verständnis der realen Welt beschrieben wird. Weiterhin

ist definiert, dass diese Konzeptualisierung eindeutig und formal spezifiziert ist. Das bedeutet, dass die Ontologie an sich formal beschrieben ist und somit auch eine maschinenverwertbare Form der Beschreibung gewährleistet ist. (GAAG 2009)

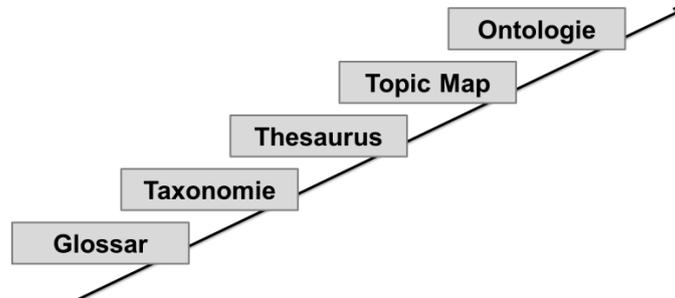


Abbildung 11: Semantische Treppe nach (PELLEGRINI & BLUMAUER 2006)

Der Einsatz von Ontologien hat das hauptsächliche Ziel, für ein bestimmtes Wissensgebiet ein Modell zu erzeugen. Außerdem ist durch die Formalisierung einer Ontologie das logische Schließen möglich. Dieses wird auch als Reasoning bezeichnet. Das bedeutet, dass innerhalb einer Ontologie durch das Schlussfolgern neue Zusammenhänge und neues Wissen erzeugt werden können (STUDER et al. 1998). Die Verwendungsbereiche für Ontologien liegen in vielen Feldern, wie zum Beispiel den Bereichen der Medizin, der Bioinformatik oder des Rechts. Ein weiteres Umfeld, in dem Ontologien eine hohe Relevanz haben, ist das Internet. Im Web besteht das Problem, dass große Mengen an Informationen und Daten vorhanden sind. Für einen Menschen ist es möglich die Bedeutung dieser Daten zu erfassen und miteinander in Beziehung zu setzen. Für eine Maschine ist dies ungleich schwieriger. Somit existiert die Problematik, dass sehr viele Informationen im Web vorhanden sind, jedoch nicht durch Maschinen ermittelbar. Weiterhin ist implizites Wissen gegeben, das jedoch nicht explizit zur Verfügung steht. Als Lösungsansatz dient dabei die semantische Suche. Für die Umsetzung existieren mehrere Ansätze. Zum einen ist es möglich Methoden der künstlichen Intelligenz anzuwenden, die für den Menschen erkennbare Informationen maschinenlesbar machen. Zum anderen können Informationen von Anfang an maschinenverwertbar bereitgestellt werden. Diesen zweiten Ansatz wählt das sogenannte Semantic Web. (HITZLER 2008)

Das World Wide Web Consortium (W3C) schafft auf diesem Gebiet des semantischen Webs die Standards. Zu den relevantesten gehören XML, RDF, RDFS und OWL. Der Zusammenhang dieser Konzepte ist in Abbildung 12 dargestellt. Im Folgenden werden diese näher erläutert, da sie auch für die Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Ontologie genutzt werden.

Der erste in diesem Zusammenhang wichtige Standard ist XML. Die eXtensible Markup Language dient als syntaktische Basis des Semantic Web. Sie bietet die Möglichkeit strukturierte Informationen in Form von Metadaten zu speichern und auszutauschen. Außerdem stellt sie auch für weitere Beschreibungssprachen wie RDF, RDFS und OWL, die folgend noch erläutert werden, die Grundlage in syntaktischer Form dar. XML-Dokumente sind mithilfe von XML-Tags in einer baumartigen Struktur gegliedert. (HITZLER 2008)

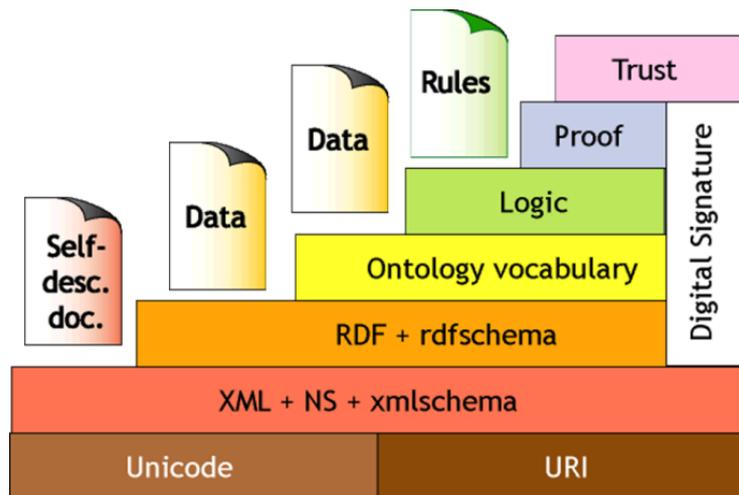


Abbildung 12: Ebenenkonzept der W3C-Standards auf dem Gebiet des semantischen Webs aus (BERNERS-LEE 2000)

Ein Format, das auf XML basiert ist RDF. Dieses steht für Resource Description Framework und ist eine formale Sprache, die Informationen in strukturierter Form beschreibt, um sie semantisch weiterverwenden zu können. Das Ziel ist dabei mithilfe von Metadaten den Austausch von Daten im Web zu ermöglichen ohne dass diese ihre Bedeutung verlieren. Rein strukturell betrachtet ist ein RDF-Dokument im Gegensatz zu XML-Dokumenten nicht baumartig, sondern in einer Graph-Struktur aufgebaut. Es besteht somit aus einer Menge von Knoten, die durch Kanten verbunden sind. Sowohl die Knoten als auch die Kanten besitzen einen eindeutigen Bezeichner in Form eines Uniform Resource Identifiers (URI). Die Strukturierung des Graphen erfolgt durch die Definition von Tripeln der Form „*Subjekt – Prädikat – Objekt*“. Die Subjekte und Objekte treten dabei in Form von Knoten auf, wohingegen die Kanten als Prädikate abgebildet werden. Ein Beispiel für ein solches Tripel ist „*Auto wird\_hergestellt\_von Automobilhersteller*“, welches in Abbildung 13 dargestellt ist. Durch diese Formulierung mit Tripeln ist es möglich allgemeine Relationen zwischen unterschiedlichen Ressourcen zu beschreiben. Wenn die Objekte explizite Datenwerte darstellen sollen, werden sie

als Literale eines bestimmten Datentyps bezeichnet. Weiterhin besteht die Möglichkeit mehrere RDF-Graphen zu einem größeren RDF-Graphen zu verbinden. (HITZLER 2008)

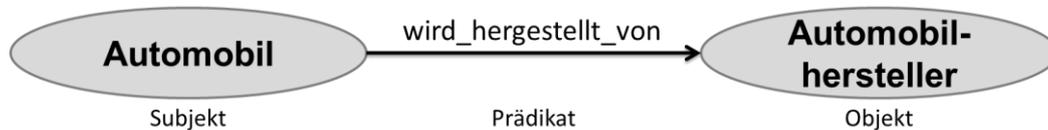


Abbildung 13: Beispiel eines RDF-Tripels (eigene Darstellung)

Eine Erweiterung von RDF ist das RDF Schema (RDFS). Die reine Beschreibungssprache RDF wird dabei um terminologisches Wissen ergänzt, welches die Formulierung von allgemeinen schematischen Informationen über Daten und somit die Kenntnis eines Systems über die Bedeutung der Beziehung zwischen verschiedenen Daten ermöglicht. RDFS stellt Ausdrucksmittel zur Verfügung, die universell nutzbar sind, um semantische Beziehungen zu definieren und daher eine Spezifikation von sogenanntem Schema-Wissen darstellt. Im Gegensatz zu RDF, mit dessen Hilfe Relationen zwischen konkreten Instanzen beschrieben werden, erfolgt mit RDFS die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Klassen- und Relationshierarchien. Diese Abgrenzung ist in Abbildung 14 dargestellt. Zunächst werden somit Klassen definiert und Klassenhierarchien durch die Bildung von Sub- und Super-Klassen erzeugt. Für die Instanzen, die in RDFS als Individuen bezeichnet werden, erfolgt anschließend eine Zuordnung zu den Klassen. Eine Klasse ist somit eine „Menge von Entitäten der realen Welt“ (HITZLER 2008). Die Modellierung der Relationen zwischen Ressourcen wird aus Sicht des RDF-Graphen in Form von Kanten durchgeführt. Diese Relationen werden in RDFS als Property bezeichnet. Eine Property wird definiert als die Aussage einer Beziehung zwischen zwei Klassen. Ebenso wie bei den Klassen ist es auch für Properties möglich hierarchische Strukturen abzubilden. Außerdem besteht die Möglichkeit sowohl den Definitions- als auch den Wertebereich einer Property zu definieren, um die zu verwendenden Klassen oder Datentypen der Subjekte und Objekte, die durch die jeweilige Property verbunden sind, einzuschränken. Aufgrund dieser Erweiterung wird RDFS auch als Ontologiesprache bezeichnet. Auch das Schlussfolgern von implizitem Wissen durch Inferenz ist möglich. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Sprachumfang begrenzt ist und somit nur leichtgewichtige Ontologien beschrieben werden können. Damit auch anspruchsvollere und komplexere Ontologien erzeugt werden können, kann auf die Sprache OWL zurückgegriffen werden. (HITZLER 2008)

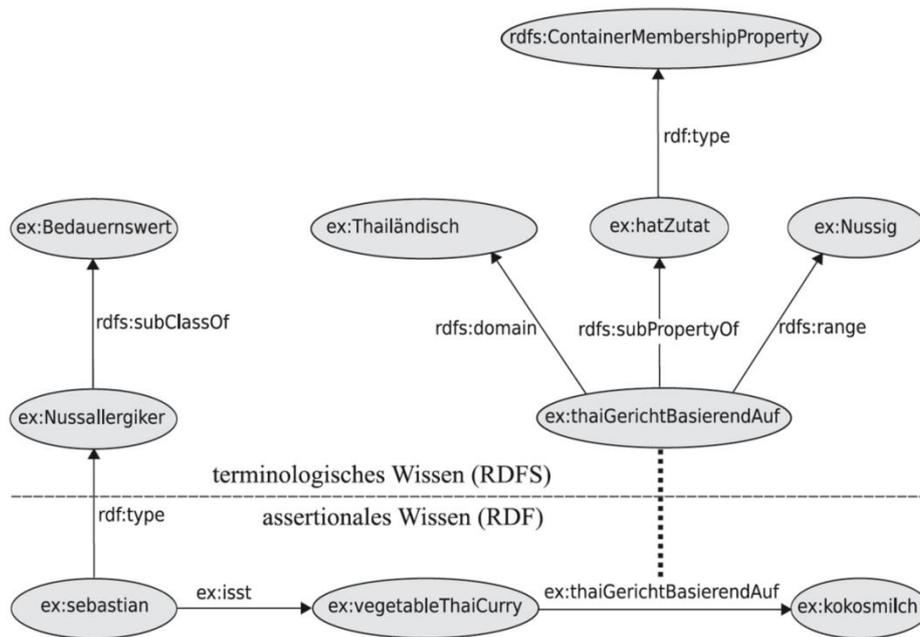


Abbildung 14: Abgrenzung von RDF und RDFS aus (HITZLER 2008)

OWL steht für Web Ontology Language und ist eine Ontologiesprache, die auf der Prädikatenlogik erster Stufe basiert. Im Februar 2004 wurde sie vom W3C zu einer standardisierten Ontologiesprache erklärt. Ontologien, die in OWL beschrieben sind, werden mit der OWL-RDF-Syntax in OWL-Dokumenten abgebildet. Die Benennung dieser Syntax legt schon nahe, dass die in OWL verwendbaren Konstrukte auf RDF und RDFS basieren, jedoch erweitert sind. Somit sind die Basis-Elemente, wie zum Beispiel Klassen, Properties und Individuen nutzbar. Zusätzlich dazu existieren noch Elemente, die im Gegensatz zu RDFS die Beschreibung von komplexen Zusammenhängen ermöglichen. Zunächst sind zwei vordefinierte Klassen vorhanden: Thing und Nothing. Die Klasse Thing enthält alles und die Klasse Nothing wiederum enthält nichts. Weiterhin ist es möglich in OWL logische Konstruktoren, wie die Konjunktion, Disjunktion, Negation oder Äquivalenz auf Klassen anzuwenden. In OWL existieren zwei Arten von Properties. Zum einen die Object Properties, die abstrakt Individuen über Klassen miteinander verbinden und zum anderen die Datatype Properties, die konkret Individuen mit spezifischen Datenwerten verbinden. Weiterhin ist es möglich Allquantoren oder Existenzquantoren auf Properties anzuwenden, um Beziehungen genauer zu beschreiben. Eine weitere Spezifizierung der Relationen ist durch die Angabe der Inversität, der Äquivalenz, der Reflexivität, der Symmetrie, der Transitivität und der Funktionalität ebenso möglich. Die Angabe von Kardinalitäten ermöglicht zudem mengenmäßige Restriktionen. Neben der detaillierten Beschreibung von Proper-

ties besteht auch die Möglichkeit, die Beziehungen zwischen Individuen zu spezifizieren, indem sie beispielsweise als gleich oder verschieden voneinander definiert werden. Bei der Modellierung von OWL-Ontologien ist zu beachten, dass die Open World Assumption (OWA) gilt. Diese Annahme der offenen Welt bedeutet, dass angenommen wird, dass die erzeugte Wissensbasis unvollständig ist. Die Festlegung dieser Annahme ist notwendig, weil ständig neues Wissen generiert wird. Die Tatsache, dass ein Fakt in einer Wissensbasis nicht existiert, lässt nicht darauf schließen, dass er allgemein nicht existiert, sondern lediglich, dass keine Kenntnis darüber besteht. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu Datenbanken, in denen von einer geschlossenen Welt ausgegangen wird. (HITZLER 2008)

Die OWL stellt je nach Ausdrucksstärke drei Teilsprachen zur Verfügung. OWL Full enthält den gesamten Sprachumfang von RDFS. Diese Teilsprache ist zwar sehr ausdrucksstark, jedoch unentscheidbar. Somit ist die Unterstützung durch Software-Tools sehr gering. Eine Ebene darunter liegt OWL DL. Dabei handelt es sich um eine echte Teilsprache von OWL Full. Diese ist hingegen entscheidbar. Auch die Unterstützung durch Software-Tools ist fast vollständig gegeben. Die Teilsprache von OWL mit dem geringsten Umfang ist OWL Lite. Diese wiederum ist eine echte Teilsprache von OWL DL und somit auch entscheidbar. Die Ausdrucksstärke ist jedoch gering. (HITZLER 2008)

Neben der Möglichkeit, Wissen in Ontologien zu beschreiben und durch Inferenz zu generieren, ist es ähnlich wie bei relationalen Datenbanken möglich, Anfragen an Wissensbasen zu stellen. Dabei ist auch die Filterung und Ausgabe-Formatierung möglich. Eine weit verbreitete Anfragesprache für RDF-Dokumente ist SPARQL. Diese Abkürzung steht für SPARQL Protocol and RDF Query Language und ist seit 2008 vom W3C als Standard beschrieben. Angefragt wird dabei in Form von Graph-Mustern durch Subjekt-Prädikat-Objekt-Tripel und Variablen. (HITZLER 2008)

### 3 Der Fertigungsplanungsprozess im Karosseriebau

Im folgenden Kapitel wird der Prozess für den Bereich der Fertigungsplanung im Karosseriebau bei der Marke Volkswagen PKW untersucht. Die Vorgehensweise ist dabei an die Hauptuntersuchung im Rahmen eines Organisationsprojektes angelehnt (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSSAMT 2015) und in Abbildung 15 dargestellt. Zuerst wird der aktuelle Prozess in der IST-Situation durch eine Expertenbefragung aufgenommen. Daraufhin wird der erhobene Ist-Prozess analysiert und es ergeben sich unterschiedliche Schwachstellen darin, woraus Handlungsfelder definiert werden. Anschließend wird ein möglicher SOLL-Prozess konzipiert, der die zuvor ermittelten Handlungsfelder aufgreift und optimiert. Die Vorgehensweise orientiert sich an der kontinuierlichen Verbesserung. Das Ziel ist somit nicht eine vollständige Neugestaltung des Prozesses im Rahmen eines Business Process Reengineering.



Abbildung 15: Vorgehensweise Prozessanalyse (eigene Darstellung)

#### 3.1 Aufnahme des Ist-Prozesses

Die Untersuchung des Prozesses beginnt mit der Erfassung der Ist-Situation des aktuellen Prozesses, da im Rahmen der Analyse nicht die Methode des Business Process Reengineering, sondern eine Optimierung des vorhandenen Prozesses vorgenommen wird. Beim Business Process Reengineering wird bereits zu Beginn der Untersuchung der Soll-Prozess erarbeitet, ohne eine Ist-Aufnahme des vorhandenen Prozesses durchzuführen. Damit liegt der Fokus mehr auf dem Soll-Prozess und aktuelle Abläufe werden bewusst in den Hintergrund gestellt, um die Kreativität nicht zu behindern. Bei der im Rahmen dieser Arbeit erforderlichen Untersuchung steht jedoch auch das Aufzeigen von Schwachstellen im Fokus. Es ist nicht die Zielsetzung, einen komplett neuen Prozess zu entwerfen. Vielmehr geht es darum, den Überblick und das Verständnis für die aktuelle Situation zu gewinnen. Weiterhin ist es ein Ziel, den Prozess transparent zu machen, um die Schwachstellen klar aufzudecken und Handlungsbedarfe zu ermitteln. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Entwicklung eines Soll-Prozesses.

Damit der Ist-Prozess strukturiert aufgenommen wird, ist ein Vorgehensmodell erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf das Vorgehensmodell von (SCHNEIDER et al. 2008) zurückgegriffen, welches in den folgenden Kapiteln angewandt wird.

### 3.1.1 Vorgehensweise bei der Aufnahme des Ist-Prozesses

Das Vorgehensmodell von (SCHNEIDER et al. 2008) umfasst vier Phasen: die Vorbereitungsphase, die Eingrenzungsphase, die Erhebungs- und Modellierungsphase und die Konsolidierungsphase. Diese sind in der Abbildung 16 dargestellt.

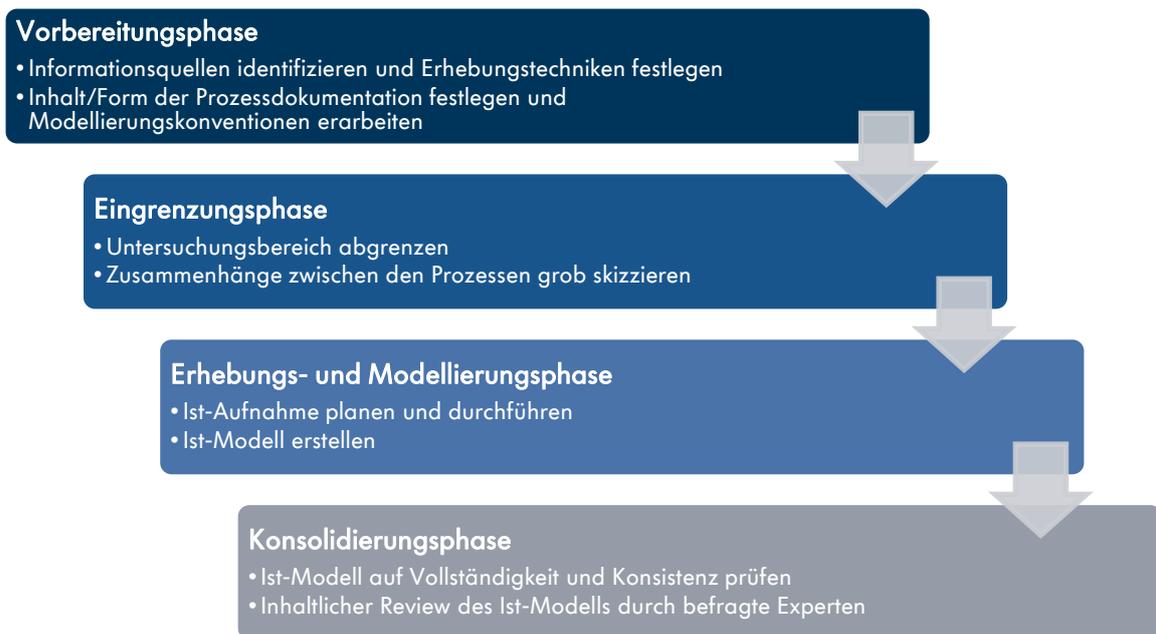


Abbildung 16: Vorgehensweise der Prozess-Ist-Aufnahme (eigene Darstellung)

In der ersten Phase der Vorbereitung geht es hauptsächlich darum, sich einen ersten Überblick zu verschaffen, die Form der Erhebung festzulegen und das weitere Vorgehen zu planen. Demzufolge werden zuerst die Informationsquellen identifiziert und die Techniken zur Prozess-Erhebung bestimmt. Weiterhin werden sowohl Inhalt als auch Form der Prozessdokumentation und somit auch die zugehörigen Modellierungskonventionen erarbeitet. Außerdem wird eine Prozesslandkarte erstellt, die einen groben Überblick über die Prozesslandschaft gibt und hilft den zu untersuchenden Prozess in den Gesamtprozess einzuordnen.

Daraufhin geht es in der zweiten Phase der Eingrenzung darum, den zu untersuchenden Bereich klar abzugrenzen und die Zusammenhänge zwischen den beteiligten Prozessen grob darzustellen. Auch hier dient die zuvor erstellte Prozesslandkarte als Hilfsmittel.

Die dritte Phase stellt den Kern des Vorgehensmodells dar. Hierbei wird der Prozess mit den zuvor festgelegten Methoden erhoben und modelliert. Demzufolge findet in dieser Phase sowohl die Planung als auch die Durchführung der Ist-Prozess-Aufnahme statt. Außerdem wird das Modell unter den zugrundeliegenden Konventionen erstellt.

Abschließend folgt die vierte Phase der Konsolidierung. Im Rahmen dieser Phase wird das zuvor erstellte Ist-Modell durch einen Methodenexperten auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Zusätzlich erfolgt eine inhaltliche Prüfung des Ist-Modells durch Reviews der befragten Experten. Daraufhin gilt das erstellte Ist-Modell als Basis für die weitere Analyse, um Schwachstellen zu ermitteln und einen Soll-Prozess herzuleiten.

### **3.1.2 Vorbereitung der Ist-Aufnahme**

Für die Dokumentation von Prozessen gibt es unterschiedliche Darstellungsformen. Dazu gehören unter anderem die textuelle, die graphische und die tabellarische Form. Bei der textuellen Dokumentation werden die Prozessabläufe detailliert in Form eines Textes beschrieben. Vorteilhaft ist hier der hohe Detaillierungsgrad der Beschreibung. Allerdings ist auf eine einheitliche Verwendung von Fachbegriffen zu achten. Da diese Dokumentationsform jedoch nicht auf den ersten Blick überschaubar ist, dient sie im Rahmen dieser Arbeit als Basis für die graphische Dokumentation. Diese Form ist wesentlich anschaulicher und übersichtlicher, da Abläufe, Verzweigungen und Wiederholungen besser darstellbar sind. In dieser Arbeit wird der Ist-Prozess mithilfe einer erweiterten Ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) modelliert. Diese ist Inhalt des Konzeptes der Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS) von August-Wilhelm Scheer (SCHEER 1998a) und besitzt somit eine einheitliche Notation, die im Kapitel 2.3.3 näher beschrieben ist. Die tabellarische Dokumentation beschreibt den Prozess klar strukturiert anhand einer zuvor definierten Tabellenstruktur. Sie gibt einen guten Überblick, jedoch lassen sich Verzweigungen und Schleifen nur schwierig abbilden. Deshalb wird auf die tabellarische Dokumentation des Ist-Prozesses verzichtet, da diese keinen wesentlichen Mehrwert gegenüber der textuellen und graphischen Dokumentation bietet.

Damit das Ist-Modell verständlich und übersichtlich ist, gilt es bestimmte Modellierungskonventionen einzuhalten. Dazu gehören zum einen die Konventionen, die im Rahmen von ARIS beschrieben sind. Zum anderen werden in dieser Arbeit die in Kapitel 2.3.4 erläuterten Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung zugrunde gelegt, um eine hohe Qualität bei der Modellierung zu gewährleisten.

Als Informationsquellen dienen Fachexperten und bestimmte Dokumente, in denen die Prozesse der Fertigungsplanung näher beschrieben sind. Diese Informationsquellen und die Prozessaufnahmemethode werden folgend erläutert.

Zur Herleitung des zurzeit gelebten Prozesses zur Planung einer Fertigungsanlage im Karosseriebau ist es sinnvoll die Mitarbeiter zu befragen, deren täglicher Arbeitsinhalt dieses Aufgabengebiet umfasst. Daher wird für die IST-Prozessanalyse eine Befragung in Form eines Interviews mit verschiedenen Anlagenplanern durchgeführt. Jedes Interview wird als freies Gespräch mit dem Gesprächspartner geführt, wobei ein zuvor ausgearbeiteter Fragenkatalog als Unterstützung dient, um zielgerichtet die Gesprächsstruktur zu steuern.

Insgesamt werden fünf Gesprächspartner befragt, um voneinander unabhängige Prozessbeschreibungen zu erhalten. Die Interviews werden mit Anlagenplanern aus verschiedenen Baugruppen und mit unterschiedlichem Projektbezug geführt. Die befragten Anlagenplaner sind in den Baugruppen Unterbau, Aufbau, Seitenteil und Anbauteile tätig. Im Bereich des Unterbaus wird die Planertätigkeit der Befragten noch aufgeteilt in Hauptlinien-Bereiche und Untergruppen-Bereiche. Außerdem plant ein Teil der Interviewpartner in aktiv laufenden Fahrzeugprojekten die Karosseriebauanlagen und der andere Teil plant ohne Projektbezug die standardisierten Fertigungsanlagen, die zur standardisierten Fertigungsplanung im Karosseriebau beitragen.

### **3.1.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches**

Der Fokus liegt ganz konkret auf dem Teilprozess der frühen Planungsphase. In diesem Planungsstadium sind die zur Planung einer Fertigungsanlage benötigten Projektprämissen bekannt und sowohl die Planung der Fertigungsabläufe und -prozessschritte als auch die Zu- und Anordnung der Betriebsmittel wird durchgeführt.

Organisatorisch ist der Prozess im Bereich der Planung der Marke Volkswagen PKW angeordnet. Er konzentriert sich dort auf die Hauptabteilung der Fertigungsplanung, die wiederum in die verschiedenen Gewerke, wie Presswerk, Karosseriebau und Logistik aufgeteilt ist. Im Speziellen wird der Teilprozess in der Karosseriebauplanung untersucht. Diese ist zum einen in die einzelnen Karosseriebau-Gewerke Unterbau, Aufbau, Seitenteil und Anbauteile aufgeteilt und zum anderen in die übergeordneten Unterabteilungen für das Konzept und die Projektleiter.

### 3.1.4 Erhebung und Modellierung des Ist-Prozesses

Im Rahmen dieses Kapitels wird der aktuelle Prozess, der im Bereich der Fertigungsplanung für den Karosseriebau gültig ist, mithilfe von Interviews mit den Anlagenplanern der verschiedenen Baugruppen, erarbeitet und beschrieben.

#### 3.1.4.1 Durchführung der Ist-Aufnahme

In der folgenden Tabelle 2 ist der Aufbau des Fragenkatalogs mit den zu den Fragenkategorien zugeordneten Fragenstellungen dargestellt.

<b>Kategorie 1: Notwendige Prämissen zur Planung einer Fertigungsanlage</b>	
<b>Frage 1</b>	Welchen Input erhalten Sie von wem zu welchem Zeitpunkt, um mit dem Planungsprozess beginnen zu können? Welche Daten werden zur Planung benötigt und welche werden auch zur Verfügung gestellt? a. Von der technischen Entwicklung b. Vom Management/Projektverantwortlichen c. Sonstige
<b>Frage 2</b>	Sind die Fügefolgen, die die Reihenfolge der Arbeitsschritte zur Fertigung einer Karosserie definieren, standardisiert vorgegeben oder selbst erarbeitet?
<b>Kategorie 2: Beschreibung des herzuleitenden Prozesses</b>	
<b>Frage 3</b>	In welche Planungsphasen lässt sich der Planungsprozess aufteilen?
<b>Frage 4</b>	Welche Schritte sind im Rahmen der Grobplanungsphase zur Erstellung eines ersten Betriebsmittel-Mengengerüsts für eine Fertigungsanlage notwendig? Welche Vorgehensweisen und Tools kommen dabei zum Einsatz?
<b>Kategorie 3: Unterschiede der Planungsansätze</b>	
<b>Frage 5</b>	Stellen Sie sich folgend beschriebene Szenarien vor. Wie ist die Vorgehensweise bei der Planung? a. Szenario 1: Fertigungsanlagen für ein komplett neues Fahrzeug an einem neuen Standort sollen geplant werden. b. Szenario 2: Fertigungsanlagen für ein Nachfolger-Fahrzeug an einem bestehenden Standort sollen geplant werden.
<b>Frage 6</b>	Welche Unterschiede gibt es bei der Planung einer Fertigungsanlage für einen Standard zur Planung einer Fertigungsanlage für ein spezifisches Fahrzeugprojekt?
<b>Frage 7</b>	Gibt es in der von Ihnen zu planenden Baugruppe spezielle Prozess- bzw. Planungsumfänge, die unterschiedlich zu den anderen Baugruppen sind?
<b>Kategorie 4: Analyse des herzuleitenden Prozesses</b>	
<b>Frage 8</b>	Welche Möglichkeiten der Modellierung eines Fertigungsprozesses gibt es?
<b>Frage 9</b>	Welche Schwachstellen existieren zurzeit aus Ihrer Sicht im Prozess? Gibt es Gründe dafür?

Tabelle 2: Fragebogen für die Expertenbefragung

Durch die Beantwortung dieser Fragen ergibt sich die Möglichkeit den Teilprozess zu beschreiben und gleichzeitig erste Analyseansätze der Befragten zu erfahren. An-

schließlich ist zusammenfassend die Beantwortung der Fragen aus den verschiedenen Interviews erläutert. Die gesamte Mitschrift der geführten Interviews befindet sich im Anhang A.

### **3.1.4.2 Ergebnisse der Expertenbefragung**

In der ersten Fragenkategorie geht es im Wesentlichen um die Zusammenführung der benötigten Prämissen für eine zu planende Fertigungsanlage. Dazu gehört mit höchster Priorität die Taktzeit, die sich anhand der geplanten Jahresproduktion und des Arbeitszeitmodelles am jeweiligen Standort ergibt. Die Taktzeit beschreibt die Zeit, die die Betriebsmittel zur Abarbeitung eines Prozessschrittes innerhalb eines Taktes Zeit haben. Weiterhin ergibt sich daraus die Ausbringung, die eine Fertigungsanlage pro Stunde zu leisten hat. Gemessen wird diese in der Einheit „Jobs per Hour“ (JPH). Außerdem hat auch die Fertigungstiefe einen Einfluss auf die zu planenden Fertigungsanlagen. Die Fertigungstiefe beschreibt den Anteil der selbst gefertigten Bauteile zu den zu beschaffenden Bauteilen für ein Fahrzeug. Die Einflüsse der Fertigungstiefe sind vor allem im Bereich der Logistik und der Flächenplanung relevant. Eine ähnliche Relevanz weist der Mechanisierungsgrad auf. Dieser beschreibt den Anteil der mechanisierten Fertigungsumfänge am gesamten Fertigungsumfang. Weiterhin beeinflussen auch standort- und hallenspezifische Prämissen die Planung. Dazu zählen zum Beispiel Restriktionen der Hallenhöhe, aber auch das Qualifizierungs- und Personalkostenniveau am jeweiligen Standort. Um die Prozesse der Materialanstellung und -zuführung in die Fertigungsanlage zu planen, ist auch ein Logistikkonzept erforderlich, das mit der Logistikplanung abzustimmen ist. Auch aus der Produktsicht gibt es Prämissen, die einen Einfluss auf die Planung einer Fertigungsanlage haben. Zum einen zählen dazu die verschiedenen Fahrzeugvarianten, die sich als Flexibilitätsfaktor in der geplanten Fertigungsanlage wiederfinden lassen und die Komplexität der Fertigung aus Prozess- und Steuerungssicht erhöhen. Zum anderen sind die Produktdaten und -eigenschaften ein wesentlicher Faktor, der bei der Planung beachtet wird. Dazu zählen beispielsweise Eigenschaften wie Materialien, Blechdicken, Geometrien und Verbindungsdaten. Wenn diese Daten noch nicht vollständig verfügbar sind, beginnt die Planung auf Basis eines ähnlichen Referenzproduktes, das bei den Produkteigenschaften in möglichst vielen Daten übereinstimmt.

Die Fügeverfahren und -folgen, die für ein zu planendes Produkt festzulegen sind, werden standardisiert vorgegeben. Sie sind für jedes Bauteil sowohl für die Anlagen-

als auch für die Produktplaner definiert. Bei einem Anpassungsbedarf besteht jedoch die Möglichkeit diesen Standard projektspezifisch an das Produkt anzupassen.

Die zweite Fragenkategorie dient dazu, den aktuellen Prozess zu erarbeiten und in den übergeordneten Fertigungsplanungsprozess einzuordnen. Sobald die notwendigen Prämissen zur Planung definiert sind und die ersten Produktdaten vorliegen, beginnt der herzuleitende Prozess. In der Theorie teilt sich dieser in die vier, in Abbildung 17 gezeigten, Phasen „Grobplanung vor Vergabe“, „Feinplanung vor Vergabe“, „Feinplanung und Konstruktion nach Vergabe“ und „Aufbau der Anlagen“ auf.



**Abbildung 17: Wertschöpfungskettendiagramm für den Fertigungsplanungsprozess (eigene Darstellung)**

Durch die Erarbeitung und Definition von Basisanlagen hat sich hauptsächlich der Prozess der Grobplanung vor Vergabe geändert. Basisanlagen sind standardisierte Referenzanlagen für ein festgelegtes Basis-Referenzprodukt und dienen dem Ziel der Standardisierung (KASPROWICZ et al. 2014). Sie stellen die für die Herstellung des Basisproduktes notwendigen Fertigungsprozesse und Ressourcen bereit. Dadurch, dass für bestimmte Projektprämissen Basisanlagen existieren, entfällt diese Phase der Grobplanung fast vollständig. Bevor Basisanlagen existierten, wurden die Fertigungsanlagen zum einen durch Referenzprojekte und zum anderen durch die sogenannte Parametrische Darstellung geplant. Letztere stellt die groben Abläufe der Fügeverfahren und der zugeordneten Betriebsmittel dar, die anhand des gegebenen Produktes herausgearbeitet wurden. Eine Erläuterung dieser Darstellungsform wird in Kapitel 4.5.3.9 gegeben. Anschließend folgte die detaillierte Planung des Anlagen-Layouts mit der Platzierung der Betriebsmittel. Anstelle dieser Grobplanungsphase tritt mittlerweile ein Prozess zur Auswahl der Basisanlage. Diese wird dann als erste Basislösung weiter verfolgt und in der Phase der Feinplanung vor Vergabe detailliert. Dadurch, dass die Basisanlagen bereits ein detailliert ausgeplantes Betriebsmittel-Mengengerüst mit den erforderlichen Fertigungsprozessen besitzen, beginnt damit bereits die Phase der Feinplanung. Außerdem umfasst die vorgelagerte Phase der Grobplanung das Aktuali-

sieren und Optimieren der vorhandenen Basisanlagen. In dieser frühen Projektphase besitzen die Produktdaten zudem meist einen niedrigen Reifegrad, sodass vorerst ein Standardprodukt als Referenz zur detaillierten Planung der Fertigungsanlagen festgelegt wird. Im Laufe des Projektes wird dieses kontinuierlich mit dem realen Produkt abgestimmt. Die detaillierte Feinplanung findet erst nach der Vergabe im Rahmen der Konstruktion durch den jeweiligen Anlagenlieferanten statt.

Bei der dritten Fragekategorie geht es darum, die Unterschiede der Planung einer Fertigungsanlage bei verschiedenen Szenarien herauszuarbeiten. Deshalb sollen sich die Interviewpartner zunächst zwei unterschiedliche Situationen vorstellen und ihre Vorgehensweise der Planung diesbezüglich erläutern.

Das erste Szenario umfasst die komplette Neu-Planung eines Fahrzeugs und der zugehörigen Fertigungsanlagen, wenn es noch kein Referenzprodukt gibt. Die notwendige Bedingung, um mit der Planung zu beginnen ist, dass die Produktdaten und -eigenschaften vollständig bekannt sind. Nur dadurch kann eine sinnvolle Planung gewährleistet werden. Daraufhin werden die notwendigen Fügefolgen und -prozesse grob bestimmt, um den Fertigungsfluss herzuleiten. Eine Fügefolge bezeichnet die Menge an Fügeoperationen, die zum Zusammenfügen eines Zusammenbauteils nötig sind. Sobald die Planung der Prozesse abgeschlossen ist, werden im Planungssystem IT-gestützt die konkreten Fertigungsanlagen inklusive Betriebsmittel-Mengengerüst geplant. Daraus ergibt sich ein Anlagen-Layout und die resultierenden Investitionen können aus dem Betriebsmittel-Mengengerüst ermittelt werden. Damit ist eine Basislösung erarbeitet, die wie auch im oben beschriebenen aktuellen Prozess weiter optimiert und an veränderte Produktdaten angepasst wird. Die Herleitung einer Fertigungsanlage erfolgt in diesem Szenario somit ausgehend von den Produktdaten hin zu den sich daraus ergebenden Fertigungsprozessschritten und letztendlich zu einem Betriebsmittel-Mengengerüst. Solch eine vollständige Neuplanung kommt allerdings aufgrund der vorhandenen Basisanlagen nicht mehr vor. Anstelle der Herleitung anhand von Produktdaten findet eine Referenzplanung mit den gegebenen Basisanlagen statt. Diese werden dann dementsprechend an das zu planende Produkt angepasst.

Das zweite Szenario beschreibt die Planung einer Fertigungsanlage für eine bereits bestehende Fertigungsanlage als Integrationsplanung. In diesem Fall findet lediglich eine Anpassungsplanung auf Basis des Nachfolgeproduktes statt. Diese Planung ist somit stark von der bereits bestehenden Anlagenstruktur abhängig.

Die Unterschiede bei der Planung einer Basisanlage und der Planung einer Fertigungsanlage für ein spezifisches Fahrzeugprojekt sind hingegen nicht sehr groß. In beiden Fällen basiert die Planung auf einem Referenzprodukt. Bei der Planung der Basisanlagen ist dieses ein definiertes und abgestimmtes Basisprodukt, das eine möglichst große Übereinstimmung zu vielen weiteren Fahrzeugen aufweist. Hingegen wird bei der Planung für ein spezifisches Fahrzeugprojekt die Basisanlage als erste Referenz hergenommen, wenn die Menge der abweichenden Prämissen nicht zu groß ist. Weiterhin lassen sich durch die Befragung der einzelnen Anlagenplaner aus den verschiedenen Baugruppen kaum Unterschiede in der Vorgehensweise der Planung einer Fertigungsanlage feststellen. Lediglich die sehr enge Zusammenarbeit in der Baugruppe der Anbauteile zwischen Anlagenplanern und den Produktplanern durch die Zusammenfassung innerhalb einer Organisationseinheit ist hervorzuheben. Dadurch werden die Kommunikationswege und somit auch Anpassungszyklen verkürzt. In den anderen Baugruppen ist jedoch ein höherer Grad der Konzeptgleichheit der einzelnen Bauteile und Module gegeben.

Die vierte Fragenkategorie gibt durch die Ermittlung der vom Anlagenplaner identifizierten Schwachstellen erste Hinweise auf Handlungsbedarfe innerhalb des Prozesses. Eine von allen Interviewpartnern erwähnte Schwachstelle ist die späte Bereitstellung konkreter Produktdaten durch die technische Entwicklung. Sowohl in der Phase der Grob- als auch der Feinplanung vor der Vergabe an den Lieferanten stehen meist keine oder nur grob nutzbare Produktdaten zur Verfügung, sodass auf ein bereits vorhandenes Referenzprodukt zurückgegriffen wird. Erst in den fortgeschrittenen Phasen des Planungsprozesses besitzen die Produktdaten eine gute Qualität, anhand der auch konkrete Planungen möglich sind. Lediglich im Bereich der Plattform lässt sich durch die Einführung des Modularen Querbaukastens (MQB) eine höhere Konzeptgleichheit und somit auch eine größere Planungssicherheit erreichen (VOLKSWAGEN AG KONZERN KOMMUNIKATION 2012). Ähnlich schwierig ist auch der Umgang mit Änderungen. Im Laufe eines Projektes treten produktseitig sehr viele Änderungen auf, die oftmals auch einen so großen Umfang besitzen, dass Änderungen an den Fertigungsanlagen nötig sind. Weiterhin ist ein Teil der geplanten Produkte derart verschieden, sodass bei gleichen Bauteilen oft eine geringe Ähnlichkeit und somit kaum ein Vorteil durch eine Konzeptähnlichkeit der Fertigungsanlagen entsteht. Weitere Optimierungspotentiale gehen dadurch verloren, dass der Fokus der Planung einer Fertigungsanlage weniger auf dem gegebenen Produkt, sondern eher auf der Optimierung der bereits bestehenden

Basis- und Referenzanlagen liegt. Dieses Vorgehen steht allerdings in einem Zusammenhang mit den spät bereitstehenden Produktdaten.

Abschließend sind im Rahmen der Befragung die aktuell verwendeten Methoden und Werkzeuge zur Modellierung eines Fertigungsprozesses ermittelt wurden. Bei der Herleitung des modellierten Prozesses bestehen keine Unterschiede, da diese immer erst im Nachhinein, wenn die Fertigungsanlage bereits vollständig geplant ist, angefertigt werden. Differenzen bestehen jedoch beim Abstraktionsgrad. Zunächst besteht die Möglichkeit den Fertigungsprozess sehr abstrakt mit einer Blockdarstellung zu beschreiben. Hierbei wird der grobe Ablauf der Prozessschritte mit den jeweils zugeführten Bauteilen abgebildet. Außerdem sind prozessbestimmende Parameter, wie Bearbeitungszeit oder zugeordnete Betriebsmittel aufgeführt, sodass diese Modellierungsart auch als „Parametrische Darstellung“ bezeichnet wird. Ähnlich, aber etwas detaillierter ist die Darstellung als PERT-Diagramm. Diese wird vollautomatisch mit dem IT-Planungssystem „Process Designer“ (SIEMENS TECNOMATIX 2015) erstellt. Die Modellierung wird somit im Gegensatz zur Parametrischen Darstellung nicht manuell vom Anlagenplaner, sondern vollautomatisch vom Planungssystem durchgeführt. Dort sind die Fertigungsprozesse mit Art, Zeit und Vorgänger-Nachfolger-Beziehung beschrieben.



**Abbildung 18: beispielhaftes zweidimensionales Layout mit Fertigungsfluss (VOLKSWAGEN AG PLANUNG MARKE VOLKSWAGEN 2015)**

Die detaillierteste Stufe der Modellierung eines Fertigungsprozesses ist die Darstellung eines zweidimensionalen Anlagenlayouts mit eingezeichneten Pfeilen, die den Materialfluss darstellen. In dieser Modellierungsform wird der Prozessablauf zwar sehr detailliert dargestellt, jedoch ist nicht auf einen Blick erkennbar, welcher Fügeprozess mit

welchen Betriebsmitteln durchgeführt wird. Um diese Informationen zu erkennen, ist es notwendig die zweidimensionalen Layouts richtig interpretieren zu können. Ein Beispiel dieser Darstellungsform ist in Abbildung 18 gegeben. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird im Kapitel 4.5 ein Ansatz zur Modellierung von Fertigungsprozessen erarbeitet.

### 3.1.4.3 Modellierung des Ist-Prozesses

Nachdem der Teilprozess mithilfe der Gesprächspartner hergeleitet ist, folgt die detaillierte Beschreibung. Die Abfolge der einzelnen Prozessschritte sowie der beteiligten Prozessteilnehmer und Dokumente sind den erweiterten ereignisgesteuerten Prozessketten (eEPK) in der Abbildung 19, Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 zu entnehmen.

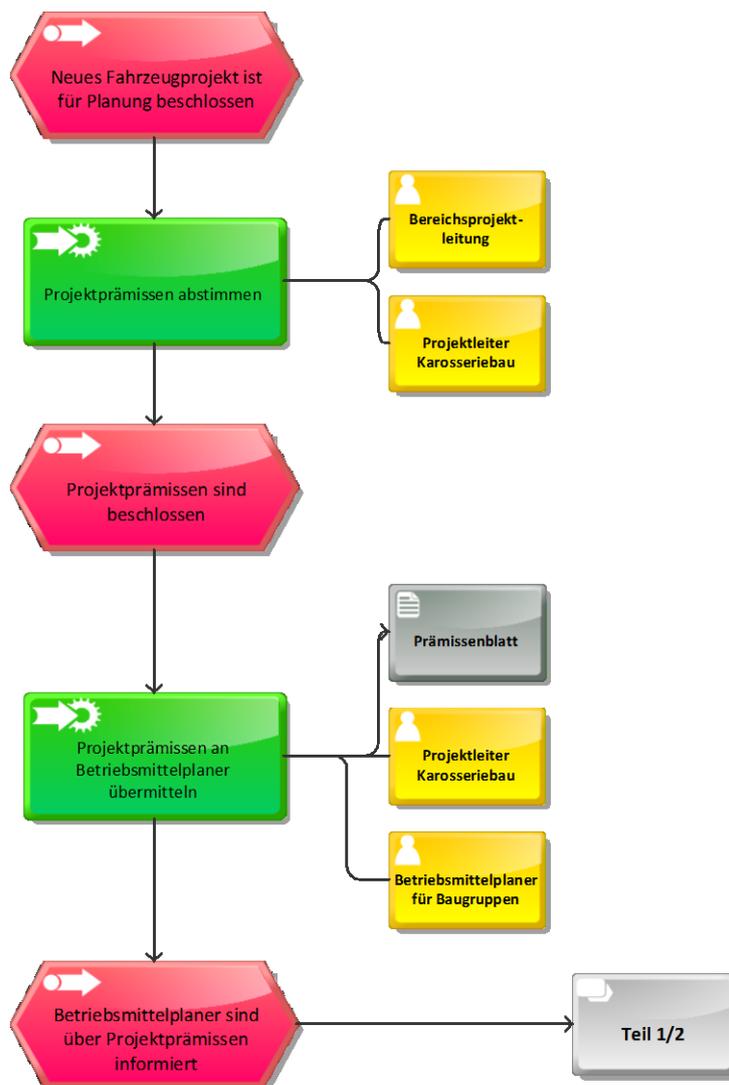


Abbildung 19: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 1 (eigene Darstellung)

Der Prozess beginnt mit dem Beschluss der Planung von Fertigungsanlagen im Karosseriebau für ein neues Fahrzeugprojekt. Daraufhin stimmen die Bereichsprojektleitung und der Projektleiter im Karosseriebau die oben beschriebenen Projektprämissen ab und beschließen diese. In einem Projekt-Kickoff-Gespräch werden diese mithilfe eines Prämissenblattes durch die Projektleiter im Karosseriebau an die einzelnen Betriebsmittelplaner der Baugruppen kommuniziert.

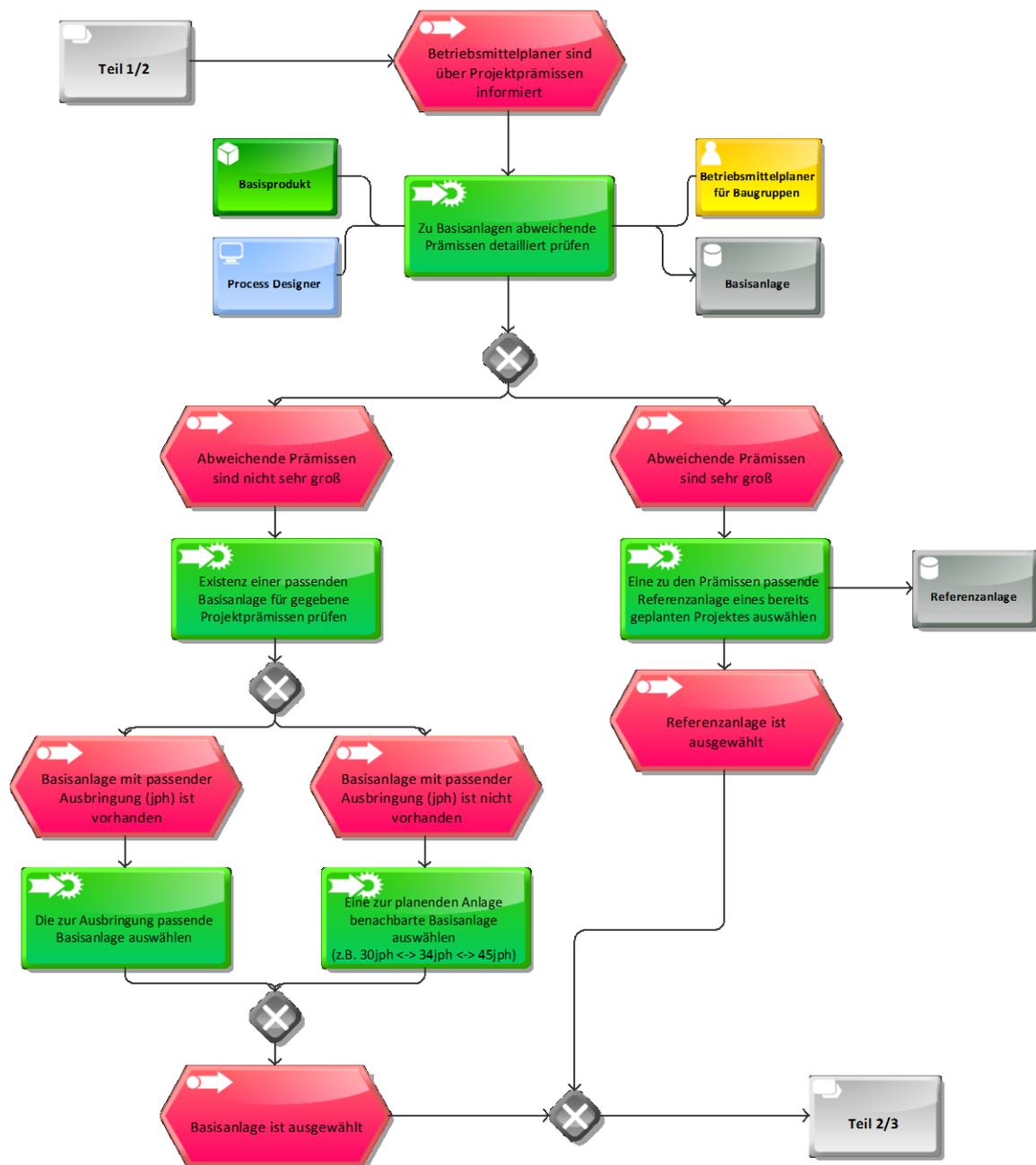


Abbildung 20: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 2 (eigene Darstellung)

Jeder Planer prüft daraufhin die Abweichungen der vorhandenen Basisanlagen bezüglich der gegebenen Prämissen. Als Hilfsmittel dient ihm dabei das IT-Planungssystem „Process Designer“ (SIEMENS TECNOMATIX 2015), in dem sowohl die Daten des Basisproduktes als auch der Basisanlage hinterlegt sind. Außerdem analysiert der Planer die Produktzeichnung und –struktur, um die erforderlichen Fügeverfahren und zu fertigen Baugruppen anhand einer Übersicht mit den zu fertigen und zu beschaffenden Bauteilen zu ermitteln. Abhängig von dem Umfang der abweichenden Prämissen findet die Auswahl der zu wählenden Referenz als Basislösung statt. Inwiefern die Menge der abweichenden Prämissen als nicht sehr groß oder sehr groß bezeichnet wird, liegt im Ermessen des jeweiligen Planers und ist nicht messbar definiert. Wenn der Umfang der abweichenden Prämissen sehr groß ist, wird eine Fertigungsanlage eines bereits geplanten Projektes, das mit der Mehrheit der gegebenen Projektprämissen übereinstimmt, als Referenz hergenommen und dient als Basislösung. Ist der Umfang der abweichenden Prämissen jedoch nicht sehr groß, gilt es anschließend die Existenz einer passenden Basisanlage für die gegebenen Projektprämissen zu prüfen. Sollte die stundenweise Ausbringung (JPH) der zu planenden Fertigungsanlage mit einer der bereits vorhandenen Basisanlage übereinstimmen, wird diese als Basislösung ausgewählt. Sollte dies jedoch nicht der Fall sein, gilt es eine ähnliche Basisanlage mit möglichst großer Übereinstimmung in den Prämissen auszuwählen. Beispielsweise besitzt die zu planende Fertigungsanlage eine stundenweise Ausbringung von 34 JPH. Es existieren jedoch lediglich Basisanlagen für eine vorgesehene Ausbringung von 30 JPH oder 45 JPH. In diesem Fall muss unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten entschieden werden, ob es sinnvoll ist die 30JPH-Basisanlage um einen gewissen Umfang an Betriebsmitteln zu erweitern oder die 45JPH-Basisanlage um einen gewissen Umfang zu reduzieren beziehungsweise die Möglichkeit einer Stückzahlerhöhung aufrecht zu erhalten. Teilweise sind die Basisanlagen zudem modular aufgebaut, um auf abweichende Prämissen reagieren zu können.

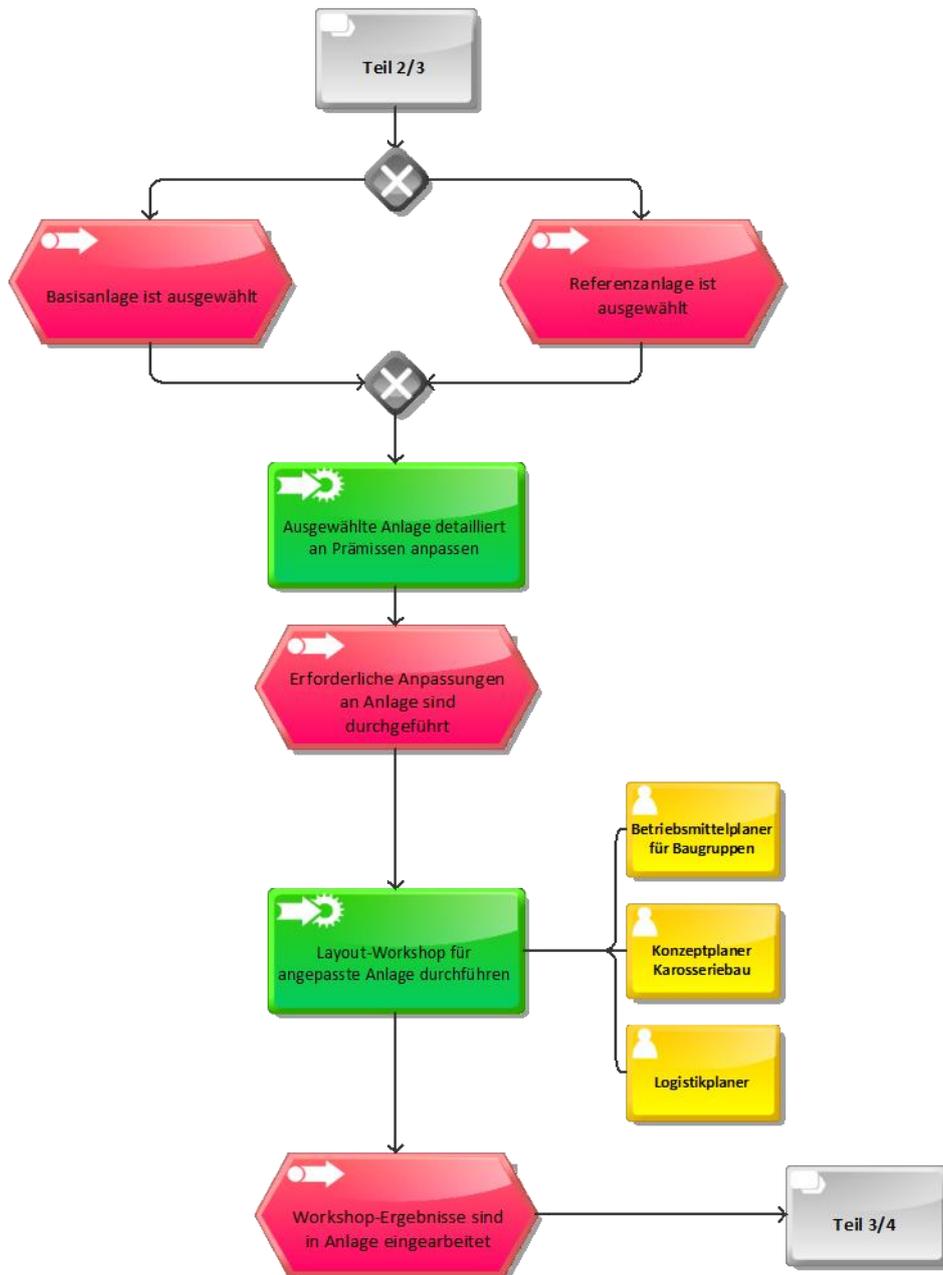


Abbildung 21: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 3 (eigene Darstellung)

In diesem Moment hat der Planer eine Basislösung der Fertigungsanlage in Form einer Referenz- oder Basisanlage vorliegen. Anschließend wird diese entsprechend der abweichenden Prämissen angepasst. Es findet somit keine komplette Neu-Planung, sondern eine Optimierung einer bestehenden Planung statt. Nach einem gewissen Zeitraum sind die Anpassungen an der Fertigungsanlage komplett umgesetzt und stehen damit als vorerst abgestimmter Planungsstand zur Verfügung. Mit diesem Planungsstand werden diverse Untersuchungen, wie zum Beispiel Zangenzugänglichkeits- und Verfügbarkeitssimulationen, durchgeführt. Parallel dazu finden sogenannte Layout-

Workshops mit den Betriebsmittelplanern, dem Konzeptplaner im Karosseriebau und dem Logistikplaner statt, die der kontinuierlichen Verbesserung der geplanten Anlage dienen. Im Rahmen dieser Workshops ergeben sich teils große Änderungen, die im Nachgang in den bisherigen Planungsstand eingearbeitet werden. Auch dieser Planungsstand unterliegt erneut einigen kontrollierenden Instanzen, wie bereits oben erwähnt.

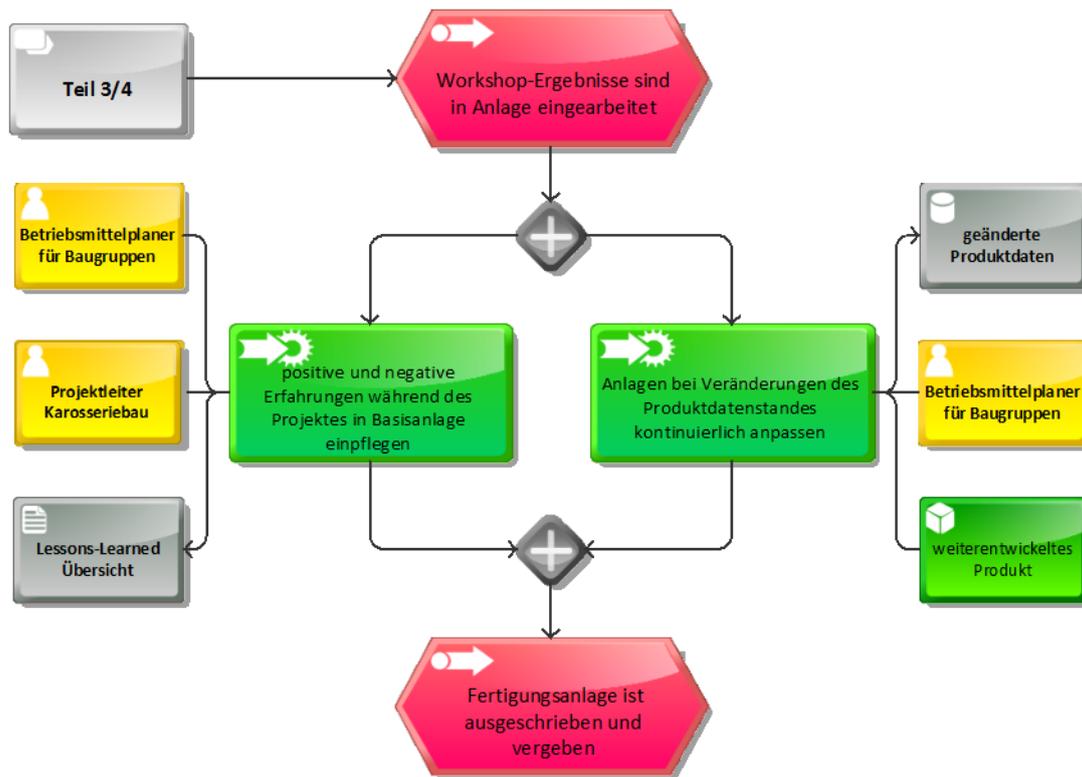


Abbildung 22: eEPK des aufgenommenen Prozesses Teil 4 (eigene Darstellung)

Im weiteren Verlauf des Projektes ergeben sich ständig Veränderungen des Produktes, die auch einen Einfluss auf die Fertigungsprozesse und -anlagen haben. Diese Änderungen, die sich aus dem weiterentwickelten Produkt und den somit veränderten Produktdaten ergeben arbeitet der Planer wiederum in seinen Planungsstand ein und passt diesen somit kontinuierlich an. Außerdem werden sowohl die positiven als auch die negativen Erfahrungen im Laufe des Projektes in einer Lessons-Learned-Übersicht festgehalten und den Projektleitern und zuständigen Mitarbeitern für die Standardisierung und Weiterentwicklung der Basisanlagen zugänglich gemacht. Nachdem mehrere Zyklen dieser Vorgehensweise durchlaufen wurden, wird ein Planungsstand aus Datensicht eingefroren und zur Konstruktion an einen Lieferanten vergeben, der damit weiterarbeitet. Die Phase der Feinplanung vor der Vergabe ist damit abgeschlossen.

### **3.1.5 Konsolidierung des Ist-Modells**

Im letzten Schritt der Ist-Erhebung wird das erstellte Ist-Modell konsolidiert. Dies umfasst zum einen die Konsistenz- und Vollständigkeitsüberprüfung des Modells und zum anderen eine Überprüfung durch die befragten Experten. Dabei werden Gespräche mit einer Auswahl von nicht am untersuchten Prozess beteiligten Personen durchgeführt, die versuchen den Prozessverlauf einmal zu durchlaufen und zu verstehen. Zusätzlich führen diese Überprüfung auch Personen durch, denen dieser Prozess geläufig ist, die aber nicht zur Gruppe der Interviewpartner gehören. Als letzte Gesprächsgruppe überprüfen die befragten Prozessexperten den modellierten Ist-Prozess. Dieser Schritt führt somit zu einer Validierung und Verifikation des modellierten Prozesses und erhöht die Qualität des Modells.

## **3.2 Analyse des Ist-Prozesses**

Der zweite Schritt bei der Untersuchung eines existierenden Prozesses ist die Analyse. Dabei werden zunächst die einzelnen Prozessschritte auf mögliche Schwachstellen analysiert. Daraus ergeben sich wiederum mögliche Verbesserungspotentiale, die ausgearbeitet werden. Diese Erkenntnisse dienen danach als Grundlage für die Erstellung des Soll-Prozesses.

### **3.2.1 Identifizierung der Schwachstellen**

Zuerst werden die Schwachstellen im erhobenen Prozess identifiziert. Dazu dienen zum einen die Informationen, die durch die Interviews ermittelt wurden und zum anderen eine objektive Analyse des Prozesses anhand typischer Kriterien von (SCHNEIDER et al. 2008), die es zu hinterfragen gilt.

Bei den Interviews kamen besonders zwei Schwachstellen stark zum Ausdruck. Beide liegen im Bereich der Schnittstelle zwischen der technischen Produktentwicklung und der Fertigungsplanung. Einerseits betrifft es die späte Bereitstellung von detaillierten und konkreten Produktdaten seitens der Produktentwicklung. Andererseits ergeben sich im Laufe eines Fahrzeugprojektes viele Änderungen am Produkt, die auch die Fertigungsplanung beeinflussen.

Bei der ersten Schwachstelle handelt es sich sowohl um eine Schwachstelle im Bereich der Ablauf- als auch in der Schnittstellenorganisation. Der vorgegebene Produktentstehungsprozess definiert bestimmte Meilensteine, an denen die bis dahin erarbeiteten Produktdaten an die Fertigungsplanung übergeben werden. In diesem

hauptsächlich von der technischen Entwicklung getriebenen Prozess gibt es wiederum durch zeitliche Entscheidungsverschiebungen und häufige Anforderungsänderungen am Produkt auch terminliche Herausforderungen bei der Einhaltung dieser Meilensteine. Dadurch weisen zum Zeitpunkt eines definierten Meilensteines die Produktdaten häufig noch nicht die Qualität auf, die für eine detaillierte Fertigungsplanung nötig ist.

Die zweite Schwachstelle, die die häufig auftretenden Änderungen im Laufe eines Projektes betreffen, ist im Bereich der Ablauforganisation einzuordnen. Auch hier liegt die Quelle innerhalb der technischen Produktentwicklung, die gezwungen ist auf gesetzliche Anpassungen oder eine Änderung der Kundenwünsche zu reagieren. Dies spiegelt sich in sicherheits- oder designspezifischen Produktänderungen wieder. Je nach Art und Umfang einer solchen Anpassung hat diese auch einen Einfluss auf die Fertigungsanlagen im Karosseriebau. Beispielsweise ergeben sich dadurch Störkonturen, die die Zugänglichkeit einer Schweißzange einschränken oder sogar die Art eines Fertigungsprozesses durch eine Materialänderung zur Folge haben. Abhängig von der Häufigkeit und der Menge an Änderungen kann auch der Aufwand bei der Umplanung der Fertigungsanlagen sehr hoch ausfallen. Diese Anpassungsschleifen können dafür sorgen, dass zeitliche Meilensteine von der Fertigungsplanung nicht eingehalten werden.

Neben diesen im Rahmen der Expertenbefragung erhobenen Schwachstellen werden anhand von typischen Kriterien weitere Handlungsbedarfe im Prozess ermittelt. Angelehnt an (SCHNEIDER et al. 2008) kommen Fragen im Rahmen von Checklisten als strukturelle Unterstützung zum Einsatz, die auf häufige Schwachstellen im Prozess abzielen. Dabei werden Schwachstellen in den Bereichen der Aufbauorganisation, der Ablauforganisation, den Schnittstellen und der Unterstützung durch Informations- und Kommunikationstechnik analysiert.

Bei der Aufbauorganisation lassen sich keine großen Schwachstellen aufdecken. Sowohl die Zuordnung der Aufgaben als auch die Verantwortlichkeiten in den beteiligten Organisationseinheiten sind klar geregelt und strukturiert. Allerdings tritt dabei gelegentlich eine Abweichung auf, indem die Fertigungsanlagenplaner im Karosseriebau eigene Referenzdaten für ein Produkt hernehmen, da die Produktentwicklung keine Produktdaten mit entsprechendem Reifegrad zur Verfügung stellt. Hierbei findet im Nachhinein eine Anpassung an das tatsächliche Produkt statt.

Im Bereich der Ablauforganisation werden keine überflüssigen Prozesse im abgegrenzten Gebiet identifiziert. Ebenso ist die Verschiebung oder Beschleunigung von Pro-

zessschritten nicht notwendig, um den Prozess zu verbessern. Jedoch lässt sich die Überlegung anstellen, ob gewisse Umfänge im Prozess vereinfacht werden können. Dazu gehört beispielsweise die sehr detaillierte Planungstiefe im Rahmen der Grobplanung. Außerdem unterliegen gewisse Prozessschritte auch mehreren Schleifen der Wiederholung. So werden Workshops zur Optimierung von Fertigungsanlagen mehrfach wiederholt, weil sich produktseitig große Änderungen ergeben. Dies hat wiederum einen Einfluss auf Überarbeitungen an geplanten Fertigungsanlagen durch die Planer. Weiterhin lassen sich im Ablauf selber Schwachstellen identifizieren. Die Aufgabe des Anlagenplaners ist es im Laufe des Prozesses eine Basisanlage anhand der gegebenen Prämissen auszuwählen. Diese Entscheidung unterliegt jedoch gewissen subjektiven Entscheidungen, die auch auf der Erfahrung des Planers beruhen. Wenn dann eine Basisanlage ausgewählt wurde, wird diese inklusive aller Umfänge wie Betriebsmittel und Fertigungsprozesse als Grundlage hergenommen und anschließend an das gegebene Produkt angepasst. Dies widerspricht im Grunde dem theoretischen Ansatz der Planung einer Fertigungsanlage (beispielsweise nach (SCHENK et al. 2014)), die vom Produkt ausgeht und anhand dessen die nötigen Abläufe, Fertigungsprozesse und somit auch die notwendigen Betriebsmittel herleitet.

Im betrachteten Prozess bestehen hauptsächlich Schnittstellen zwischen der Produktentwicklung und der Fertigungsplanung und innerhalb dieser. Die Schnittstellen sind im Rahmen des Produktentstehungsprozesses mit den notwendigen Übergaben und Gesprächen definiert. Die übergebenen Daten sind dabei durchgängig digital, liegen aber in unterschiedlichen Formaten vor, sodass eine manuelle Formatüberführung nötig ist. Die letzte Perspektive bei der Erarbeitung der Schwachstellen ist die Unterstützung durch Informations- und Kommunikationstechnik. Die Arbeitsergebnisse werden durchgängig in digitalen Systemen erarbeitet. Dabei kommen in der Produktentwicklung auch Software-Tools der Digitalen Produktentwicklung, wie zum Beispiel „CATIA“ von Dassault Systemes, zum Einsatz. Die Fertigungsplanung setzt auf Software-Tools der Digitalen Fabrik. Dazu gehört beispielsweise der „Process Designer“ von Siemens. Hier existiert somit noch kein integriertes System über den gesamten Prozess. Die sogenannten Produkt-Keyuser auf Seiten der Karosseriebau-Fertigungsplanung dienen entlang der Prozessschnittstelle als Übersetzer der notwendigen Produktdaten in das Planungssystem der Digitalen Fabrik. Weiterhin fehlt ein System, das die Möglichkeit bietet, automatisiert eine einfache und übersichtliche Darstellung von Fertigungsprozessen zu erzeugen. Das digitale Planungssystem „Process Designer“ basiert auf dem Produkt-Prozess-Ressource-Prinzip. Unter dem Produkt werden dabei sowohl die Pro-

duktdaten selbst als auch die Verbindungsdaten verstanden. Letztere beschreiben welche Produktbestandteile mit welchen Eigenschaften miteinander verbunden sind. Diese Verbindung zwischen Produkt- und Verbindungsdaten ist bereits digital vorhanden im Rahmen der technischen Entwicklung. Prozessdaten beschreiben den Fertigungsprozess in Form von genauen Ablaufplänen und Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Sie stellen die Umsetzung der sich aus den Verbindungsdaten ergebenden Prozessanforderungen für die Fertigungsplanung dar. Außerdem bilden sie die Schnittstelle zwischen den prozessausführenden Ressourcen der Fertigung und den Verbindungen, die diese Ressourcen herstellen. Die Ressourcen werden hauptsächlich durch die digitale Abbildung der in der Fertigung zur Verfügung stehenden Betriebsmittel beschrieben. Sowohl für die Schnittstelle zwischen den Verbindungs- und Prozessdaten als auch zwischen den Prozess- und Ressourcendaten existiert momentan keine vollautomatische Umsetzung. Diese Zusammenhänge werden derzeit manuell hergestellt. Jedoch erfolgt die Verbindung der Prozess- und Ressourcendaten innerhalb des integrierten Planungssystems „Process Designer“ und somit in einem einheitlichen Datenformat und innerhalb der gleichen Datenbank. Eine digitale Verknüpfung zwischen Prozess- und Verbindungsdaten existiert nicht, sodass es an dieser Stelle eine Lücke gibt. Diese ist in Abbildung 23 beschrieben und stellt eine Schwachstelle dar. Dadurch ist es zudem nicht möglich, aus vorhandenen Produktdaten automatisiert ein minimales Mengengerüst einer Fertigungsanlage zu erzeugen und dadurch die Fertigungskosten zu verringern.

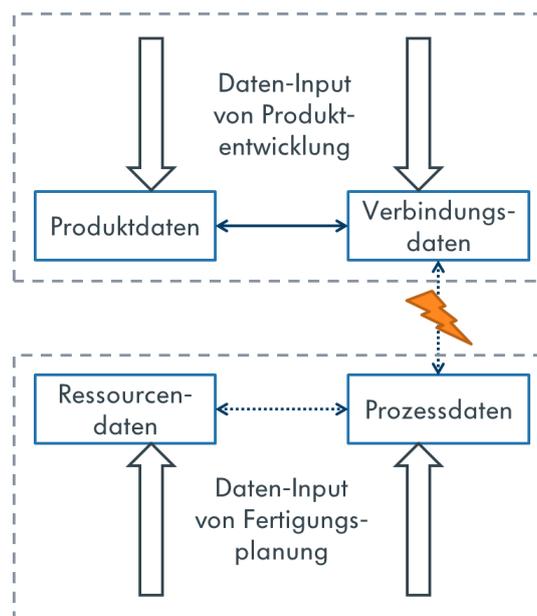


Abbildung 23: Zusammenhang des PPR-Prinzips in der Fertigungsplanung (eigene Darstellung)

### 3.2.2 Aufzeigen von Verbesserungspotentialen

Nachdem im vorherigen Kapitel die momentanen Schwachstellen identifiziert wurden, geht es im folgenden Kapitel darum diese zu analysieren und Verbesserungspotentiale auszuarbeiten.

Eine große zuvor herausgestellte Schwachstelle ist die späte Bereitstellung von Produktdaten seitens der Produktentwicklung beziehungsweise die nicht ausreichende Datenqualität zu den definierten Meilensteinen im Produktentstehungsprozess. Diese Schwachstelle liegt jedoch außerhalb der oben festgelegten Betrachtungsgrenzen dieser Prozessuntersuchung. Daher bietet sich an dieser Stelle nur eine eingeschränkte Möglichkeit zur Behebung dieses Problems. Es ist im Rahmen der Produktentwicklung zu lösen. Für die Fertigungsplanung bedeutet dies allerdings, dass sie mit dem bekannten Problem umgehen können muss. Die Fertigungsplanung im Karosseriebau arbeitet aus diesem Grund momentan mit selbst definierten, aber mit der Produktentwicklung grob abgestimmten Basisprodukten. Diese greifen standardisierte Umfänge im Rahmen der Produkte auf und ermöglichen somit eine erste Basisplanung. Jedoch gilt auch zu beachten, dass die Menge an Unterschieden zwischen dem Basisprodukt und dem realen Produkt den Aufwand der späteren Änderungen innerhalb der Fertigungsanlagenplanung stark beeinflusst. Aufgrund dessen ist es erforderlich, dass künftig eine höhere Reaktionsgeschwindigkeit auf Seiten der Fertigungsplanung erreicht wird, die es ermöglicht Investitionsabschätzungen für eine Fertigungsanlage im Karosseriebau zu ermitteln, sobald Produktdaten mit der erforderlichen Qualität vorhanden sind. Diese erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit ist auch eine Maßnahme, um auf die häufigen Produktänderungen im späteren Projektverlauf effizient zu reagieren. Eine weitere sinnvolle Maßnahme ist bei häufig auftretenden Änderungen die Verbesserung der Kommunikation. Diese ist jedoch durch eine regelmäßige Durchführung von Gesprächen zwischen Vertretern der Fertigungsstandardisierung aus dem Bereich der Karosseriebauplanung und Produktentwicklern bereits gegeben und es gibt kein dringendes Handlungspotential.

Außerdem werden, wie im Prozess beschrieben, die Basisanlagen vom Planer anhand der gegebenen Prämissen und seiner Erfahrung ausgewählt. Ein Ansatz der Verbesserung ist hier ein Tool zur eindeutigen Auswahl einer Basisanlage. Dieses kann entweder in Form eines Entscheidungsbaumes oder eines Software-Tools umgesetzt werden. Dabei dienen die vorhandenen Projektprämissen als Eingangsdaten und anhand einer hinterlegten Entscheidungsroutine wird durch zuvor festgelegte Regeln die best-

mögliche Basisanlage als Auswahl vorgeschlagen. Dadurch wird eine objektive und eindeutige Entscheidung für eine Basisanlage herbeigeführt.

Nachdem eine geeignete Basisanlage ausgewählt wurde, wird diese entsprechend des gegebenen Produktes angepasst. Wie bereits oben beschrieben entspricht dieser Ansatz nicht der theoretischen Herangehensweise, da die erforderlichen Fertigungsprozesse und bereitzustellenden Betriebsmittel nicht vom Produkt abgeleitet werden, sondern die innerhalb der Basisanlagen bereits vorgegebenen Fertigungsprozesse und Betriebsmittel an das Produkt angepasst werden. Dieser Schritt ist zwar notwendig, da zum Zeitpunkt des Beginns der Anlagenplanung die Qualität der vorliegenden Produktdaten meist noch nicht hoch genug ist, jedoch birgt er das Risiko, dass das aus den Betriebsmitteln und Ressourcen bestehende Mengengerüst nicht optimal ist. Das bedeutet, dass möglicherweise bestimmte Fertigungsprozesse und Ressourcen in den Fertigungsanlagen in Bezug auf deren Existenz und Reihenfolge nicht optimal eingesetzt sind, da die vorgegebenen Anlagen nur angepasst werden. Sobald die Qualität der Produktdaten hoch genug ist, sollten daher die Fertigungsanlagen vom Produkt ausgehend hergeleitet werden. Aus diesem Grund ist es notwendig eine Software-Komponente zu entwickeln, die Produktdaten und Projektprämissen als Basis nimmt, um daraus automatisiert ein minimales Mengengerüst einer Fertigungsanlage zu erzeugen. Dieses dient dann wiederum als Grundlage für die Ermittlung von Investitionen im Karosseriebau oder der geeignetsten Referenzanlage. Außerdem bietet es dadurch die Möglichkeit einen Vergleich zwischen der bis zu diesem Zeitpunkt geplanten und angepassten Basisanlage auf der einen Seite und dem mit dem Tool erzeugten minimalen Mengengerüst mit den dazugehörigen Fertigungsprozessen auf der anderen Seite anzustellen. Zusätzlich wird im Rahmen der Erarbeitung eines solchen Konzeptes eine Untersuchung durchgeführt, die die Schwachstelle der fehlenden Möglichkeit einer einfachen Modellierung von Fertigungsprozessen im Bereich des Karosseriebaus behebt. Durch die Erstellung des Konzeptes wird zudem die bereits oben beschriebene Lücke zwischen Fertigungs- und Produktdaten geschlossen. In Anlehnung an das CIM-Modell von Scheer (SCHEER 1987) erfolgt somit durch die Verknüpfung dieser Daten, wie in Abbildung 24 dargestellt ein weiterer Schritt zu einem integrierten System. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erarbeitung dieses Konzeptes und wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

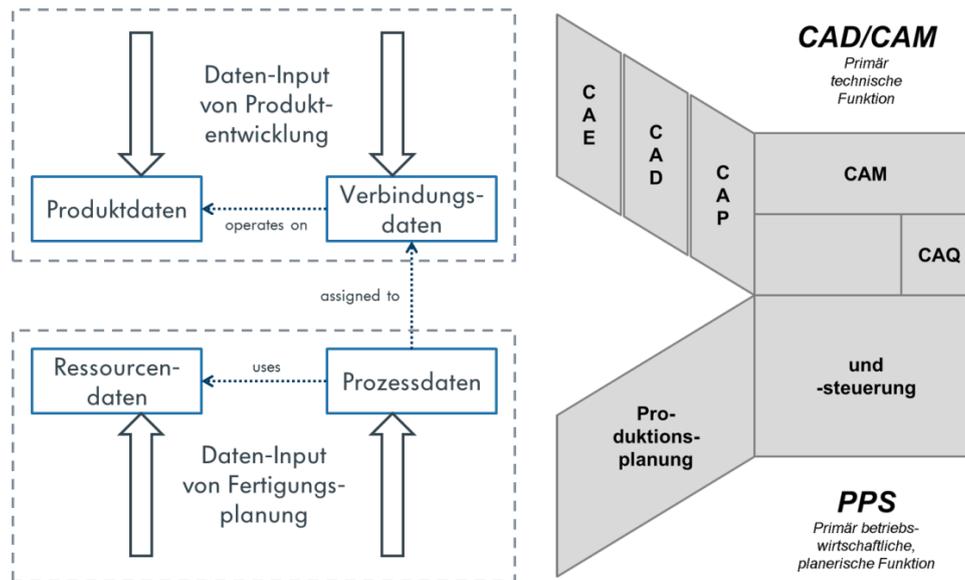


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen vorhandenen Daten und dem Y-CIM-Modell nach (SCHEER 1987)

Zurzeit ist die Planungstiefe innerhalb der Karosseriebau-Fertigungsplanung sehr hoch. Es ist allerdings in Frage zu stellen, ob der Faktor für Kosten und Nutzen an dieser Stelle noch effizient genug ist oder ob der aktuell vorhandene Aufwand den Nutzen nicht mehr rechtfertigt. Daher gibt es parallel zu dieser Arbeit Untersuchungen über die verschiedenen Marken der Volkswagen AG hinweg, inwiefern der Detaillierungsgrad der Fertigungsplanung vor allem in den Systemen der Digitalen Fabrik optimiert werden kann.

Im Bereich der Schnittstellen und der Informations- und Kommunikationstechnik gibt es zudem eine Schwachstelle bei der Übergabe von Daten von der Produktentwicklung zur Fertigungsplanung im Karosseriebau. Dabei existieren teilweise unterschiedliche Formate der übergebenen Daten. Der erste Ansatz ist hier die standardisierte Übergabe dieser in einem bestimmten Daten-Standard. Besser jedoch ist die Einführung eines integrierten Informationssystems, das durchgängig von der Produktentwicklung über die Fertigungsplanung bis hin zur Realisierung einer Projektarbeit ermöglicht. Dadurch gehen Verluste an Schnittstellen verloren und ein an den Produktentstehungs- und Fertigungsplanungsprozess orientiertes System ist nutzbar. Auch auf diesem Gebiet existieren zurzeit parallel zu dieser Arbeit Untersuchungen bei der Marke Volkswagen PKW, um Systeme und Prozesse zu integrieren. Weiterhin werden die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Ergebnisse als Konzept in die Anforderungsanalyse für ein solches integriertes System einfließen.

### 3.3 Konzeption des Soll-Prozesses

Aufgrund der soeben ausgearbeiteten Schwachstellen ist keine vollständige Neu-Modellierung des Soll-Prozesses nötig. Es erfolgt jedoch eine Erweiterung des bereits aufgezeigten Ist-Prozesses. Diese Integration an den entsprechenden Stellen ist in Abbildung 25 dargestellt. Der Teil-Prozess beginnt zu dem Zeitpunkt, bei dem die Projektprämissen feststehen und die Betriebsmittelplaner darüber informiert sind. Er endet mit der teilautomatisch generierten Fertigungsanlage und geht in den bereits beschriebenen Ist-Prozess über, um das Ereignis der angepassten Anlagen auszulösen. Durch diese Erweiterung ergibt sich der Vorteil, dass die bisherige Vorgehensweise zur Auswahl der standardisierten Anlagen nicht geändert, jedoch eine Prüfkomponente hinzugefügt wird.

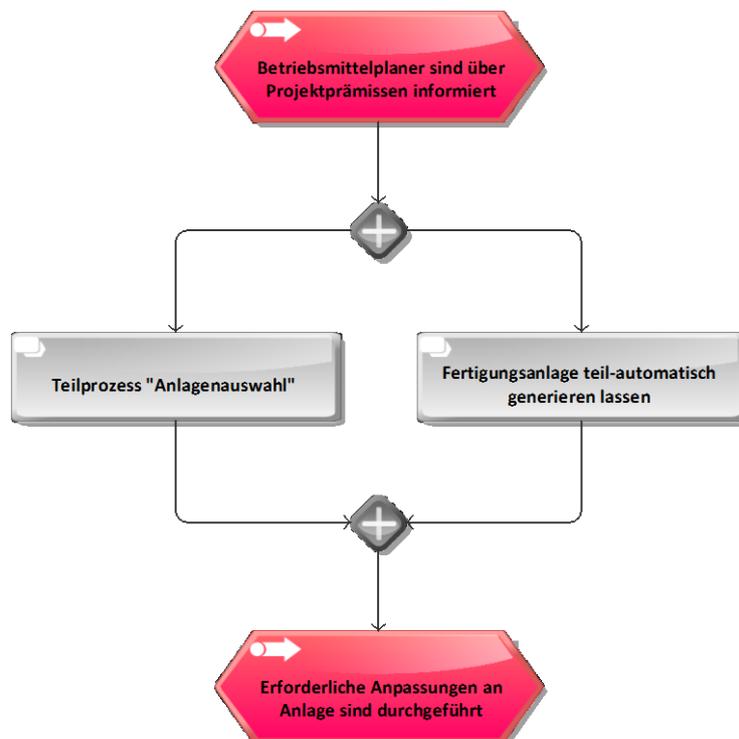


Abbildung 25: EPK zur Integration des Teil-Soll-Prozesses in Gesamtprozess (eigene Darstellung)

Der Teil-Prozess beginnt mit der Herleitung der Fertigungsanlage als ein Vorschlag, der auf den gegebenen Prämissen beruht. Das Konzept hinter dieser Herleitung wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert. Die Aufgabe des Betriebsmittelplaners ist es nun, diesen Vorschlag auf seine Plausibilität zu überprüfen. Diese Plausibilitätsprüfung ist notwendig, um die teilautomatisch ermittelte Fertigungsanlage zu überprüfen und Fehler weitestgehend auszuschließen. Wenn der Vorschlag nicht plausibel ist, gilt es die Ursache dafür zu ermitteln und die Eingangsdaten an der jeweiligen Stelle anzu-

passen. Danach erfolgt eine erneute Plausibilitätsprüfung. Sobald der Vorschlag vom Betriebsmittelplaner als plausibel beurteilt wird, ist es seine Aufgabe die Erkenntnisse der vorgeschlagenen Anlage mit den Daten der standardisierten Anlage zu vergleichen und Optimierungen einzuarbeiten. Daher ermöglicht dieser Teil-Prozess die Erweiterung der Sichtweise des Planers und führt zu optimierten Fertigungsanlagen. Der gesamte Teil-Prozess zur teilautomatischen Generierung einer Fertigungsanlage ist in Abbildung 26 abgebildet.

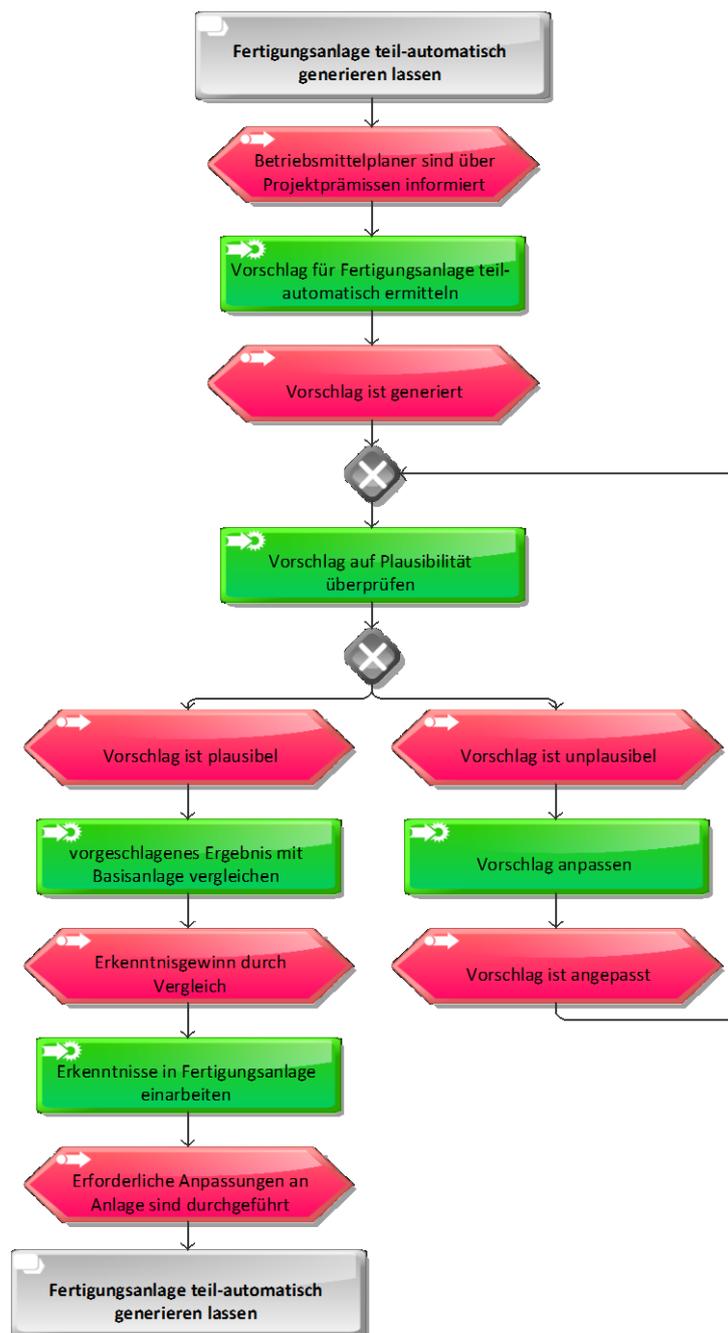


Abbildung 26: Ereignisgesteuerte Prozesskette des Soll-Prozesses (eigene Darstellung)

## 4 Anforderungen an ein Konzept zur automatisierten Betriebsmittelplanung

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel identifizierten Schwachstellen und Verbesserungspotentialen erfolgt in den folgenden Kapiteln ein Optimierungsschritt. Dabei liegt der Fokus auf den Anforderungen zur Verbindung der Daten von Seiten der Produktentwicklung und der Fertigungsplanung im Karosseriebau sowie den Anforderungen zur konzeptuellen Erarbeitung eines Werkzeugs, das dazu dient automatisiert aus gegebenen Produktdaten ein minimales Mengengerüst zu erzeugen. Dazu wird im Kapitel 4.1 ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Software vorgestellt. Der Inhalt des Kapitels 4.2 umfasst die Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Planung eines Produktionssystems. Anhand dessen werden in Kapitel 4.3 Anwendungsfälle für ein mögliches Software-System ausgearbeitet, die aus dem Vorgehensmodell für die Produktionssystemplanung hervorgehen. Das Kapitel 4.4 erläutert die im Karosseriebau gültigen Planungsprämissen. Zur späteren Visualisierung des Fertigungsprozesses werden in Kapitel 4.5 verschiedene Modellierungsarten systematisch verglichen und bewertet.

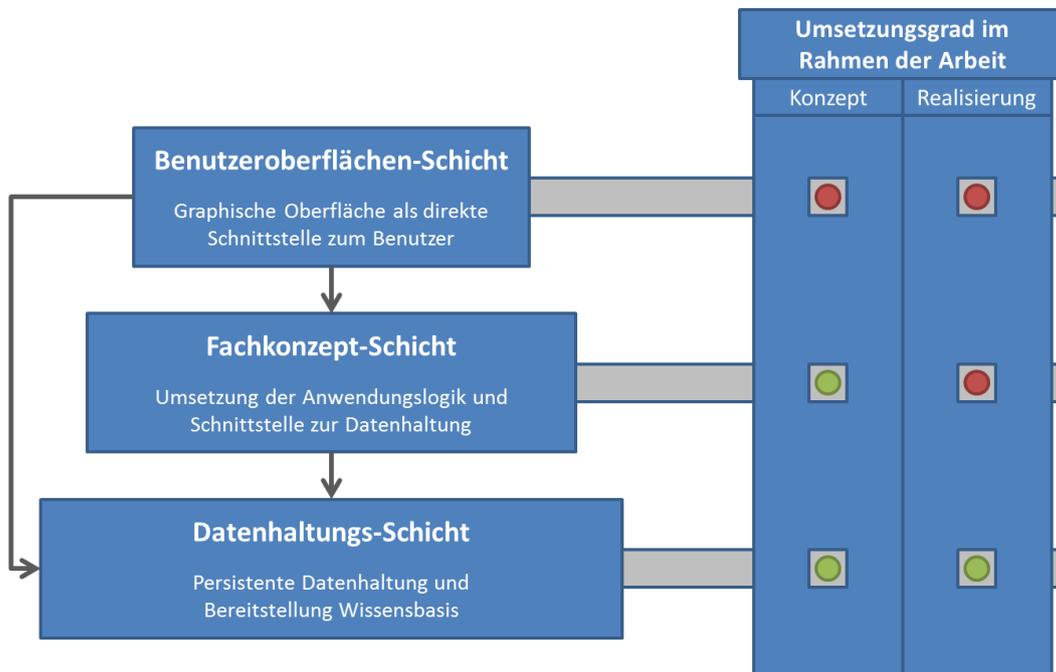


Abbildung 27: Drei-Schichten-Entwurfsarchitektur mit Umsetzungsgrad im Rahmen der Arbeit (eigene Darstellung)

Die Abgrenzung der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Umfänge zeigt die Abbildung 27. Die Grundlage des schematischen Aufbaus ist durch das Drei-Schichten-Modell der Software-Architektur gegeben (BALZERT 2010). In diesem werden

drei Schichten einer Anwendungssoftware entworfen. Die Schicht der Benutzeroberfläche stellt die direkte Schnittstelle zum Nutzer der Anwendung dar. Darunter befindet sich die Fachkonzept-Schicht, welche die funktionalen Anforderungen in Form der Anwendungslogik umsetzt und einen Zugriff auf die unterste Schicht der Datenhaltung bereitstellt. In dieser werden die Daten persistent gehalten. Für das im Folgenden zu entwickelnde Konzept beinhaltet diese Schicht ebenso die Wissensbasis in Form einer Ontologie. Innerhalb dieser Architektur ist es nur möglich von übergeordneten auf darunter liegende Schichten zuzugreifen. Dies ermöglicht eine unabhängige Entwicklung von Benutzeroberflächen, Applikationen und Datenbanken.

Die folgenden Kapitel beinhalten insbesondere die konzeptuelle Entwicklung und Realisierung der Datenhaltungsschicht durch die Erarbeitung einer Ontologie. Darauf aufbauend wird die Anwendungslogik zur Nutzung des in der Wissensbasis hinterlegten Wissens konzeptuell ausgearbeitet. Die Implementierung dieser Fachkonzept-Sicht ist jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit. Ebenso erfolgt die Entwicklung eines Benutzeroberflächenkonzeptes und dessen Realisierung nicht in diesem Rahmen.

### **4.1 Vorgehensmodell der Software-Entwicklung**

Im Rahmen der Software-Entwicklung gibt es nach (KLEUKER 2011) fünf klassische Phasen, die in Abbildung 28 dargestellt werden: Die Anforderungsanalyse, das Grobdesign, das Feindesign, die Implementierung sowie die Test- und Integrationsphase. Jede dieser Phasen wird nacheinander einmal durchlaufen und mit einer Qualitätssicherung verbunden. (KLEUKER 2011)

Innerhalb der Anforderungsanalyse ist die Zielstellung die Ermittlung des Kundenwunsches und der damit verbundenen Anforderungen. Der Erfolg eines Softwareprojektes hängt in einem großen Umfang von den Aktivitäten dieser Phase ab. Von besonders hoher Wichtigkeit ist dabei die Kommunikation zwischen dem Entwickler und dem Kunden. Als Resultat ergibt sich eine Menge von Anwendungsfällen.

Im Rahmen des Grobdesigns werden die zuvor ermittelten Anforderungen in einem Modell umgesetzt, das bei der Entwicklung des Software-Produktes unterstützt. Dadurch werden die informell formulierten Anforderungen detaillierter ausgearbeitet. Außerdem erfolgt die Festlegung der Software- und Systemarchitektur.

Anschließend werden diese Umfänge im Feindesign noch weiter detailliert und verbessert. Zusätzlich findet eine Untersuchung der Schnittstellen, der inneren Struktur der Software und die Gestaltung der Benutzeroberfläche statt.

Nachdem diese Designphasen abgeschlossen sind, beginnt die Implementierung. Das bedeutet, dass die Designentwürfe programmiert und in eine funktionsfähige und lauffähige Software umgewandelt werden.

Abschließend durchläuft das Softwareprojekt die Phase des Tests und der Integration. Dabei werden die zumeist unabhängig voneinander implementierten Software-Bestandteile zusammengesetzt und somit wird das gesamte Software-Produkt erzeugt. Dieses wird anschließend nach bestimmten Testverfahren validiert und verifiziert, um die Qualität sicherzustellen und die Software mit den zu Beginn aufgenommenen Kundenwünschen abzugleichen.

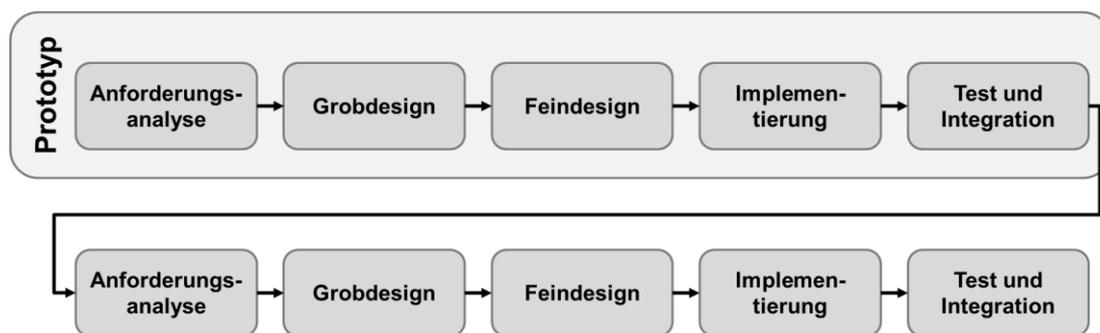


Abbildung 28: Modell zur Vorgehensweise bei der prototypischen Softwareentwicklung nach (KLEUKER 2011)

Von diesem Vorgehensmodell existieren jedoch verschiedene Anpassungen und Erweiterungen. Eines davon ist die „Prototypische Entwicklung“ (KLEUKER 2011). Diese unterscheidet sich insofern vom zuvor beschriebenen Vorgehen, dass vor dem Start der Entwicklung des finalen Software-Produktes ein Software-Prototyp entwickelt wird, der lediglich einen gewissen Funktionsumfang und eine grob gestaltete Benutzeroberfläche zur Verfügung stellt. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit bei begrenztem Aufwand die Probleme und Abweichungen von den Anforderungen frühzeitig zu erkennen und vor der finalen Umsetzung zu beheben. Außerdem lässt sich dadurch bei neuen Funktionalitäten überhaupt erst die Umsetzbarkeit prüfen, ohne dafür bereits einen hohen Aufwand für Entwicklung und Design des Software-Produktes aufzuwenden. Erst wenn die identifizierten Probleme behoben sind und eine Abstimmung mit dem Kunden bezüglich der prototypisch umgesetzten Softwarefunktionalitäten stattgefunden hat, beginnt die Phase der finalen Software-Entwicklung. In dieser werden alle Projektphasen noch einmal durchlaufen, allerdings in einem höheren Detaillierungsgrad. Im Rahmen einer iterativen Entwicklung können die Phasen auch mehr als zwei Mal durchlaufen werden, um eine Software in kürzeren Wiederholungszyklen zu entwickeln.

Für diese Arbeit dient der Ansatz der prototypischen Entwicklung als Vorgehensmodell der Software-Entwicklung, da der konzeptionelle Ansatz geprüft wird. Eine finale Umsetzung und Integration in die Systemlandschaft des Unternehmens findet im Anschluss auf Basis der in dieser Arbeit ermittelten Erkenntnisse statt. Die Abgrenzung liegt hier somit bei der Erstellung eines Prototypen für das zu entwickelnde Konzept.

### 4.2 Vorgehensmodell der Produktionssystemplanung

Das Ziel der Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Planung eines Produktionssystems ist die Ermittlung der Anforderungen an ein Konzept beziehungsweise an ein mögliches System, das anhand von einem gewissen Daten-Input teilautomatisch ein Planungsergebnis erzeugt. Somit gehört dieser Umfang zur Phase der Anforderungsanalyse. Diese umfasst die Erarbeitung der Umfänge an Funktionen und Diensten eines Systems, die ein bestimmter Anwender benötigt. Weiterhin werden Restriktionen der Systementwicklung und des Systembetriebs beachtet (GRECHENIG 2010). Das Resultat dieser Aktivitäten ist eine Menge von Anforderungen an ein umzusetzendes System. Die Aufnahme der Anforderungen erfolgt in dieser Arbeit zunächst in Form von User-Stories, die anhand der unten beschriebenen theoretischen Vorgehensweise formuliert werden. User-Stories sind eine abstrakte und grobe Definition von Anforderungen, die besonders bei der agilen Software-Entwicklung zum Einsatz kommen. Sie enthalten gerade genug Informationen, um daraus angemessene Inhalte zu formulieren (AMBLER 2014). Typischerweise werden sie im Umfang von ein bis zwei Sätzen beschrieben. Ein beispielhafter Satzbau, der im Rahmen dieser Arbeit benutzt wird lautet:

**User-Story:**

*"Als <Rolle> möchte ich <Ziel/Wunsch>, um <Nutzen>." (AMBLER 2014)*

Innerhalb dieses Kapitels sind die aus dem jeweiligen Inhalt der einzelnen Phasen generierten User-Stories direkt in dieser oben abgebildeten Formatierung angegeben. Anschließend an dieses Kapitel werden aus den User-Stories Anwendungsfälle generiert, die die Anforderungen an das System etwas detaillierter beschreiben und in einem Modell abgebildet werden.

Die in Kapitel 3.2.2 aufgestellte These und eines der im vorherigen Kapitel identifizierten Handlungspotentiale beruhen auf der Aussage, dass die momentane Vorgehensweise innerhalb der Karosseriebauplanung der Marke Volkswagen PKW punktuell von

theoretischen Konzepten abweicht. Zurzeit werden anhand der Projektprämissen standardisierte Basisanlagen ausgewählt und dem Produkt angepasst. Die Anlagen werden somit hinsichtlich der Fertigungsprozesse, ihrer Abläufe und der zugehörigen Betriebsmittel nicht noch einmal komplett analysiert, sondern lediglich angepasst. In vielen theoretischen Ausarbeitungen der Produktionssystemplanung beruht der Planungsansatz jedoch auf der Vorgehensweise, dass anhand des Produktes die Fertigungsprozesse und letztendlich die benötigten Betriebsmittel hergeleitet werden (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2012; PAWELLEK 2014; SCHENK et al. 2014). In dieser Arbeit dient der theoretische Ansatz von Schenk und Wirth (SCHENK et al. 2014) als Grundlage, um die notwendigen Anwendungsfälle zu erarbeiten.

Schenk und Wirth geben fünf Schritte bei der Projektierung einer Produktionssystemplanung an, die in der folgenden Abbildung 29 aufgelistet sind.

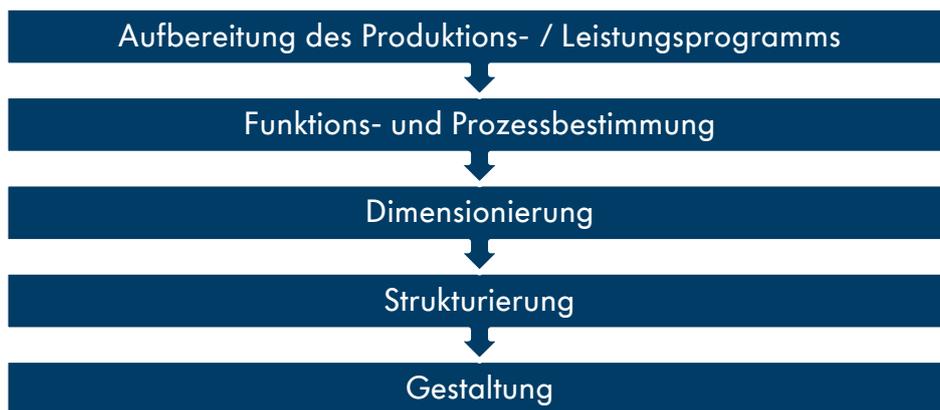


Abbildung 29: Projektschritte der Produktionssystemplanung nach (SCHENK et al. 2014)

Aus systemtheoretischer Sicht wird ein Produktionssystem  $\Sigma$  als eine Zusammenfassung der Elementmenge  $M$ , der Prozessmenge  $P$  und der Strukturmenge  $S$  definiert (SCHMIGALLA 1995). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 30 dargestellt. Innerhalb der Elementmenge  $M$  sind die Produktionsfaktoren in Form der Teilmengen Betriebsmittel, Personal und Material zusammengefasst. Die Prozessmenge  $P$  beinhaltet die Prozesse, die zur Herstellung, Verarbeitung und Bearbeitung der Produkte notwendig sind nach ihren stofflichen, informationellen und energetischen Eigenschaften. Bei der Strukturmenge  $S$  handelt es sich um zweistellige Relationen ebenfalls aus stofflicher, energetischer und informationeller Sicht, die durch Prozesse ausgelöst werden. (SCHENK et al. 2014)

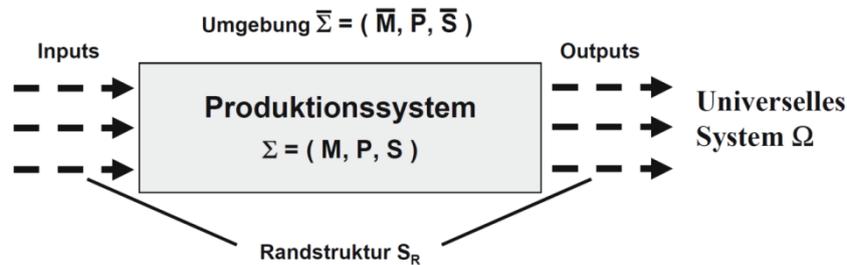


Abbildung 30: Systemtheoretische Sichtweise eines Produktionssystems aus (SCHENK et al. 2014)

In der ersten Phase der Produktionssystemplanung werden das Produktions- und Leistungsprogramm aufbereitet. Das Produktionsprogramm wird definiert durch die „Festlegung der Produktion nach sachlichen (Art, Größe), mengenmäßigen (Stückzahl, Masse), wertmäßigen (Preis, Kosten) und zeitlichen (Produktionszeitraum, Planungsperiode) Aspekten“ (SCHENK et al. 2014). Das Leistungsprogramm ist die Anforderung an die Leistung eines Produktionssystems und wird aus dem Produktionsprogramm abgeleitet. Das Produktionsprogramm kann dabei je nach Projektphase einen kurz-, mittel- oder langfristigen Planungshorizont und somit operativen, taktischen oder strategischen Charakter haben. Bei der frühen Planung geht es dabei hauptsächlich um die Entscheidung, bestimmte Bauteile unter wirtschaftlichen und produktionstechnischen Gesichtspunkten als zu beschaffende Kaufteile oder selbst herzustellende Hausteile zu definieren. Weiterhin geht es um die Eingrenzung der Produktvariantenvielfalt und die Bestimmung von Produktgruppen mithilfe eines Typenvertreterers.

**User-Story Nr. 1:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich die Auslegung der Fertigungsanlage an das Produktionsprogramm und die Projektprämissen anpassen können, um meine Planung anhand dessen optimal zu gestalten"*

Die zweite Phase ist die Funktions- und Prozessbestimmung, deren Inhalte in Abbildung 31 zusammengefasst sind. Unter Zugrundelegung des systemtheoretischen Modells aus der Abbildung 30 geht es in diesem Schritt um Planungsumfänge der Prozessmenge P. Die Hauptaufgabe ist somit die qualitative Ermittlung der Technologien, der Fertigungsverfahren und der Prozesse sowie eine Vorauswahl der Prozessmittel. Als Input dient das Produktionsprogramm inklusive der konkreten Beschreibung des Produktes und zugehöriger Eigenschaften. Dazu gehören unter anderem ein Konstruktionsstand beispielsweise in Form einer Stückliste oder einer Konstruktionszeichnung und die notwendige Technologie beziehungsweise das Fertigungsverfahren. Weiterhin spielen auch Faktoren, wie der mengenmäßige Umfang des Produktionsprogramms,

das Material und das Gewicht des Produktes eine Rolle. Mithilfe dieser Eingangsdaten erfolgt innerhalb von fünf Teilschritten die Funktionsbestimmung. (SCHENK et al. 2014)



Abbildung 31: Planungsschritt der Funktionsbestimmung aus (SCHENK et al. 2014)

**User-Story Nr. 2:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich die konkreten Produktdaten als Basis der Planung benutzen, um daraus die Fertigungsverfahren und –prozesse ermitteln zu können."*

Der erste Teilschritt umfasst die Analyse des Produktionsprogramms und der zugehörigen Produktstruktur. Durch die Strukturierung des Produktes ergeben sich wiederum die verschiedenen Fertigungsstufen, in denen das Produkt hergestellt werden soll.

**User-Story Nr. 3:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich die Struktur des Produktes anhand der gegebenen Produktdaten erzeugen lassen und anpassen können, um einen Überblick über die Fertigungsstufen zu besitzen."*

Innerhalb des zweiten Teilschrittes werden die Prinzipien und Verfahren der Fertigung festgelegt. Das Fertigungsprinzip beschreibt dabei „die für ein bestimmtes Erzeugnis-spektrum ausgewählten Fertigungsverfahren, deren Anordnung in Arbeitssystemen und die Reihenfolge, in der diese Arbeitssysteme zu durchlaufen sind“ (DANGELMAIER 1999). Typische Fertigungsverfahren im Karosseriebau sind das Widerstandspunktschweißen oder das Kleben (HOLZKAMP 2010).

**User-Story Nr. 4:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich für die zuvor ermittelte Produktstruktur eine Übersicht der zu verwendenden Fertigungsverfahren erhalten, um eine Grundlage für eine Prozessfolge und Abschätzung des Mengengerüsts zu besitzen."*

Anschließend wird im dritten Teilschritt der Fertigungsprozess erarbeitet und ein Arbeitsablaufschemata entwickelt. Als Mittelpunkt der Funktionsbestimmung ist das Ziel dieses Schrittes die Ermittlung der Prozessschritte des geplanten Produktionssystems. Die Planung des Prozessablaufs und die Beschreibung der auszuführenden Operationen sind die hauptsächlichen Aufgaben. Dabei spielen die wirtschaftlichen und sachbezogenen Kriterien eine wichtige Rolle. Die Prozesse sind „nur so detailliert wie nötig“ (SCHMIGALLA 1995) zu bestimmen. Das Ergebnis dient als Grundlage für die anschließende Dimensionierung. Dieses ist abhängig von der Ausgangsbasis der Planung. Hierbei kann es von der Übernahme der bereits im Produktionssystem vorhandenen Prozesse über die Anpassung der vorhandenen Fertigungsprozesse im Sinne einer Prozessoptimierung bis hin zu einer Neugestaltung oder erstmaligen Konzeption der Abläufe kommen.

**User-Story Nr. 5:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich eine Übersicht über die Arbeits- und Fügefolgen haben, um daraus einen optimalen Fertigungsprozess ableiten zu können."*

Aus dem im vorherigen Teilschritt erarbeiteten Arbeitsablaufschemata wird im vierten Teilschritt das Funktionsschemata abgeleitet. In diesem sind die zur Fertigung des Produktes nötigen Funktionseinheiten und deren Verbindung mit dem qualitativen Umfang des Materialflusses abgebildet. Es zeigt die Ablauflogik des Fertigungsprozesses vom Eingang zum Ausgang des Systems ohne Restriktionen des realen Systems zu beachten.

**User-Story Nr. 6:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich anhand der zuvor ermittelten Arbeits- und Fügefolgen einen Prozessablauf unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten ermitteln lassen, um eine optimale Basis für die qualitative und quantitative Zuordnung der Betriebsmittel zu erhalten."*

Abschließend erfolgt im Rahmen des fünften Teilschrittes die Auswahl der zu verwendenden Betriebsmittel. Dazu findet zunächst eine Vorauswahl der Betriebsmittel auf Basis der geplanten Prozesse und Fertigungsverfahren unter Berücksichtigung der technischen und funktionellen Kriterien statt. Anschließend werden die Betriebsmittel, die funktional gleichartige Aufgaben übernehmen, anhand ihrer ökonomischen und ökologischen Eigenschaften verglichen und eine finale Auswahl getroffen. (SCHENK et al. 2014)

**User-Story Nr. 7:**

"Als Anlagenplaner möchte ich zu jedem Schritt des zuvor ermittelten Fertigungsprozesses eine Auswahl der möglichen Betriebsmittel bekommen, um die aus wirtschaftlicher und technologischer Sicht sinnvollste Entscheidung treffen zu können."



Abbildung 32: Planungsschritt der Dimensionierung aus (SCHENK et al. 2014)

Die dritte Phase ist die Dimensionierung und ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Planungsinhalte beschreiben in dieser Phase aus systemtheoretischer Sicht die Elementmenge  $M$  eines Produktionssystems. Im Gegensatz zu den qualitativen Aktivitäten in der Funktionsbestimmung geht es in dieser Phase sowohl um die quantitative Bestimmung der Betriebsmittel, des Personals, der Flächen und des Materials als auch um die Ermittlung der daraus resultierenden Kosten (SCHMIGALLA 1995). Zur Quantifizierung der Elemente dient der Bilanzansatz als Basis. Das bedeutet, dass das Belastungsvermögen des Produktionssystems größer oder gleich der gegebenen Belastung sein muss. Konkret für die Berechnung von Betriebsmitteln bedeutet dies, dass das Produkt aus der vorhandenen Anzahl an Betriebsmitteln für ein Fertigungsverfahren und dem Belastungsvermögen eines solchen Betriebsmittels größer oder gleich der gegebenen Belastung sein muss. Um letztendlich Investitionsentscheidungen zu treffen werden meist tabellarische Bedarfslisten erstellt, anhand derer Ausschreibungen und Angebote erstellt und eingeholt werden.

**User-Story Nr. 8:**

"Als Anlagenplaner möchte ich eine quantitative Aufstellung der benötigten Betriebsmittel erhalten, um eine Abschätzung bezüglich der Investitionen durchführen zu können."

Je nach Zeitbezug wird die Dimensionierung in die statische und dynamische Dimensionierung kategorisiert. Bei der statischen Dimensionierung spielt der Zeitbezug keine

Rolle, sodass Änderungen der Produktionsauslastung im Laufe der Zeit nicht beachtet werden und von einer gleichmäßigen Verteilung der benötigten und verfügbaren Kapazität ausgegangen wird. Grundsätzlich ist bei der Auslegung auf eine Minimierung der Kosten, der physischen Belastung der Arbeitskräfte sowie des notwendigen Betriebsmittel- und Personalbedarfs zu achten.

Die dynamische Dimensionierung beachtet die Änderungen der Belastung über die Zeit und somit die „zeitabhängigen Relationen zwischen den Elementen des Systems“ (SCHENK et al. 2014). Dabei kommen hauptsächlich dynamische Methoden, wie die Darstellung in Gantt-Diagrammen oder die Simulation zum Einsatz. Damit ist es möglich die Prozesse innerhalb eines Produktionssystems abzubilden und die zeitliche Komponente zu berücksichtigen. (SCHENK et al. 2014)



Abbildung 33: Planungsschritt der Strukturierung aus (SCHENK et al. 2014)

Die vierte Phase ist die Strukturierung, welche sich aus der systemtheoretischen Sicht mit der Strukturmenge  $S$  eines Produktionssystems befasst und das Ziel hat, innerhalb eines Produktionssystems beherrschbare Teilsysteme zu generieren, die sowohl technisch als auch organisatorisch eine Realisierbarkeit aufweisen. Eine schematische Übersicht ist in Abbildung 33 gegeben. Nach (SCHENK et al. 2014) ist die Strukturierung die „Bestimmung der zeitlichen und räumlichen Beziehungen der Prozessmittel zueinander mit dem Ergebnis der optimalen Anordnung der Elemente und Systeme“. Die zeitliche Sichtweise der Strukturierung umfasst die zeitliche Anordnung der Prozess-Elemente und ihr Zusammenwirken in zeitlicher Hinsicht. Zu den Arbeitsinhalten gehören die Einteilung des Prozesses in Takte und das Bilden einer Reihenfolge daraus sowie die Festlegung der Größe und Reihenfolge von Transport- und Fertigungslosen.

**User-Story Nr. 9:**

"Als Anlagenplaner möchte ich eine Einteilung des Fertigungsprozesses in Takte erhalten, um die Auswirkung der zeitlichen Restriktionen auf das Betriebsmittel-Mengengerüst und die räumliche Anordnung dieser bestimmen zu können."

**User-Story Nr. 10:**

"Als Anlagenplaner möchte ich abhängig vom Produktionsprogramm und der ermittelten Arbeitsinhalte die Vorgabe einer optimalen Transport- und Fertigungslosgröße erhalten, um die Fertigungsanlage unter wirtschaftlichen Aspekten optimal auszulasten."

Die räumliche Sichtweise dagegen beinhaltet eine Anordnung von örtlich nicht veränderbaren Betriebsmitteln in die bauliche Hülle in ihrer wirtschaftlichsten Art und Weise unter Beachtung der aus dem Fertigungsprozess gegebenen Restriktionen. Somit handelt es sich hierbei um eine Optimierungsaufgabe mit der Zielfunktion einer technologischen Flexibilität, die der Absatzsituation gerecht wird und möglichst geringen Transportaufwänden in Hinblick auf den Materialfluss. Beispiele für die räumliche Anordnung sind die Punkt-, Linien- und Netzstruktur (SCHENK et al. 2014).

**User-Story Nr. 11:**

"Als Anlagenplaner möchte ich eine optimale räumliche Anordnung der Fertigungselemente unter Berücksichtigung der gegebenen Projektprämissen erhalten, um darauf aufbauend ein Layout der Fertigungsanlage erstellen zu können."



Abbildung 34: Planungsschritt der Gestaltung aus (SCHENK et al. 2014)

Die fünfte und letzte Phase ist die Gestaltung, deren Inhalte in Abbildung 34 angegeben sind. Dabei geht es um „die umsetzungsreife, räumlich-funktionelle Einordnung der Flusssystemelemente/Flusssysteme in das Realobjekt unter besonderer Beachtung der Restriktionen und Forderungen aus Ökonomie, Ökologie sowie Arbeits- und Gesundheitsschutz und die Feinplanung spezieller Vorhabensbereiche“ (SCHENK et al.

2014). Das bedeutet, dass die in der vorherigen Phase der Strukturierung erarbeiteten abstrakten Ergebnisse in dieser Phase der Gestaltung an die realen räumlichen Bedingungen des Produktionssystems möglichst optimal angepasst werden. Das Ergebnis dieser Phase ist ein Layout, welches die räumliche Anordnung der Funktions- und Struktureinheiten abbildet. Es wird zudem abhängig vom gewählten Detaillierungsgrad in Grob- und Feinlayout unterschieden. Außerdem erfolgt eine Differenzierung bezüglich des Realitätsgrads in Ideal- und Reallayouts. Dabei ist die Richtung bei der Erarbeitung der Layouts vom Groben zum Feinen und vom Idealen zum Realen, sodass zunächst räumliche Restriktionen nur am Rande betrachtet werden und im Verlauf dieser Phase immer detaillierter. Das Ziel ist es, diese räumliche Anordnung unter wirtschaftlichen und prozesssicheren Aspekten zu gestalten. Die Bewertung findet dabei sowohl durch die Verwendung von quantitativen als auch von qualitativen Kriterien statt. (SCHENK et al. 2014)

**User-Story Nr. 12:**

*"Als Anlagenplaner möchte ich unter Beachtung der im gesamten Planungsprozess zuvor erhaltenen Erkenntnisse ein optimales Layout erhalten, um sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus prozessualer und technologischer Sicht ein optimales Produktionssystem als Ergebnis zu bekommen."*

Nachdem diese Umfänge der Systemplanung durchgeführt sind, kann das Produktionssystem in die Phase des Systembetriebs übergehen. Die hier dargestellten Inhalte der Produktionssystemplanung stellen im weiteren Verlauf der Arbeit die Grundlage für die Erarbeitung der Vorgehensweisen und Anwendungsfälle dar.

### 4.3 Beschreibung der Anwendungsfälle

Nachdem im Kapitel 4.2 die theoretische Herangehensweise der Planung eines Produktionssystems erläutert wurde, geht es nun darum, die in Form von User-Stories formulierten Anforderungen durch Anwendungsfälle zu beschreiben. Diese führen den Planer entlang des Ablaufs zu einem Ergebnis. Diese Anwendungsfälle helfen bei der Erarbeitung des zu konzipierenden Software-Tools. Sie werden dabei in Form von Use-Case-Diagrammen der Unified Modeling Language (UML) beschrieben. Dadurch wird die Zielstellung der zu entwickelnden Software vorgegeben.

Unified Modeling Language bedeutet so viel wie „vereinheitlichte Modellierungssprache“ und hat die Aufgabe Software-Systeme zu visualisieren, zu spezifizieren, zu konstruieren und zu dokumentieren (BOOCH et al. 2006). Die darin enthaltenen Use-Case-Diagramme werden auch als Anwendungsfalldiagramme bezeichnet. Sie bestehen

lediglich aus den Elementen „Akteur“ und „Anwendungsfall“ sowie den Beziehungen zwischen ihnen und beschreiben somit „die Zusammenhänge zwischen einer Menge von Anwendungsfällen und den daran beteiligten Akteuren“ (OESTEREICH & BREMER 2012). Bei den Akteuren kann es sich sowohl um Personen als auch um beteiligte Systeme, wie zum Beispiel bereits bestehende Datenbanken, handeln (KLEUKER 2011). Im Rahmen der Anforderungsanalyse bilden die Use-Case-Diagramme die Umfänge des zu entwickelnden Systems ab, jedoch nicht das Verhalten oder die Abläufe.

Die erste User-Story beschreibt die Anforderung, die gegebenen Prämissen eines Fahrzeugprojektes als Input und Basis der Planung zu benutzen. Dazu sollen die benötigten Prämissen in einer bestimmten Kategorisierung aufgelistet und die jeweiligen Parametrierungen in Eingabefeldern vorgenommen werden. Die Erläuterung der notwendigen Prämissen, die hier als Input dienen, erfolgt in Kapitel 4.4. Das Use-Case-Diagramm ist in Abbildung 35 abgebildet.

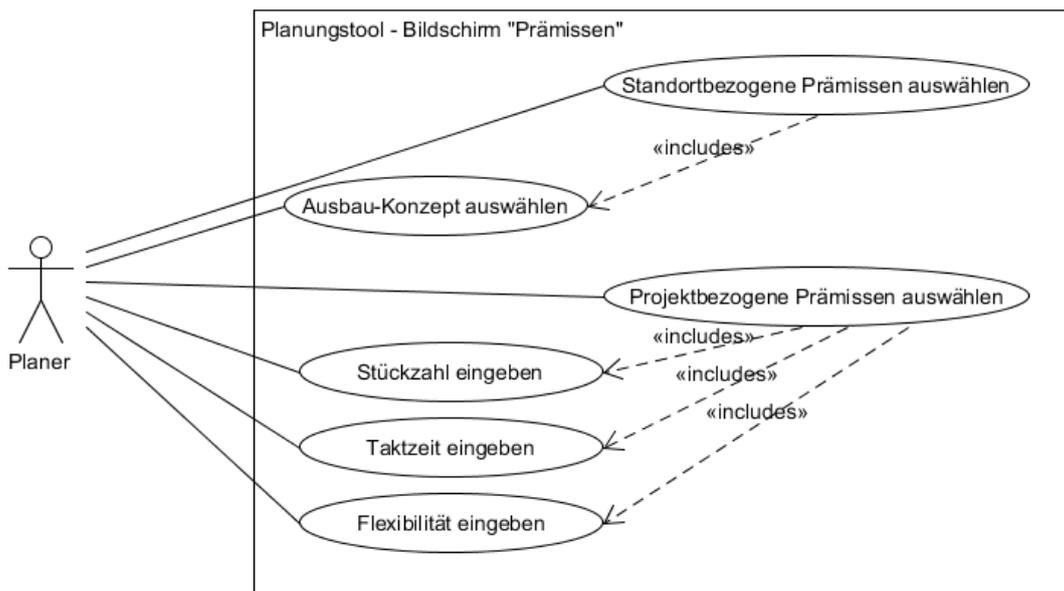


Abbildung 35: Use-Case-Diagramm des "Prämissen"-Bildschirms (eigene Darstellung)

Bei der zweiten und dritten User-Story geht es um die Nutzung von Produktdaten als Eingangsdaten der Fertigungsplanung. Zum einen ist es denkbar dem Nutzer die Möglichkeit zu geben, sich eine eigene Produktstruktur anzulegen. Das ist sinnvoll, wenn die Produktdaten noch nicht in dem erforderlichen Umfang vorliegen oder noch nicht das entsprechende Datenformat besitzen. Zum anderen gibt es die Möglichkeit Produktdaten in einem bestimmten Format zu importieren. Diese Daten enthalten unter

anderem Informationen über die Verbindungsdaten des Produktes. Sie definieren, welche Bauteile zu einem Zusammenbauteil zusammengefügt werden und mithilfe welcher Fertigungsverfahren dies realisiert wird. Weiterhin wird die Produktstruktur automatisch anhand der Produktdaten aufgebaut, sodass die Fertigungsstufen für den Nutzer sichtbar werden. Optional ist es möglich, sich eine Ansicht des importierten Produktes in dreidimensionaler Darstellung anzeigen zu lassen. Diese Anwendungsfälle sind zusammengefasst im Use-Case-Diagramm in Abbildung 36 dargestellt.

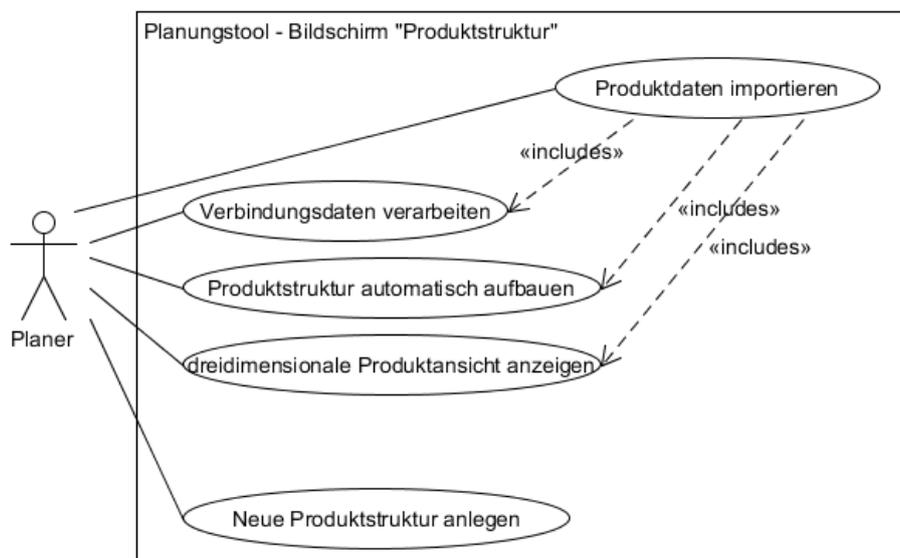


Abbildung 36: Use-Case-Diagramm des "Produktstruktur"-Bildschirms (eigene Darstellung)

Die vierte User-Story beschreibt die Anforderung an eine automatische Ableitung der zu verwendenden Fertigungsverfahren in Bezug auf die gegebene Produktstruktur. Dazu wird im Hintergrund die Produktstruktur verarbeitet und mit den Verbindungsdaten verknüpft. Daraus ergibt sich eine Übersicht über die benötigten Fügeverbindungen für jedes Fertigungsverfahren. Das bedeutet beispielweise, wie viele Schweißpunkte mit dem Widerstandsschweißverfahren oder welche Mengen an Klebstoff zum Kleben von Bauteilen notwendig sind. Weiterhin werden die im vorherigen Use-Case verarbeiteten Verbindungsdaten hier in einer Übersicht dargestellt, sodass auf einen Blick erkennbar ist, welche Bauteile zusammengesetzt werden und welches Fügeverfahren dabei zum Einsatz kommt. Diese Daten sind erneut im Falle von Korrekturen oder Änderungen anpassbar, sodass der Nutzer Modifikationen vornehmen kann. Weiterhin wird dem Nutzer auch hier die Möglichkeit gegeben, die Verbindungsdaten in Kombination mit den importierten Produktdaten in einer dreidimensionalen Ansicht anzuzeigen,

indem beispielweise Schweißpunkte an der jeweiligen Stelle visualisiert werden. Das zugehörige Use-Case-Diagramm ist in Abbildung 37 dargestellt.

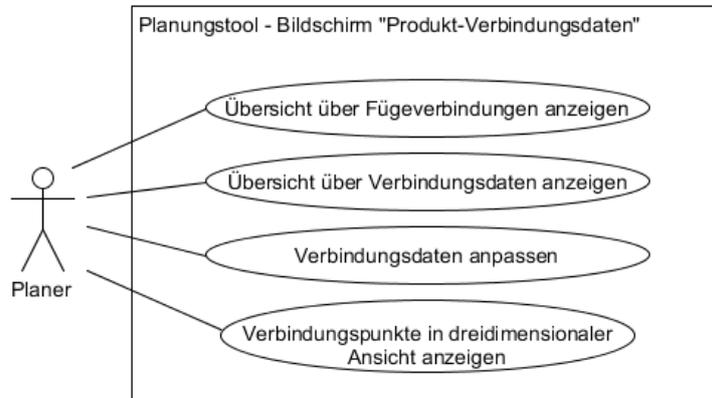


Abbildung 37: Use-Case-Diagramm des "Verbindungsdaten"-Bildschirms (eigene Darstellung)

Im nächsten Use-Case-Diagramm, welches in Abbildung 38 angegeben ist, sind mehrere User-Stories zusammengefasst, die alle einen Zusammenhang besitzen. Die fünfte User-Story bringt die Anforderung hervor, anhand aller in den vorherigen Schritten ermittelten Informationen die Fügefolgen abzuleiten und anzuzeigen. Weiterhin müssen diese auch anpassbar sein, um dem Nutzer die Möglichkeit zu geben, projektspezifische Restriktionen einzuarbeiten. Die Anforderungen, die aus der sechsten bis zur neunten User-Story abgeleitet werden, beschreiben ähnliche Funktionalitäten, aber mit einem unterschiedlichen Anspruch an den Automatisierungsgrad der Software. Die sechste User-Story beschreibt das Bedürfnis nach einer vollautomatischen Erarbeitung einer möglichst optimalen Fertigungsanlage anhand der gegebenen Daten. In diesem Fall wünscht der Nutzer eine komplett von der Software generierte Fertigungsanlage, die er lediglich im Nachhinein noch an gewisse Restriktionen anpassen möchte. Außerdem muss für diesen Fall eine Zielfunktion gegeben sein, die der Software ermöglicht auch dem Verständnis des Nutzers gegenüber eine optimale Fertigungsanlage zu erstellen. Die siebte, achte und neunte User-Story beschreiben im Gegensatz zum vollautomatischen Ansatz, der bei der User-Story zuvor noch zum Ausdruck kommt, eher den Ansatz einer benutzergeführten Generierung einer Fertigungsanlage, indem die einzelnen Planungsschritte nacheinander unter Berücksichtigung der Nutzer-Interaktion durchgeführt werden. Diese Interaktion mit dem Nutzer kann auf zwei Wegen erfolgen. Entweder der Nutzer führt die Planung der Fertigungsanlage vollständig manuell durch, indem er den Fertigungsprozess anhand der Fügefolgen selbst zusammenstellt und die geeigneten Betriebsmittel den jeweiligen Fertigungsschritten zu-

ordnet oder er lässt sich halbautomatisch schrittweise durch den Prozess der Planung führen, indem das System selbstständig Handlungsalternativen vorschlägt. Der Nutzer trifft jedoch im Gegensatz zur vollautomatischen Vorgehensweise die Entscheidungen. Auf diese zwei Arten erfolgt sowohl die qualitative und quantitative Zuordnung der Betriebsmittel als auch die Ermittlung der Takte. Dem Nutzer wird die Möglichkeit gegeben, sich für einen Anwendungsfall zu entscheiden, sodass es einen Auswahl-Bildschirm dafür gibt.

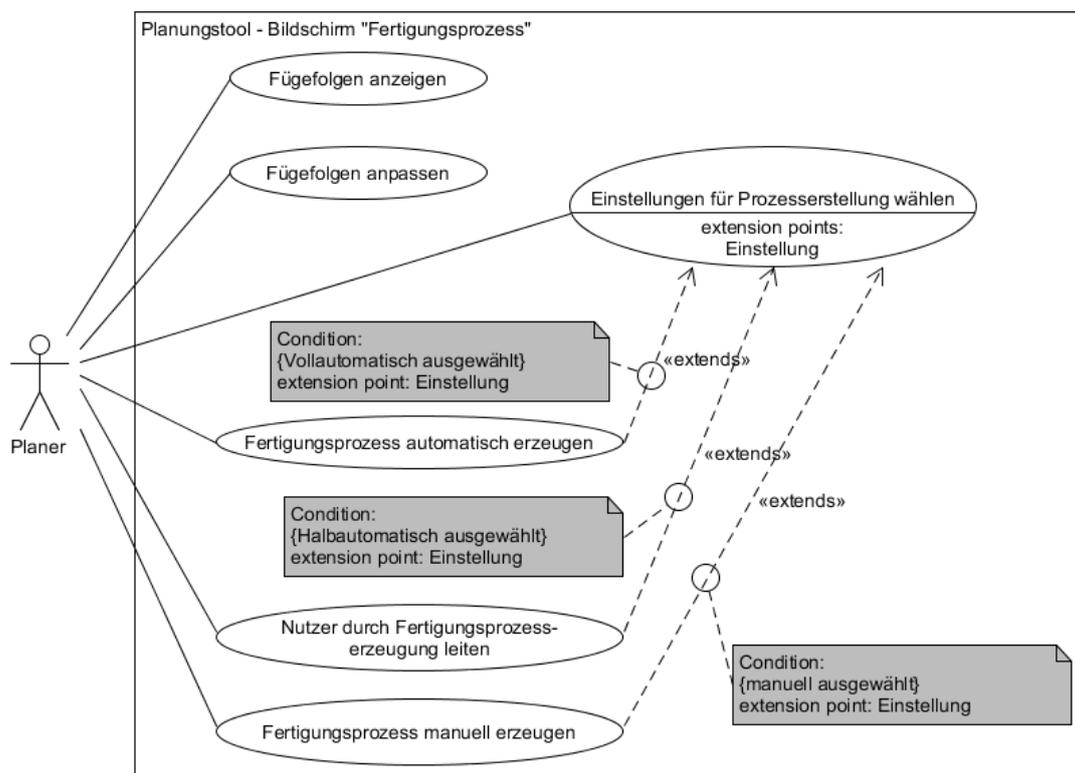


Abbildung 38: Use-Case-Diagramm des "Fertigungsprozess"-Bildschirms (eigene Darstellung)

Mit diesen User-Stories und Use-Case-Diagrammen ist das im Rahmen dieser Arbeit zu erreichende Ergebnis eines Konzeptes zur automatisierten Generierung von Fertigungsanlagen im Karosseriebau aus Anforderungssicht beschrieben. Somit findet an dieser Stelle eine Abgrenzung zu den danach folgenden Planungsschritten statt, die in Kapitel 4.2 erläutert wurden. Die entsprechenden User-Stories 10 bis 12 wurden bei der Anforderungsanalyse im Sinne der Vollständigkeit ermittelt, werden jedoch im weiteren Laufe dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Somit können aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit die Inhalte der Fertigungslosermittlung, der räumlichen Anordnung der Fertigungselemente und die Übertragung dieser in ein Layout unter

Berücksichtigung der räumlichen Restriktionen in einer weiterführenden Arbeit betrachtet werden.

In den folgenden Kapiteln werden die soeben beschriebenen Planungsschritte und Anwendungsfälle detaillierter betrachtet, um das Ergebnis eines aus Projektpremissen und Produktdaten ermittelten möglichst minimalen Mengengerüsts zu erreichen.

#### 4.4 Prämissen zur Erstellung einer Karosseriebaufertigungsanlage

Bevor die Planung einer Fertigungsanlage beginnt, werden die Prämissen zusammengetragen und definiert. Zur Ermittlung der für dieses Konzept notwendigen Prämissen wird zunächst erneut eine Auswahl an Fertigungsplanern im Karosseriebau befragt, welche Dokumente zur Sammlung der Prämissen bereits bestehen und wer die Inhalte liefert. Daraus werden die wichtigsten Prämissen mithilfe der Planer ermittelt und kategorisiert. Die Prämissen lassen sich in die drei Kategorien „Prozessspezifische Prämissen“, „Produktspezifische Prämissen“ und „Projektspezifische Prämissen“ aufteilen. Eine Übersicht der Inhalte der einzelnen Kategorien ist in Tabelle 3 gegeben.

<b>Prozessspezifische Prämissen</b>	<b>Produktspezifische Prämissen</b>	<b>Projektspezifische Prämissen</b>
<i>Prämissen, die Technik und Prozess beeinflussen</i>	<i>Prämissen, die produktseitig benötigt werden, um eine Fertigungsanlage zu planen</i>	<i>Prämissen, die abhängig vom jeweiligen Fahrzeugprojekt angepasst werden</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fügetechniken</li> <li>– Haupt- und Nebenzeiten</li> <li>– Prozess-Standards</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bauteildaten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bauteilname und -nummer</li> <li>○ Reifegrad-Kennzeichnung</li> <li>○ Bauteileigenschaften (Werkstoff, Gewicht)</li> <li>○ Varianteninformation</li> </ul> </li> <li>– Fahrzeugstrukturinformation                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reifegrad-Kennzeichnung</li> <li>○ Struktur</li> <li>○ Varianteninformation</li> </ul> </li> <li>– Verbindungsdaten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fügeverfahren, Anzahl und Teile-Nr. zu fügender Bleche</li> <li>○ Fügeverfahren-spezifische Informationen</li> </ul> </li> <li>– Standard-Fügefolgen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fahrzeugbezeichnung</li> <li>– Typflexibilität</li> <li>– Ausbringung pro Stunde</li> <li>– Gesamtverfügbarkeit</li> <li>– Taktzeit</li> <li>– Standort</li> <li>– Fertigungspersonalkosten</li> <li>– Mechanisierungsgrad</li> <li>– Neuanlagen / Integration</li> <li>– Einlege- und Zuführart</li> <li>– Logistikkonzept</li> </ul>

Tabelle 3: Prämissenübersicht

Die prozessspezifischen Prämissen beschreiben hauptsächlich die Einflussgrößen für die technologischen Umfänge. Dazu zählen zunächst die Fügetechniken an sich, die im Rahmen eines Produktionssystems von der Technologieplanung freigegeben sind und somit für die Planung einer Fertigungsanlage zur Verfügung stehen. Außerdem besitzen diese Techniken bestimmte Haupt- und Nebenzeiten, die zur Auslegung einer Anlage benötigt werden. Die Hauptzeit gibt an, wie hoch die Dauer ist, in der an dem Werkstück ein unmittelbarer Fortschritt im Sinne der Wertschöpfung erzeugt wird. Dazu gehört zum Beispiel das Setzen eines Schweißpunktes, um zwei Bauteile miteinander zu verbinden. Die Nebenzeit hingegen gibt an, wie hoch die Dauer ist, in der an dem Werkstück ein mittelbarer Fortschritt und somit keine Wertschöpfung erzeugt wird (RIEGEL 1964). Zu dieser Zeitart gehören beispielsweise Handlings-Vorgänge oder die Zeiten zum Spannen der Bauteile, um sie anschließend zu schweißen. Weiterhin dienen vorgegebene Prozessstandards als Vorgaben, um in bestimmten Situationen die Reihenfolge oder Betriebsmittelauswahl dementsprechend auslegen zu können.

Die produktspezifischen Prämissen sind hauptsächlich durch die Produktdaten gegeben und bestimmen die Bedingungen des Produktes an den Fertigungsprozess. Bei den Produktarten kann hauptsächlich zwischen Bauteildaten, Fahrzeugstrukturinformationen und Verbindungsdaten unterschieden werden. Die Bauteildaten beschreiben die wichtigsten Informationen eines einzelnen Bauteils auf der untersten Fertigungsstufe. Dabei sind besonders die Kennzeichnung des Reifegrades zum aktuellen Konstruktionsstand und die Eigenschaften des Bauteils relevant. Die Fahrzeugstrukturinformationen definieren den Zusammenbau der einzelnen Bauteile. Darin ist somit die Struktur des Produktes vom einzelnen Bauteil bis hin zur fertig produzierten Baugruppe festgeschrieben. Zusätzlich zu diesen Daten der zusammenzubauenden Bauteile werden die Verbindungsdaten benötigt, die definieren, wie die einzelnen Bauteile zusammengefügt werden. Damit sind produktseitig alle Informationen gegeben, um einen Fertigungsprozess herzuleiten. Zusätzlich existieren dazu noch Standardfügefolgen, die produktabhängig einen gewissen Umfang der Reihenfolge von Prozessschritten vorgeben.

Die projektspezifischen Prämissen sind Parameter, die konkret vom Fahrzeugprojekt und dessen Auslegungseigenschaften im Karosseriebau abhängen. Um eine Fertigungsanlage zu erstellen, ist es besonders wichtig zu wissen, welche Ausbringung die Anlage stundenweise leisten muss und welche Taktzeit dafür erforderlich ist. Die Taktzeit ist bei der Fließbandfertigung laut (WIRTSCHAFTSLEXIKON<sup>24</sup> 2015) „die Zeit, die ein einzelner Arbeitsvorgang benötigt“. Jeder Takt hat bei der Fließbandfertigung die gleiche Zeit und ist somit eine feste Größe bei der Auslegung einer Fertigungsanlage. Die

Gesamtverfügbarkeit gibt an, wie hoch der zeitliche Anteil einer störungsfreien Fertigungsanlage an der Gesamtzeit ist. Weiterhin gibt es Prämissen, die standortspezifisch sind. Dazu gehören die Fertigungspersonalkosten, der Mechanisierungsgrad und die Ausgangslage am Standort. Damit ist gemeint, ob die Fabrik schon besteht und die neuen Umfänge in die bestehenden integriert werden müssen oder ob es eine komplette Neu-Planung ist. Der Mechanisierungsgrad beschreibt den Anteil der automatisierten zu den manuellen Produktionsumfängen. Eine weitere Einflussgröße ist das Logistikkonzept und die geplanten Einlege- und Zuführarten für angeliefertes Material. Dies ist relevant, weil zum Beispiel eine Anlieferung der Bauteile in einem Behälter eine andere Betriebsmittelbelegung innerhalb einer Anlage voraussetzt als eine Zuführung der Bauteile durch einen Stauförderer.

Alle genannten Prämissen müssen als Input für die Software nutzbar sein. Das wird zum einen durch Nutzereingaben und zum anderen durch das Importieren von Projekt- und Bibliotheksdateien ermöglicht.

#### **4.5 Möglichkeiten der Modellierung von Fertigungsprozessen**

Sobald die Prämissen vorhanden sind, gilt es daraus einen Fertigungsprozess abzuleiten, der möglichst optimal gestaltet ist. Dazu wird eine Modellierungsmethode benötigt, die ausgehend von bestimmten zu definierenden Kriterien einen Fertigungsprozess abbildet. Es existieren einige Ansätze zur Modellierung von Prozessen, wobei nur sehr wenige für die Abbildung von Fertigungsprozessen spezialisiert sind. Da es allerdings keinen Modellierungsstandard gibt, werden verschiedene Modellierungsansätze miteinander verglichen. Zunächst wird dabei die Vorgehensweise zum Vergleich der einzelnen Modellierungsarten beschrieben. Um den Vergleich zu unterstützen wird anschließend ein beispielhafter Fertigungsprozess vorgestellt, der danach im Rahmen der Bewertung durch jede der untersuchten Modellierungsmethoden abgebildet wird. Bevor der Vergleich der Modellierungsarten erfolgt, werden Bewertungskriterien festgelegt und erläutert. Anschließend werden die Modellierungsmethoden vorgestellt und zusammenfassend bewertet, um als Resultat die für das weitere Vorgehen optimale Modellierungsart zu bestimmen.

##### **4.5.1 Vorgehensweise zur Bewertung der Modellierungsarten**

Das Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlungen des Bundesministeriums des Innern und des Bundesverwaltungsamtes (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015) beschreibt Verfah-

ren zum Vergleich von verschiedenen Lösungsalternativen. Dabei wird zunächst zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren unterschieden. Quantitative Verfahren weisen die Charakteristik auf, dass mengenmäßige Kriterien zum Vergleich verwendet werden. Zu diesen Verfahren gehört beispielsweise die Kostenvergleichsrechnung. Qualitative Verfahren hingegen verwenden meist Kriterien, die nicht mengenmäßig beschreibbar und nicht-monetär sind, um verschiedene Lösungsalternativen zu vergleichen. Zur Bewertung der verschiedenen Modellierungsmethoden eignen sich die qualitativen Verfahren, da keine mengenmäßig erfassbaren Kriterien zur Verfügung stehen. Ein Vertreter der qualitativen Verfahren ist die Nutzwertanalyse, bei der sowohl nicht-monetäre als auch monetäre Kriterien herangezogen werden können. Als Nutzwert definiert das Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015) „den subjektiven Wert, der durch die Eignung zur Bedürfnisbefriedigung bestimmt wird“. Das Ziel dieser Methode ist es, mehrere Lösungsalternativen miteinander anhand bestimmter Bewertungskriterien zu vergleichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs wird als Gesamtnutzwert einer Lösungsalternative bezeichnet. Aus den verschiedenen Gesamtnutzwerten wird anschließend ein Ranking erstellt. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert entspricht damit am ehesten dem durch die Bewertungskriterien vorgegebenem Zielsystem. Die Ermittlung der Gesamtnutzwerte entspricht folgender Vorgehensweise (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015):

1. *Bewertungskriterien ermitteln und gewichten*
2. *Lösungsalternativen bewerten*
3. *Ergebnis ermitteln und auswerten*

Im ersten Schritt der Nutzwertanalyse werden die Bewertungskriterien ermittelt und gewichtet. Dabei wird zwischen Muss- und Kann-Kriterien unterschieden. Muss-Kriterien umfassen diejenigen, die zur Auswahl einer Lösungsalternative unbedingt vorhanden sein müssen. Alle Alternativen, die bereits die Muss-Kriterien nicht erfüllen, werden in der Nutzwertanalyse nicht weiter untersucht und scheiden für die weitere Bewertung aus. Lediglich die Kann-Kriterien, die sich anhand der gegebenen Ziele und Anforderungen ergeben, werden im Rahmen der Nutzwertanalyse herangezogen. Da diese Bewertungskriterien jedoch eine unterschiedliche Wichtigkeit für die Bewertung

besitzen, wird zunächst eine Gewichtung vorgenommen. Durch einen paarweisen Vergleich ergeben sich danach die Gewichtungsfaktoren.

Im zweiten Schritt folgt die Bewertung der Lösungsalternativen. Diese erfolgt mithilfe der zuvor gewichteten Bewertungskriterien. Für jede Alternative wird jedem Bewertungskriterium ein Zielerfüllungsgrad vorgegeben, der beschreibt wie stark das jeweilige Bewertungskriterium ausgeprägt ist.

Im letzten Schritt wird das Ergebnis der Nutzwertanalyse ermittelt. Dazu wird für jede Kombination aus Lösungsalternative und Bewertungskriterium der Teilnutzen berechnet und anschließend daraus der Gesamtnutzwert ermittelt. Zur Auswertung dieser Berechnung wird eine absteigende Reihenfolge der Gesamtnutzwerte gebildet. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert stellt damit die geeignetste dar.

#### 4.5.2 Beschreibung eines exemplarischen Fertigungsprozesses

Zum besseren Verständnis des folgenden Vergleichs der einzelnen Modellierungsarten wird ein exemplarischer Fertigungsprozess beschrieben. Dieser Prozess stellt strukturell den Umfang eines Prozesses dar, wie er im später vorgestellten Konzept auch umgesetzt wird. Daher wird dieser Fertigungsprozess bei jeder in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsmethode benutzt, um auch graphisch den direkten Vergleich unabhängig von den Bewertungskriterien zu haben. Der folgend vorgestellte Fertigungsprozess ist sehr abstrakt und vereinfacht, beinhaltet aber die notwendigen Bestandteile. Somit gilt für alle Erläuterungen der Prozessinformationen in diesem Kapitel, dass diese keinen oder nur einen geringen Bezug zur Realität haben.

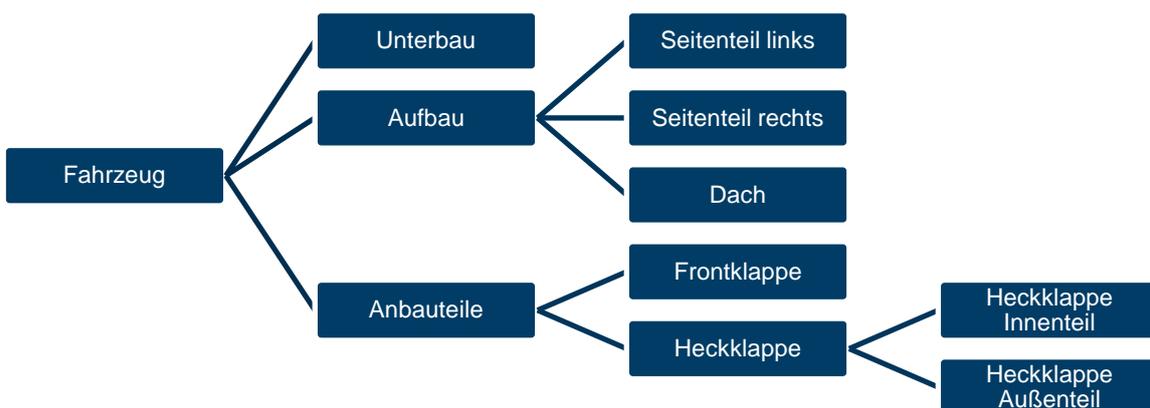


Abbildung 39: Produktstruktur des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung)

Um den Fertigungsprozess modellieren zu können, müssen einige Informationen bekannt sein. Zunächst muss die Produktstruktur vorliegen. Im hier angeführten Beispiel besteht das zu fertigende Fahrzeug aus insgesamt sieben Einzelbauteilen. Die Produktstruktur ist in Abbildung 39 dargestellt. Ergänzend zeigt die Abbildung 40 die einzelnen Bauteile der Produktstruktur in einer dreidimensionalen Visualisierung.

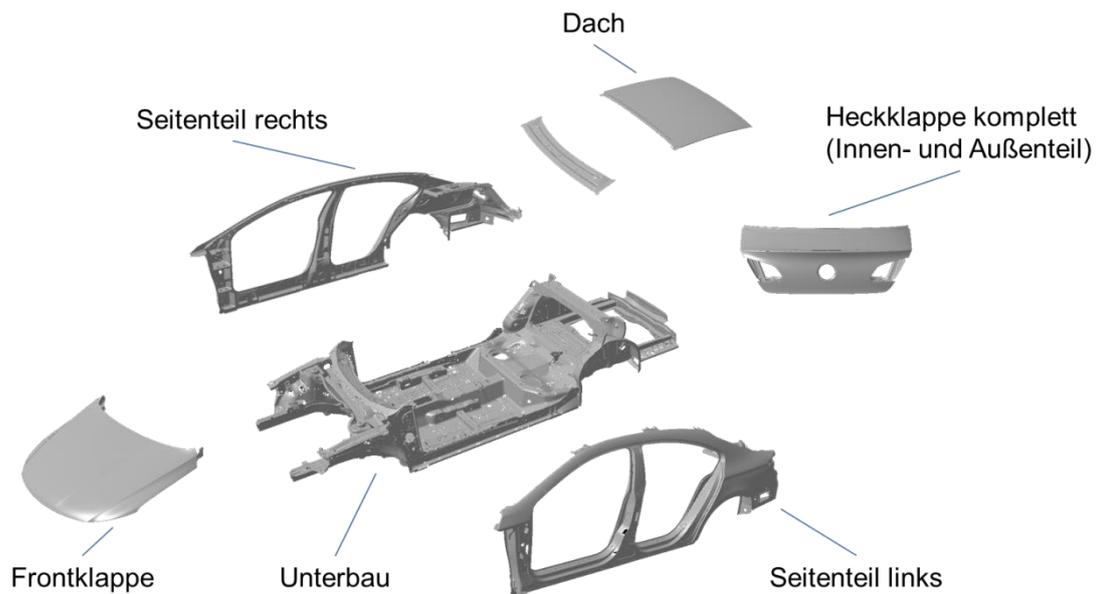


Abbildung 40: visuelle Produktstruktur des Beispiel-Produktes (HOLZKAMP 2010)

Außer der Produktstruktur wird noch die Information benötigt, welche dieser angegebenen Bauteile miteinander verbunden werden und mit welcher Fügetechnik dies realisiert wird. Diese Verbindungsdaten sind in folgender Tabelle 4 gegeben:

Bauteil 1	Bauteil 2	Fügetechnik	Mengenangabe
Unterbau	Seitenteil links	Widerstandspunktschweißen	20 Schweißpunkte
Unterbau	Seitenteil rechts	Widerstandspunktschweißen	20 Schweißpunkte
Seitenteil links	Dach	Laserschweißen	800 mm Schweißnaht
Seitenteil rechts	Dach	Laserschweißen	800 mm Schweißnaht
Heckklappe Innenteil	Heckklappe Außenteil	Kleben	2000mm Klebnaht
Unterbau	Frontklappe	Schrauben	6 Schrauben
Unterbau	Heckklappe	Schrauben	8 Schrauben

Tabelle 4: Übersicht der Verbindungsdaten des Beispiel-Produktes

Durch Angabe dieser Daten ist bekannt, welche Bauteile jeweils miteinander verbunden werden. Es existieren jedoch gewisse Restriktionen in der Reihenfolge des Zusammenbaus. Das Dach kann zum Beispiel erst mit den Seitenteilen verbunden werden, wenn diese bereits mit dem Unterbau verbunden sind. Um also aus den oben

angegebenen Daten eine Fertigungsreihenfolge abzuleiten, ist es sinnvoll eine Übersicht der sogenannten Fügefolgen zu besitzen. Als Fügefolge wird neben den Prozessschritten für den Zusammenbau von mehreren Bauteilen auch das Ergebnis davon definiert. Eine Darstellung mit den Fügefolgen, die eine Ableitung der Prozessreihenfolge ermöglicht, ist in der folgenden Abbildung 41 gegeben.

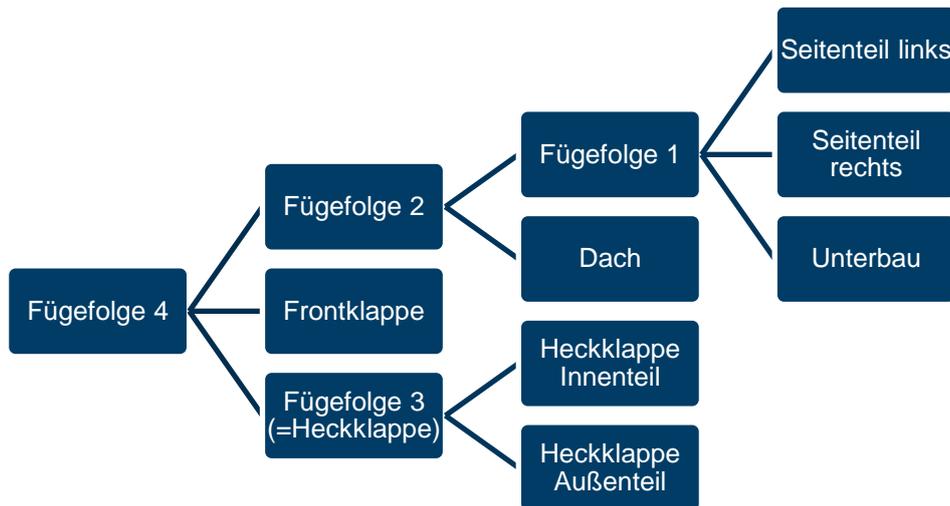


Abbildung 41: Übersicht der Fertigungsreihenfolge des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung)

Diese Darstellung der unterschiedlichen Fügefolgen lässt nun die Schlussfolgerung zu, in welcher Reihenfolge die einzelnen Fertigungsschritte zu erfolgen haben und welche Abhängigkeiten unter den Bauteilen bestehen. Zuerst müssen die Seitenteile mit dem Unterbau verbunden werden. Ob dieser Fügeprozess parallel oder seriell erfolgt, wird an dieser Stelle noch nicht entschieden. Theoretisch kann dies gleichzeitig erfolgen, jedoch ist auch eine nacheinander folgende Abarbeitung möglich. Diese Verbindung wird als „Fügefolge 1“ bezeichnet. Sie wird anschließend mit dem Dach verbunden und das daraus entstehende Zwischenprodukt als „Fügefolge 2“ bezeichnet. Daraufhin wird diese mit der Frontklappe gefügt. Unabhängig davon können das Innen- und Außenteil der Heckklappe zur gesamten Heckklappe zusammengefügt werden, welches hier als „Fügefolge 3“ bezeichnet wird. Abschließend werden die Frontklappe und die beiden Zwischenprodukte der Fügefolgen 2 und 3 zum finalen Produkt gefügt. Diese mögliche Reihenfolge ist in der Abbildung 42 dargestellt. Dabei wird bewusst auf eine bestimmte Modellierungsart verzichtet und lediglich eine schematische Abbildung gegeben, um nicht auf den anschließend folgenden Vergleich der verschiedenen Modellierungsmethoden vorzugreifen. Die blauen Rechtecke mit abgerundeten Ecken beschreiben in der Abbildung die Prozessschritte und die grauen Rechtecke stellen die Zwischenprodukte dar.

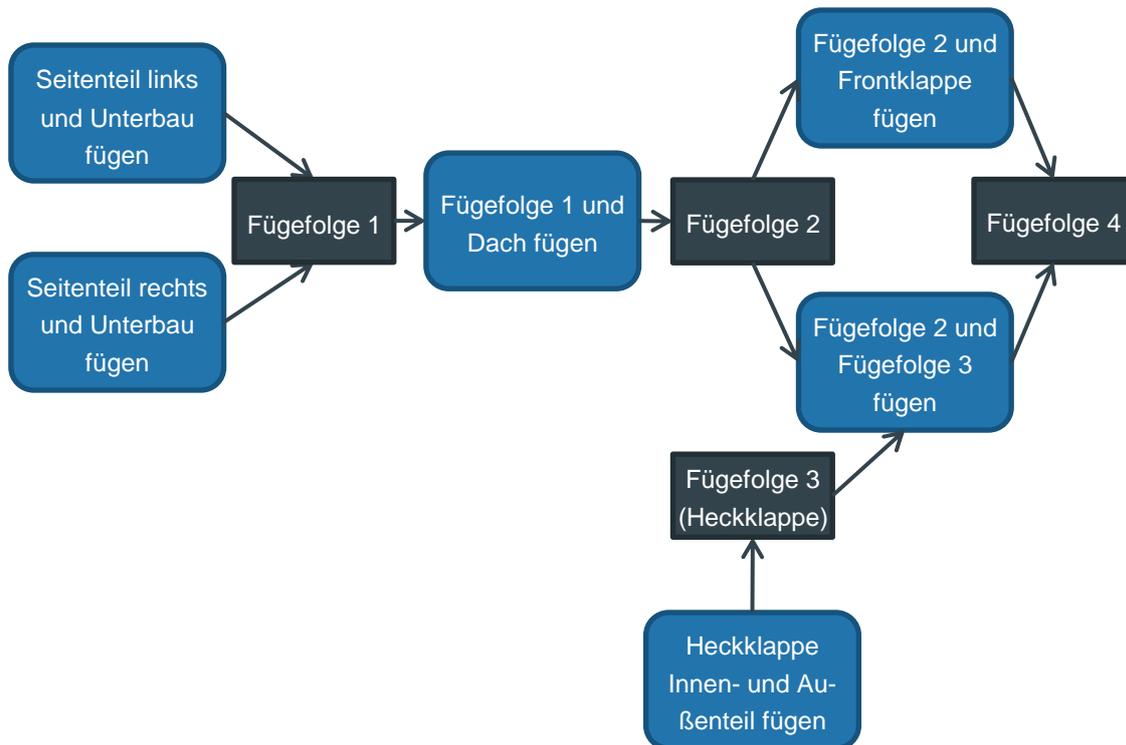


Abbildung 42: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses des Beispiel-Produktes (eigene Darstellung)

Neben diesen produktspezifischen Prämissen sind noch die projektspezifischen Prämissen bekannt. Dabei ist von einem hohen Mechanisierungsgrad auszugehen. Das bedeutet, dass die Mehrheit der eingesetzten Ressourcen automatisiert ist. Außerdem soll nur ein Fahrzeugtyp gefertigt werden, was einen variantenabhängigen Materialfluss ausschließt. Die Taktzeit in dieser Fertigungsanlage beträgt 60 Sekunden.

Weiterhin sind auch die prozessspezifischen Prämissen vorhanden. Für jede der in Tabelle 4 genannten Techniken gibt es eine Annahme zur Prozesszeit. Diese Zeiten sind für jedes der in diesem Prozess notwendigen Fügeverfahren in Tabelle 5 angegeben.

Fügetechnik	Prozesszeit/Einheit
Widerstandspunktschweißen	4 sec/Schweißpunkt
Laserschweißen	10 mm/sec
Kleben	35 mm/sec
Schrauben	5 sec/Schraube

Tabelle 5: Übersicht der genutzten Fügetechniken

Aus den in Tabelle 4 aufgeführten Fügeverbindungen und den soeben aufgezählten Prozesszeiten ergibt sich auch die Notwendigkeit der folgenden Ressourcen in Tabelle 6, um in einem 60 Sekunden andauernden Fertigungstakt die erforderlichen Fügeverbindungen zu setzen.

Bauteil 1	Bauteil 2	Erforderliche Ressourcen
Unterbau	Seitenteil links	2 Roboter mit Schweißzange
Unterbau	Seitenteil rechts	2 Roboter mit Schweißzange
Seitenteil links	Dach	2 Roboter mit Laserschweißwerkzeug
Seitenteil rechts	Dach	2 Roboter mit Laserschweißwerkzeug
Heckklappe Innenteil	Heckklappe Außenteil	1 Roboter mit Klebepistole
Unterbau	Frontklappe	1 Roboter mit Schraubwerkzeug
Unterbau	Heckklappe	1 Roboter mit Schraubwerkzeug

Tabelle 6: Übersicht der benötigten Füge-Betriebsmittel

Damit sind alle Informationen bekannt, die ihren Einfluss in dem zu konstruierenden Modell haben. Dieser soeben vorgestellte Fertigungsprozess mit den zugehörigen Prozesszeiten und Ressourcen dient als Grundlage der Bewertung von unterschiedlichen Modellierungsarten.

### 4.5.3 Bewertung der Modellierungsarten

Nachdem im vorherigen Kapitel die Informationsbasis zur Erstellung eines Modells festgelegt wurde, geht es in dem folgenden Kapitel darum diese Erkenntnisse mithilfe von verschiedenen Modellierungsmethoden zu modellieren. Dabei werden zunächst die für die Bewertung notwendigen Kriterien beschrieben und nach ihrer Wichtigkeit für das Zielsystem gewichtet. Anschließend werden die zu bewertenden Modellierungsarten vorgestellt und der im vorherigen Kapitel erarbeitete Fertigungsprozess mit den Mitteln der jeweiligen Modellierungsmethode abgebildet. Zum Abschluss folgt eine zusammenfassende Bewertung, die hervorbringt, welche Modellierungsart sich am ehesten für das Erreichen der Ziele eignet.

#### 4.5.3.1 Beschreibung der Bewertungskriterien

Zur Beurteilung der verschiedenen Methoden und Konzepte zur Modellierung wird in dieser Arbeit die Nutzwertanalyse verwendet. Für diese ist es notwendig Bewertungskriterien zu bestimmen. Dabei wird zwischen Muss- und Kann-Kriterien unterschieden. Muss-Kriterien sind Eigenschaften, die bei einer Modellierungsmethode zwingend erforderlich sind, um in der weiteren Untersuchung betrachtet zu werden. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Modellierungsarten sind diese bereits berücksichtigt. Die

Muss-Kriterien umfassen die Fähigkeit der Prozessdarstellung und eine vorhandene graphische Notation. Die Kann-Kriterien hingegen müssen nicht unbedingt in vollem Umfang erfüllt sein. Für diese gilt, dass sie dem Zielsystem entsprechend gewichtet werden und sich somit eine Abstufung bildet. In den folgenden Abschnitten werden diese Bewertungskriterien näher erläutert.

### **Darstellbarkeit des Materialflusses**

Um einen Fertigungsprozess abbilden zu können, ist es notwendig auch den dazugehörigen Materialfluss darstellen zu können. Unter dem Materialfluss wird laut VDI-Richtlinie 3300 die „Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1973) verstanden. Das bedeutet, dass im Modell sowohl die Fertigungselemente als auch die Fertigungsvorgänge und deren Beziehungen in Form von Abläufen erkennbar sein müssen. Auf Seiten der Fertigungselemente geht es im Speziellen um die Abbildung von Input, Output und Zwischenprodukten. Außerdem soll die Möglichkeit gegeben sein, Puffer darzustellen. Fertigungsvorgänge werden hauptsächlich durch die Fügefolgen und die Bewegung des Materials abgebildet. In den Abläufen selber muss es möglich sein, sowohl Zusammenführungen von Teilprozessen als auch Verzweigungen zu parallelen Teilprozessen zu beschreiben. Der Materialfluss soll lediglich statisch abbildbar sein. Eine dynamische Modellierung zum Beispiel in Form einer Simulation ist nicht erforderlich.

### **Hierarchisierung**

Das Modell soll dem Modellierer und Betrachter die Möglichkeit geben je nach gewünschtem Detaillierungsgrad die jeweilige Abstraktionsebene zu betrachten. Außerdem sollen auf den verschiedenen Modellhierarchieebenen auch unterschiedliche Informationen zuordenbar sein. Die Detaillierung der Informationen steigt dabei in der Hierarchie von oben nach unten. Auf der obersten Ebene wäre damit die Übersicht einer kompletten Karosseriebau-Fertigung vorstellbar, wohingegen auf der untersten Ebene die verfeinerte Ansicht einer Fertigungsstation sichtbar ist. Eine Möglichkeit der Navigation durch diese Ebenen innerhalb des Modells muss bestehen. Dieser Aspekt führt automatisch auch zu einer besseren Übersichtlichkeit.

### **Abbildbarkeit von Ressourcen**

Die einem Fertigungsschritt zugeordneten Ressourcen dienen dem Anlagenplaner als ein Anhaltspunkt bei der technischen Umsetzung der Anlage und stellen somit einen bedeutenden Punkt bei der Abbildung des Fertigungsprozesses dar. Somit soll es möglich sein, mithilfe der Modellierungsmethode Ressourcen auf eine Art und Weise abzubilden, die den Informationsgehalt des Modells erhöht, ohne die Übersichtlichkeit des Modells negativ zu beeinflussen. Es ist somit nicht unbedingt erforderlich die Ressourcen in Form von graphischen Elementen darzustellen. Außerdem sollen die Ressourcen unterscheidbar und parametrierbar sein, indem sie Attribute, wie beispielsweise Betriebsmittelart, -bezeichnung oder -menge besitzen.

### **Zuordenbarkeit von Attributen**

Die Modellierungsmethode soll die Möglichkeit bieten, zusätzlich zu den graphischen Informationen des Fertigungsprozesses, den einzelnen Elementen Eigenschaften zuzuordnen. Zu solchen Eigenschaften zählen beispielweise Zeitangaben, wie die Taktzeit auf Fertigungsanlagenebene oder Prozesszeiten auf Stationsebene. Außerdem können nähere Informationen zur Fügetechnik und deren Parameter beschrieben werden. Darauf basiert die Funktionalität der automatisierten Erstellung eines Fertigungsprozesses und die Flexibilität eines Modells wird gewährleistet. Durch die Möglichkeit Bewertungskennzahlen zum Beispiel in Form von wirtschaftlichen Kennzahlen oder technischen Verfügbarkeitswerten anzugeben, wird die Bewertung eines Fertigungsprozesses anhand bestimmter Kriterien ermöglicht. Weiterhin bieten die Attribute einen Ansatz für ein zu hinterlegendes Datenmodell.

### **Erweiterbarkeit**

Auch das Kriterium der Erweiterbarkeit sorgt für eine höhere Flexibilität des Modells. Daher ist dieser Punkt auch verbunden mit der zuvor beschriebenen Möglichkeit, Attribute zum Modell hinzuzufügen. Jedoch geht die Erweiterbarkeit noch darüber hinaus, indem auch die Möglichkeit bestehen soll, durch Anpassungen am Meta-Modell neue Modellelemente hinzuzufügen. Auch wenn es für den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall nicht notwendig ist, beispielsweise verschiedene Produktvarianten im Materialfluss oder Steuerungsinformationen als Informationsfluss darzustellen, soll das Modell dahingehend erweiterbar sein.

### **Verständlichkeit**

Da das Modell hauptsächlich durch die Fertigungsplaner erstellt und betrachtet wird, ist es wichtig, dass diese es auch verstehen. Die Modellierungsmethode darf somit keine komplexe Syntax oder komplizierten Modellierungsregeln aufweisen. Es sollte so einfach wie möglich und komplex wie nötig sein. Außerdem spielt die Kommunizierbarkeit eine Rolle, welche es einem Anwender ermöglicht, mit einem unbeteiligten Gesprächspartner über das Modell zu diskutieren, ohne dessen Syntax ausführlich zu erläutern. Weiterhin muss die Übersichtlichkeit gegeben sein.

#### **4.5.3.2 Gewichtung der Bewertungskriterien**

Um jedem Bewertungskriterium bei der Nutzwertanalyse eine angemessene Wichtigkeit zuzuordnen, werden diese gewichtet. Je höher ein Kriterium gewichtet ist, umso wichtiger ist es für das Zielsystem. Damit der subjektive Aspekt bei der Beurteilung der Modellierungsmethoden im Rahmen der Nutzwertanalyse so weit wie möglich minimiert wird, erfolgt die Zuteilung der Gewichtungsfaktoren zu den einzelnen Modellierungsmethoden anhand der in (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015) beschriebenen Vorgehensweise. Dort werden die Gewichtungsfaktoren mithilfe eines paarweisen Vergleichs ermittelt. Dabei wird jedes Bewertungskriterium mit jedem anderen verglichen. Das wichtigere Bewertungskriterium erhält dabei zwei Punkte und das unwichtigere null Punkte. Sollten beide Kriterien als gleich wichtig erachtet werden, erhalten beide einen Punkt. Als Werkzeug für die Durchführung dieses Vergleichs dient eine Paar-Vergleichsmatrix. Diese ist für die Ermittlung der jeweiligen Gewichtungsfaktoren in Tabelle 7 gegeben.

Legende: vertikal wichtiger = 2 gleichberechtigt = 1 horizontal wichtiger = 0		1	2	3	4	5	6
		Darstellung Materialfluss	Hierarchisierung	Abbildbarkeit von Ressourcen	Zuordenbarkeit von Attributen	Erweiterbarkeit	Verständlichkeit
1	Darstellung Materialfluss		0	0	0	0	0
2	Hierarchisierung	2		2	2	0	2
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	2	0		1	2	2
4	Zuordenbarkeit von Attributen	2	0	1		1	1
5	Erweiterbarkeit	2	2	0	1		2
6	Verständlichkeit	2	0	0	1	0	
<b>Summe</b>		<b>10</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>7</b>
100% = 30		33,33%	6,67%	10,00%	16,67%	10,00%	23,33%

Tabelle 7: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren für die Bewertungskriterien

Aus diesem Vergleich geht hervor, dass die Darstellung des Materialflusses der wichtigste Aspekt bei der Bewertung der Modellierungsmethoden ist. Darauf folgt die Verständlichkeit des Modells und die Möglichkeit Attribute zuzuordnen. In der zweiten Hälfte der Rangfolge der Gewichtungsfaktoren liegen die Abbildbarkeit von Ressourcen, die Erweiterbarkeit des Modells und die Hierarchisierung.

Für die nachfolgende Bewertung der einzelnen Modellierungsarten wird jedem Bewertungskriterium ein sogenannter Zielerfüllungsfaktor zugeordnet. Dieser beschreibt mit welcher Ausprägung die jeweilige Modellierungsart ein bestimmtes Bewertungskriterium erfüllt. Zur Ermittlung der Zielerfüllungsfaktoren wird eine Wertskala benötigt, die einem Ausprägungsgrad einen Wert zuordnet. Bei der Nutzwertanalyse wird klassischerweise eine Skala von null bis zehn verwendet, wobei eine Bewertung von null aussagt, dass das Kriterium gar nicht erfüllt ist und eine Bewertung von zehn die Idealösung darstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch die Wertskala der VDI-Richtlinie 2225 (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1997) verwendet. Diese bietet lediglich ein Bewertungsintervall von null bis vier. Damit ist die Bewertung wesentlich nachvollziehbarer vorzunehmen. Ein Mapping der beiden Wertskalen ist in Tabelle 8 dargestellt.

VDI Richtlinie 2225 (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE 1997)		Klassische Nutzwertanalyse	
Bewertung	Bedeutung	Bewertung	Bedeutung
4	Sehr gut	10	Ideallösung
		9	Über Zielvorstellung hinausgehende Lösung
		8	Sehr gute Lösung
3	Gut	7	Gute Lösung
		6	Gute Lösung mit geringen Mängeln
2	Ausreichend	5	Befriedigende Lösung
		4	Ausreichende Lösung
1	Gerade noch tragbar	3	Tragbare Lösung
		2	Schwache Lösung
0	Unbefriedigend	1	Sehr mangelhafte Lösung
		0	Praktisch unbrauchbare Lösung

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Bewertungsskalen nach (MEIER 2002)

In den folgenden Abschnitten werden sieben verschiedene Modellierungsmethoden miteinander verglichen. Dabei wird jede Methode kurz erläutert und die Elemente der Notation werden den innerhalb eines Fertigungsprozesses notwendigen Elementen zugeordnet. Darauf aufbauend wird der in Kapitel 4.5.2 vorgestellte Beispielprozess mit der jeweiligen Modellierungsart modelliert und anschließend mithilfe der Nutzwertanalyse bewertet, indem jedem Bewertungskriterium der Zielerfüllungsgrad zugeordnet wird.

#### 4.5.3.3 Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS)

Allgemeine Erläuterungen des ARIS-Konzepts sind bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben. Daher wird in diesem Abschnitt der Fokus auf die Abbildung des Fertigungsprozesses mit den Werkzeugen, die ARIS bereitstellt, beschrieben. Eines davon ist die erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK), die ebenso bereits im Kapitel 2.3.3 erklärt ist. Im Rahmen des ARIS-Konzeptes bietet die eEPK die besten Möglichkeiten, einen Fertigungsprozess abzubilden. Damit dieser modelliert werden kann, findet zunächst eine Zuordnung der Notationselemente einer eEPK und den in einem Fertigungsprozess entsprechenden Bedeutungen statt. Diese ist in Tabelle 9 gegeben. In der linken Spalte befindet sich die graphische Notation der einzelnen Elemente einer eEPK. Die mittlere Spalte gibt an, wie diese Elemente in der eEPK benannt sind. Die rechte Spalte beschreibt die Interpretation dieser Elemente im Kontext eines Fertigungsprozesses.

Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Ereignis	Zustand vor / nach Fügeprozess
	Funktion	Fügeprozess
	XOR-Verknüpfung	Typenabhängiger Fluss
	AND-Verknüpfung	Zusammenbau von Bauteilen
	Informationsobjekt	Bauteil / Zwischenprodukt / Produkt
	Organisatorische Einheit	Ressourcen
	Prozesswegweiser	Hierarchisierung der Fertigungsanlagen
	Datenfluss	Materialfluss

Tabelle 9: Notationselemente der eEPK und Interpretation für Fertigungsprozesse

Da alle notwendigen Komponenten, die auch in der graphischen Beschreibung des Fertigungsprozesses vorkommen sollen, mit den Elementen einer eEPK abbildbar sind, kann dieser modelliert werden. Dabei wird zunächst der Prozess auf der untersten Modellierungsebene mit höchstem Detaillierungsgrad erstellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 43 sichtbar.

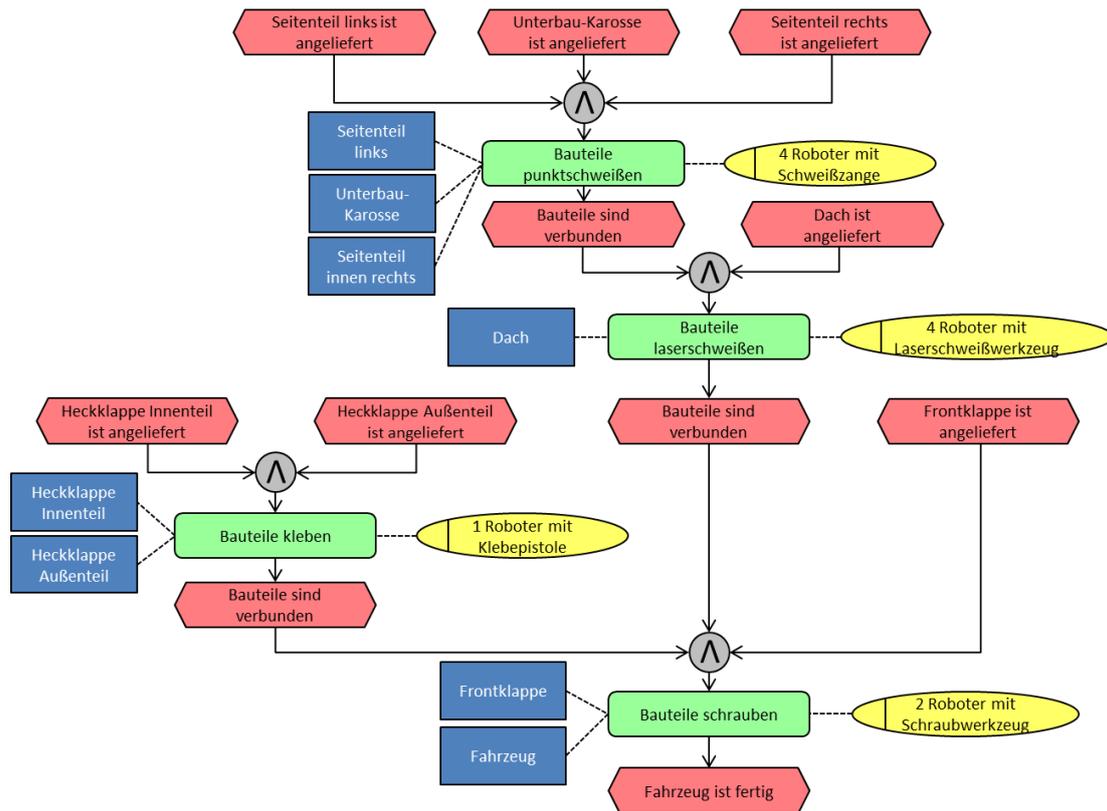


Abbildung 43: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer eEPK (eigene Darstellung)

Durch die abwechselnde Folge von Ereignissen und Funktionen bildet sich der Fertigungsfluss. Jedem Prozessschritt sind dabei die eingesetzten Ressourcen in Form von Organisationseinheiten und die beteiligten Bauteile in Form von Informationsobjekten zugeordnet. Der genaue Materialfluss ist jedoch nicht eindeutig erkennbar, da die Bauteile und Zwischenprodukte nicht direkt im Prozessablauf dargestellt sind, sondern den Funktionen zugeordnet sind. Weiterhin bieten die Ereignisse für diesen Anwendungszweck keinen Mehrwert für den Nutzer. Die Zuordnung der Ressourcen kann zudem bei umfangreicheren Prozessen die Übersichtlichkeit stark verringern. Mithilfe eines zusätzlichen Modells in der Datensicht von ARIS lassen sich ergänzend die im Fertigungsprozess enthaltenen Produktdaten verarbeiten, indem die Produktstruktur abgebildet wird. Eine hierarchische Untergliederung der Ressourcen ist durch ein Organigramm möglich. Weitere Attribute, die einen Prozessschritt näher beschreiben sind jedoch nicht sinnvoll abbildbar. Durch das Verwenden eines Prozesswegweisers lässt sich der Prozess jedoch hierarchisieren. Dies ist in Abbildung 44 dargestellt.

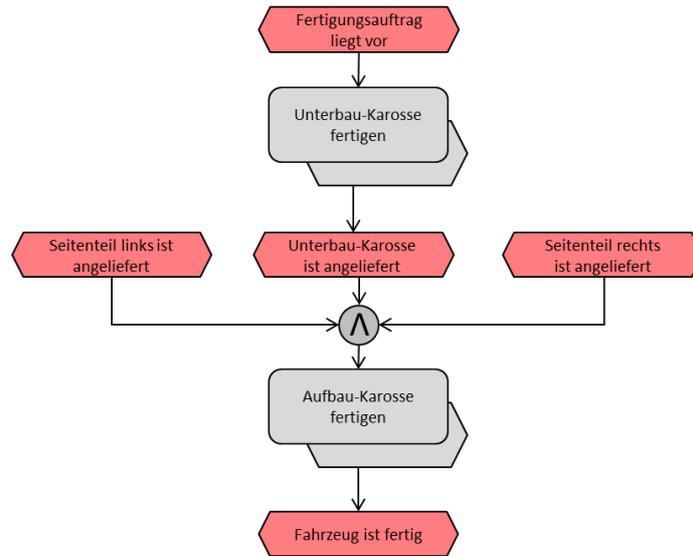


Abbildung 44: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer eEPK (eigene Darstellung)

Da bei einer eEPK allerdings vor und nach jedem Prozesswegweiser die jeweils vor- und nachgelagerten Ereignisse als Verknüpfung abgebildet werden, kann dies zu Missverständnissen führen, da nur ein Teil der Bauteile als Input und Output benannt wird. Die innerhalb eines Prozesswegweisers beschriebenen Bauteile sind nicht erkennbar. Abschließend ist in Tabelle 10 die Bewertung von ARIS bezüglich der Bewertungskriterien angegeben.

Bewertung ARIS			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	3	Materialflussabbildung möglich; Ereignisse ohne Mehrwert für Materialflussdarstellung; keine explizite Darstellung von Puffern
2	Hierarchisierung	4	es besteht die Möglichkeit über Prozesswegweiser ein hierarchisches Modell aufzubauen
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	3	Ressourcen können mit dem Symbol für eine der Aktivität zugeordnete Organisationseinheit abgebildet werden
4	Zuordenbarkeit von Attributen	1	lediglich in geringem Umfang über Informationsobjekte möglich
5	Erweiterbarkeit	2	durch eine Anpassung des Meta-Modells ist eine Erweiterung möglich
6	Verständlichkeit	2	Abbildung von Ereignissen erschwert die Verständlichkeit; wenn Ressourcen abgebildet werden steigt Unübersichtlichkeit

Tabelle 10: Bewertung der Modellierungsmethode "ARIS"

#### 4.5.3.4 Unified Modeling Language (UML)

Die Unified Modeling Language bedeutet starr übersetzt „vereinheitlichte Modellierungssprache“. Sie stellt eine von der Object Management Group (OMG) entwickelte Sprache dar, die standardisiert ist und hauptsächlich zur Modellierung von Informationssystemen aus verschiedenen Sichten dient. (BOOCH et al. 2006)

Der Vorteil ist, dass sie leicht zu erlernen ist und einen großen Umfang an unterschiedlichen Modellarten zur Verfügung stellt. Aufgeteilt werden diese nach Verhaltens- und Strukturmodellen (GRECHENIG 2010). Eine Übersicht der in der UML enthaltenen Modelle ist in Abbildung 45 dargestellt.

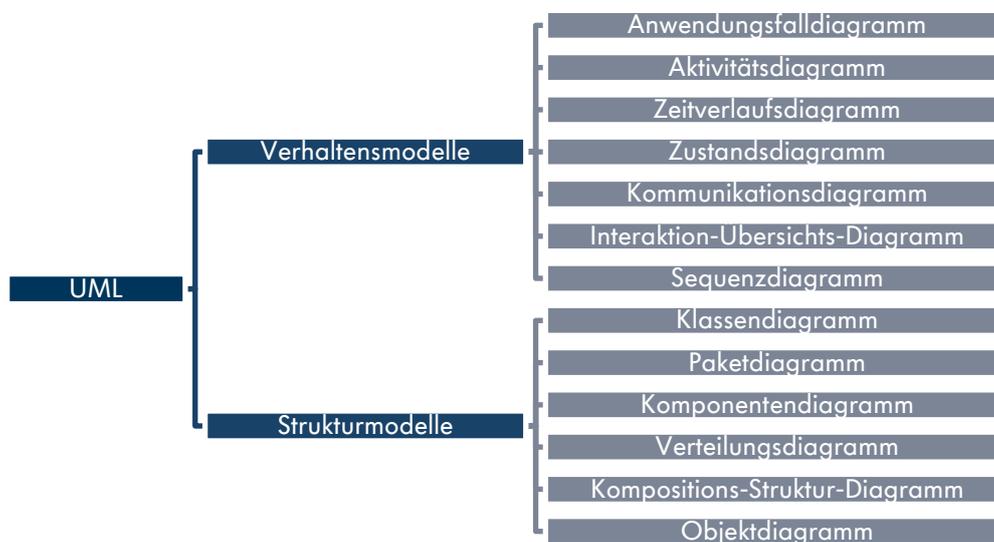


Abbildung 45: Übersicht der Modellarten der UML nach (GRECHENIG 2010)

Die Existenz der Struktur- und Verhaltensmodelle innerhalb der UML lässt die Modellierung eines Systems aus unterschiedlichen Sichten zu. Das gilt auch für Produktionssysteme. Um den Fertigungsprozess abzubilden, eignet sich am ehesten das Aktivitätsdiagramm, das zur Kategorie der Verhaltensmodelle gehört. In einem Aktivitätsdiagramm wird für eine bestimmte übergeordnete Aktivität die Abfolge der einzelnen untergeordneten Aktionen modelliert. Dabei kann sowohl ein Kontrollfluss als auch ein Objektfluss modelliert werden. In der Tabelle 11 ist die innerhalb eines Aktivitätsdiagramms definierte Notation mit der zugehörigen Interpretation für einen Fertigungsprozess angegeben.

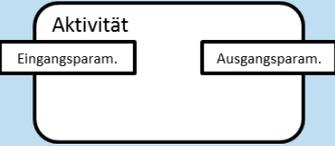
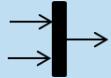
Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Aktivität	Anlage (Eingangsparam.:Bauteil-Input / Ausgangsparam.: ZSB-Output)
	Aktion	Fügeoperation inkl. Objekt-Input und Output
	Aktion mit Verknüpfung	Obere Hierarchieebenen im Fertigungsprozess
	Startknoten	Start des Kontrollflusses
	Endknoten	Ende des Kontrollflusses
	Entscheidung / Zusammenführung	Aufteilung und Zusammenführung von typenabhängigen Flüssen
	Synchronisation	Zeitlose Zusammenführung von Bauteilen
	Signal	Steuersignale
	Zeitereignis	Taktzeit
	Kante (Objektfluss / Kontrollfluss)	Objektfluss: Materialfluss Kontrollfluss: Signalfluss

Tabelle 11: Notationselemente des Aktivitätsdiagramms und Interpretation für Fertigungsprozesse

An dieser Abbildung lässt sich erkennen, dass alle für einen Fertigungsprozess notwendigen Notationselemente im Aktivitätsdiagramm vorhanden sind. Selbst weiterführende Elemente, wie das Signal, sind enthalten und können bei einer Erweiterung verwendet werden. In Abbildung 46 wird der Beispiel-Fertigungsprozess mithilfe eines Aktivitätsdiagrammes dargestellt.

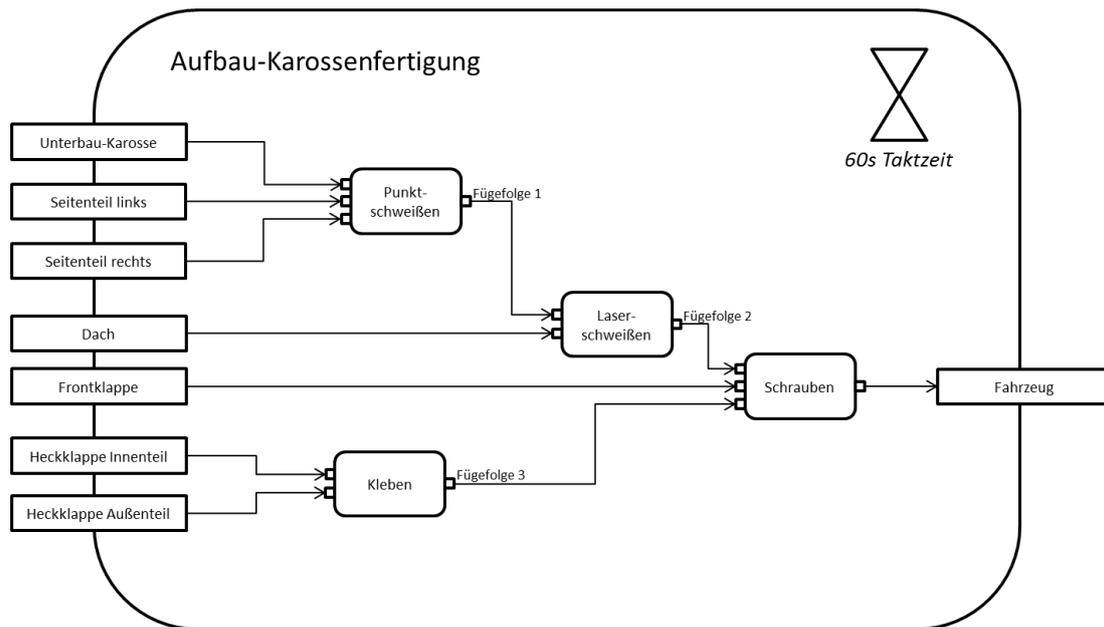


Abbildung 46: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung)

Der Fertigungsprozess kann in einem Aktivitätsdiagramm sehr übersichtlich dargestellt werden. Gerade die explizite Abbildung des Input und Output durch die Pin-Objektknoten-Darstellung sowohl für die gesamte Fertigungsanlage als auch für jede Aktion selber sorgt für eine gute Verständlichkeit. Außerdem lässt sich die vorgegebene Taktzeit abbilden. Lediglich die Abbildung von Ressourcen oder Attributen ist im Aktivitätsdiagramm nicht direkt möglich. Um diese Zuordnung trotzdem durchzuführen, ist die Einführung einer weiteren Sicht in Form eines Strukturmodells erforderlich. Dazu eignet sich beispielsweise das Klassendiagramm für die allgemeine Struktur beziehungsweise die Modellierung der Objektinstanzen in Form eines Objektdiagramms. Letzteres beschreibt für jede Aktion die Eigenschaften und Parameter. Eine mögliche Darstellung dazu ist in Abbildung 47 angegeben. Es ist zu beachten, dass dadurch zusätzliche Attribute und Eigenschaften nur in struktureller Form gegeben werden. Eine bildhafte und graphische Abbildung ist damit nicht direkt möglich.

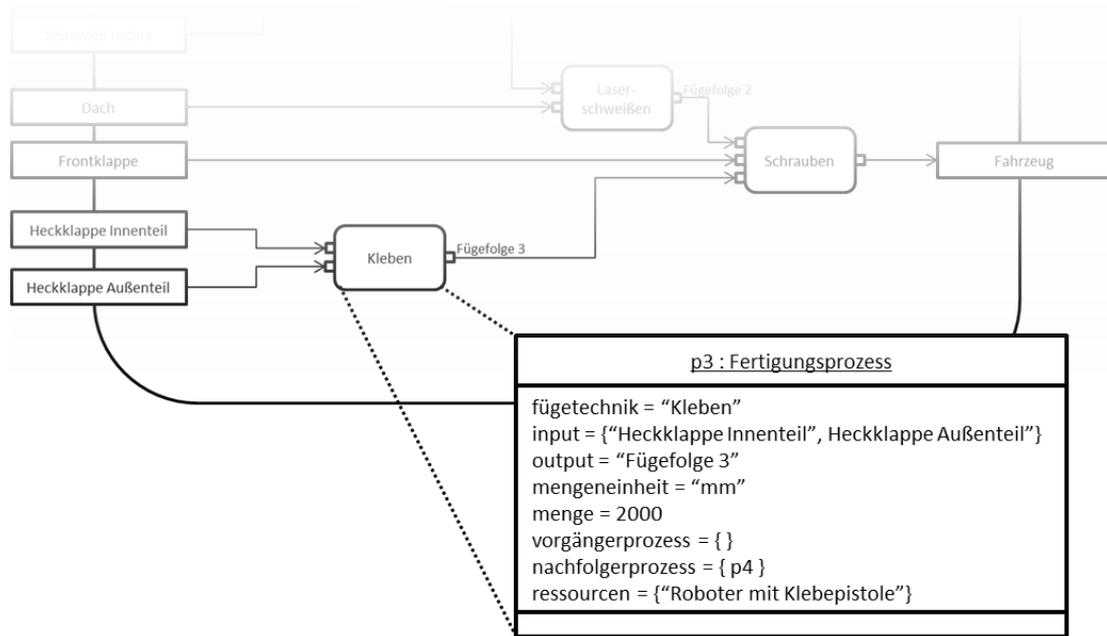


Abbildung 47: Ergänzung des Aktivitätsdiagramms um Elemente des Objektdiagramms (eigene Darstellung)

Weiterhin gibt es auch beim Aktivitätsdiagramm die Möglichkeit, Aktivitäten hierarchisch zu gliedern. Zu diesem Zweck existieren spezielle Aktionen, die zusätzlich mit einem Gabel-Symbol gekennzeichnet sind. Diese Aktionen werden dann wiederum durch eine eigene Aktivität in einem Aktivitätsdiagramm modelliert. Für den gegebenen Beispiel-Prozess ergibt sich das in Abbildung 48 angegebene Bild.

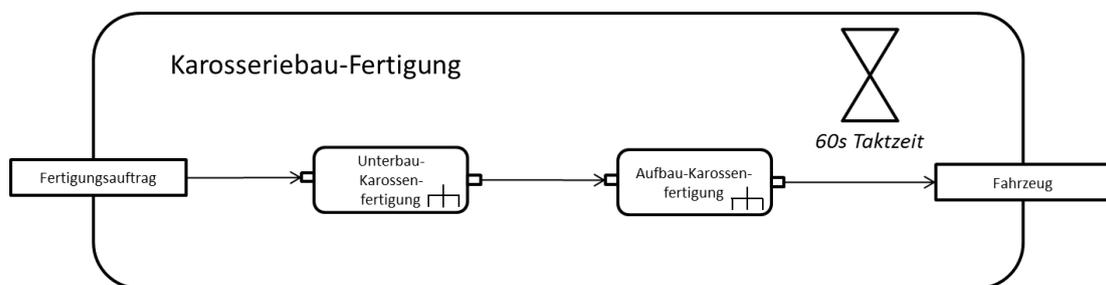


Abbildung 48: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung)

Diese Darstellung gibt dem Modellierer die Möglichkeit einen Fertigungsprozess von der obersten bis zur untersten Hierarchieebene zu modellieren. Auf der untersten Hierarchieebene resultiert eine Aktivität immer in einer Folge von Aktionen. Die Beziehung zu möglichem Input und Output lässt sich dabei auf jeder Modellierungsebene klar erkennen. Folgend ist in Tabelle 12 eine zusammenfassende Bewertung mithilfe der Nutzwertanalyse gegeben.

Bewertung UML			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	4	Materialflussabbildung ohne Einschränkung möglich; Input, Output und Zwischenprodukte klar erkennbar
2	Hierarchisierung	4	es besteht die Möglichkeit, Aktivitäten zu verfeinern und somit ein hierarchisches Modell aufzubauen
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	2	Ressourcen können im Aktivitätsdiagramm nicht abgebildet werden, jedoch durch Verbindung mit Objektdiagramm
4	Zuordenbarkeit von Attributen	4	Attribute können über Verbindung mit Objektdiagramm den Aktivitäten zugeordnet werden
5	Erweiterbarkeit	2	durch eine Anpassung des Meta-Modells ist eine Erweiterung möglich
6	Verständlichkeit	3	Materialfluss und Prozessablauf klar erkennbar; Ressourcen und Attribute werden extrahiert dargestellt

Tabelle 12: Bewertung der Modellierungsmethode "UML"

#### 4.5.3.5 Business Process Modeling Notation (BPMN)

Die Business Process Modeling Notation ist eine Art der Geschäftsprozessmodellierung und bietet hauptsächlich bei der Beschreibung von Workflows innerhalb eines Unternehmens und der Kollaboration mit den Gesprächspartnern einen Nutzen. Seit 2006 hat die Object Management Group (OMG) die BPMN in ihrer Version 1.0 als Standard definiert. Im Jahre 2010 folgte die BPMN Version 2.0 als neuer Standard. Dieser gilt für die Modellierung von Geschäftsprozessen in graphischer und XML-basierter Art und Weise durch die Bereitstellung von Symbolen und Elementen sowie deren Anordnung zu einem Prozess. Die BPMN stellt zwei Ebenen zur Verfügung: eine graphische Ebene für die fachliche Geschäftswelt und eine formale Prozessgrammatik für die Welt der IT. Die definierte Semantik gilt dabei als sehr präzise und reichhaltig. (LINDENBACH & GÖPFERT 2013)

Da die BPMN hauptsächlich für die Modellierung von Geschäftsprozessen entwickelt wurde, ist eine Interpretation der Notationselemente für einen Fertigungsprozess notwendig. Diese übersetzende Zuordnung ist in Tabelle 13 angegeben.

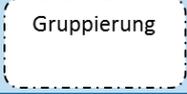
Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Aufgabe	Fügeoperation
	Zugeklappter Teilprozess	Anlage
	Exklusives Gateway	Typabhängiger Fertigungsfluss
	Paralleles Gateway	Zusammenbau von Bauteilen
	Gruppierung	Schutzkreis
	Datenobjekt	Bauteil / Zusammenbauteil
	Datenspeicher	Puffer
	Signal-Ereignis	Steuerungssignal
	Startereignis	Start des Prozesses
	Endereignis	Ende des Prozesses
	Timer-Ereignis	Taktzeit
	Sequenzfluss	Materialfluss
	Nachrichtenfluss	Signalfluss

Tabelle 13: Notationselemente der BPMN und Interpretation für Fertigungsprozesse

Auch die BPMN stellt somit die notwendigen Elemente dar, um einen Fertigungsprozess graphisch abzubilden. Zusätzlich ist ein großer Umfang an Ereignissen gegeben, sodass auch ein Kontroll- und Steuerungsfluss abgebildet werden kann. Ein gewisser Grad an Erweiterbarkeit ist somit gegeben. Es besteht jedoch keine Möglichkeit, Ressourcen darzustellen. Die graphische Prozessbeschreibung des Beispiel-Fertigungsprozesses inklusive dieser Einschränkung ist in Abbildung 49 zu sehen.

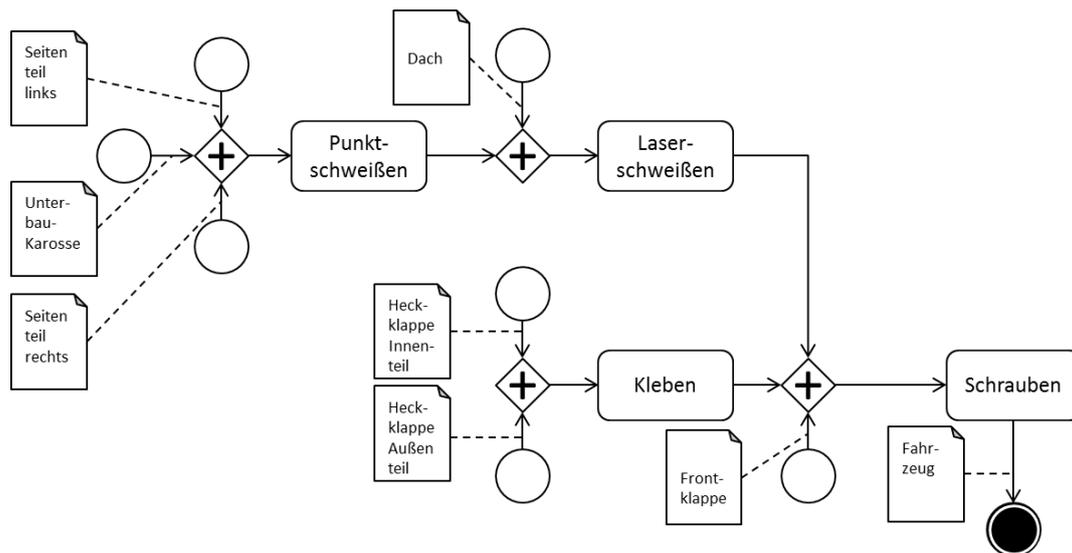


Abbildung 49: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer BPMN (eigene Darstellung)

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die genaue Angabe des Materialflusses durch die Beschreibung der Bauteile als Datenobjekte nur in einer wenig übersichtlichen Form möglich ist, da diese mit den Sequenzflüssen verknüpft werden. Die Folge der Prozessschritte und die Zuführung der Bauteile sind hingegen eindeutig und übersichtlich abbildbar. Außerdem wird die hierarchische Abbildung des Fertigungsprozesses mithilfe von sogenannten zugeklappten Teilprozessen dargestellt. Für den gegebenen Beispiel-Fertigungsprozess ist dies in Abbildung 50 zu sehen.

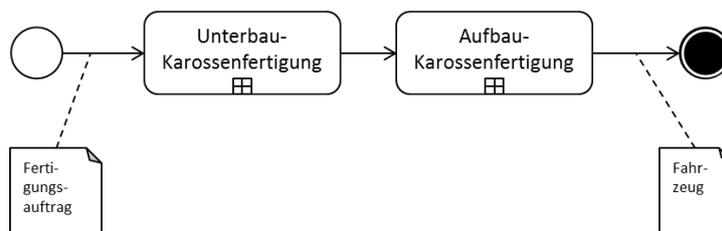


Abbildung 50: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer BPMN (eigene Darstellung)

Durch das Aufklappen der Teilprozesse gelingt eine Navigation von der obersten bis zur untersten Ebene in der Prozesshierarchie. Auch der initiale Input und der finale Output sind durch die Angabe der beiden Datenobjekte klar erkennbar. Weiterhin lassen sich ergänzende Attribute und Eigenschaften nicht ohne eine Erweiterung der vorhandenen Notationselemente darstellen. Für jegliche Erweiterungen ist somit eine Anpassung des Meta-Modells erforderlich. Die Tabelle 14 gibt für die BPMN eine zusammenfassende Bewertung anhand der Nutzwertanalyse an.

Bewertung BPMN			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	4	Materialflussabbildung ohne Einschränkung möglich; Input, Output und Zwischenprodukte klar erkennbar
2	Hierarchisierung	4	es besteht die Möglichkeit Teilprozesse abzubilden und somit eine Hierarchie im Modell darzustellen
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	1	Ressourcen können nicht abgebildet werden; es besteht lediglich die Möglichkeit Annotationen hinzuzufügen
4	Zuordenbarkeit von Attributen	1	Attribute können lediglich durch Annotationen oder Datenobjekte einem Prozess zugeordnet werden
5	Erweiterbarkeit	2	durch eine Anpassung des Meta-Modells ist eine Erweiterung möglich
6	Verständlichkeit	2	Materialfluss wird übersichtlich dargestellt; Erweiterung um Ressourcen und Attributen steigert Unübersichtlichkeit

Tabelle 14: Bewertung der Modellierungsmethode "BPMN"

#### 4.5.3.6 Petrinetze

Ein Petrinetz ist ein bipartiter gerichteter Graph und stellt somit eine graphische Notation dar, die in ihrer Grundform aus zwei Knotenarten und den sie verbindenden Kanten besteht (KASTENS 2009). Petrinetze wurden im Jahre 1962 durch den Mathematiker Carl Adam Petri auf Grundlage der Graphentheorie entwickelt (KRÖNING 1998). Es existieren viele verschiedene Arten von Petrinetzen, die die Basissyntax und -semantik in einer bestimmten Hinsicht erweitern, um auch unterschiedliche Einsatzgebiete zu ermöglichen. Hauptsächlich kommen sie zum Einsatz, um dynamische Systeme zu modellieren, zu analysieren und zu simulieren.

Die Grundform wird aufgrund ihrer Elemente als Stellen-/Transitions-Netz bezeichnet. Dieses ist laut (KASTENS 2009) als ein Tripel  $P = (S, T, F)$  definiert. Die Mengen  $S$  und  $T$  definieren die Knoten und die Menge  $F$  die Kanten. Die Menge von Stellen  $S$  stellt Be-

dingungen oder Zustände im Modell dar und wird abgebildet durch Kreise. Die Transitionen sind in der Menge  $T$  zusammengefasst. Diese werden durch Rechtecke dargestellt und haben im Modell die Bedeutung von Aktivitäten. Die letzte Menge  $F$  im angegebenen Tripel beschreibt die vorhandenen Relationen zwischen den beiden Mengen  $S$  und  $T$ . Sie werden mithilfe von Pfeilen abgebildet und verbinden im Modell die Stellen und die Transitionen miteinander. Weiterhin ist es möglich, den Stellen Kapazitäten zuzuordnen und den Kanten ein Gewicht zu geben. Per Definition wird der Zustand eines Petrinetzes durch die Funktion der Markierung beschrieben. Dabei ist jeder Stelle eine bestimmte Anzahl an sogenannten Marken zugeordnet. Zur Definition eines Petrinetzes gehört außerdem eine Anfangsmarkierung, die den initialen Zustand beschreibt. (KASTENS 2009)

Die Funktionsweise eines Petrinetzes wird durch Änderungen des Zustandes beschrieben. Diese Zustandsänderungen eines Systems werden durch das Schalten von Transitionen abgebildet. Wenn eine Transition schaltet, wird dabei ein Zustand in Form einer Markierung  $M$  in eine Markierung  $M'$  überführt. Damit eine Transition schalten kann, muss diese aktiviert sein. Das ist der Fall, wenn in jeder Stelle des Vorbereiches der Transition mindestens eine Marke vorhanden ist und die Stellen im Nachbereich noch mindestens eine Marke aufnehmen können. Sobald eine Transition schaltet, wird aus jeder Stelle des Vorbereiches eine Marke gelöscht. Gleichzeitig wird in jeder Stelle des Nachbereiches eine neue Marke erzeugt. Damit ist in dem Petrinetz ein neuer Zustand beschrieben. (KASTENS 2009)

Für die Modellierung einer Fertigungsanlage wird nicht das klassische Petrinetz benutzt, sondern das zeiterweiterte Petrinetz. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass es zusätzlich zu den bisher beschriebenen zeitlosen Transitionen auch zeitbehaftete Transitionen zur Verfügung stellt. Diese unterscheiden sich von den zeitlosen Transitionen dadurch, dass sie beim Vorgang des Schaltens Zeit verbrauchen. Damit lassen sich Aktivitäten darstellen, die eine bestimmte Zeit benötigen. Die bisher beschriebenen Elemente eines Petrinetzes sind in Tabelle 15 dargestellt. Zusätzlich dazu befindet sich die Interpretation der einzelnen Elemente in Bezug auf die Modellierung eines Fertigungsprozesses darin.

Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Stelle	Zustand
	Zeitbehaftete Transition	Fügeoperation / Zusammenbau / Aktion
	Zeitlose Transition	Bauteil-Quelle oder -Senke
	Kante	Fertigungsfluss
	Marke	Bauteil

Tabelle 15: Notationselemente der Petrinetze und Interpretation für Fertigungsprozesse

Mit nur wenigen Modellkomponenten ist die Darstellung eines Fertigungsprozesses möglich. Auch die Möglichkeit der Abbildung von Zusammenführungen und Verzweigungen von Bauteilen besteht. Die sehr abstrakte Darstellungsweise mit diesen wenigen Modellierungselementen und die vorhandenen Schaltregeln erschweren jedoch die Verständlichkeit für den Betrachter. In Abbildung 51 ist der zuvor beschriebene Beispiel-Fertigungsprozess mithilfe eines Petrinetzes modelliert.

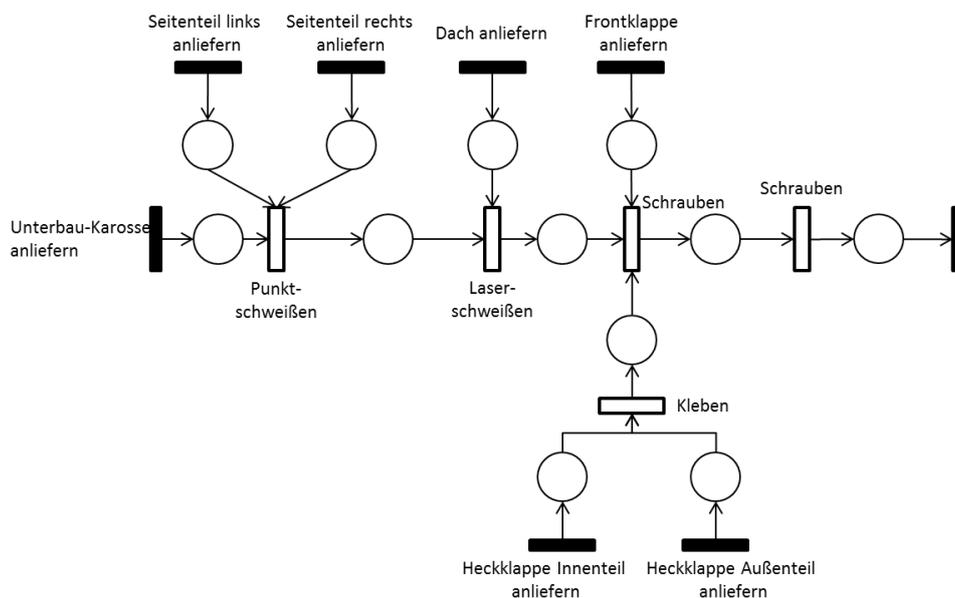


Abbildung 51: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einem Petrinetz (eigene Darstellung)

Ebenso lässt sich erkennen, dass den einzelnen Fertigungsschritten zugeordnete Ressourcen nicht sinnvoll dargestellt werden können. Auch die Hierarchisierung des Modells ist mit einem zeiterweiterten Petrinetz nicht möglich. Es existiert jedoch eine Erweiterung, die dies in Form eines hierarchischen Petrinetzes erlaubt. Ein Vorteil des Petrinetzes ist die sehr simulationsnahe Abbildung, da durch die Marken und das Schalten der Transitionen Zustandsänderungen dynamisch dargestellt werden. Dieser Aspekt hat jedoch keinen Einfluss auf die Bewertung im Rahmen der Nutzwertanalyse. Die Beurteilung der Bewertungskriterien ist in Tabelle 16 angegeben.

Bewertung Petrinetz			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	3	Materialflussabbildung möglich; Zwischenprodukte lassen sich nicht darstellen
2	Hierarchisierung	0	es gibt keine Möglichkeit, Petrinetze hierarchisch zu gliedern (Erweiterung der Syntax wäre nötig)
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	0	es gibt keine Möglichkeit, Ressourcen im Petrinetz abzubilden
4	Zuordenbarkeit von Attributen	0	es besteht nicht die Möglichkeit, Attribute einem Prozess zuzuordnen
5	Erweiterbarkeit	2	durch eine Anpassung des Meta-Modells ist eine Erweiterung möglich
6	Verständlichkeit	1	sehr abstrakte Darstellung erfordert Kenntnis über Syntax und Semantik von Petrinetzen; dafür übersichtlich

Tabelle 16: Bewertung der Modellierungsmethode "Petrinetz"

#### 4.5.3.7 Modell der Fertigung (MFert)

Das Modell der Fertigung wurde im Speziellen dafür entwickelt, Vorgänge in einem Produktionssystem abzubilden. Es hat das Ziel, bei der Fertigungssteuerung universal einsetzbar zu sein und besitzt die Möglichkeit sowohl die Planung als auch die Steuerung von Produktionssystemen darzustellen und zu analysieren. MFert basiert auf einem Ansatz, der das erstellte Modell als Grundlage für eine computergestützte Analyse der Fertigungssteuerung hernimmt. Für diese computergestützten Umfänge ist im Rahmen von MFert das System OOPUS konzipiert wurden. Dieses steht für „Objekt-orientierte Plattform für die Generierung und Integration individueller Fabrikplanungs- und steuerungssysteme“. (LANGEMANN 1999)

Der Graph, der innerhalb des Modells der Fertigung entsteht, bildet mögliche Produktionsabläufe ab und ist verwandt mit einem Petrinetz. Daher handelt es sich auch hier

um einen bipartiten Graphen, der lediglich aus zwei Knotenarten besteht, die abwechselnd durch Kanten verbunden werden. Diese beiden Knotenarten werden durch Fertigungselementknoten und Fertigungsvorgangsknoten dargestellt. Fertigungselementknoten werden durch Dreiecke abgebildet und repräsentieren Fertigungselemente, die an Fertigungsvorgängen beteiligt sind. Die Definition von Fertigungselementen ist dabei sehr allgemein gehalten. Darunter können sowohl die verwendeten Materialien als auch die benötigten Ressourcen, wie Maschinen oder Mitarbeiter verstanden werden. Fertigungselemente mit ähnlichen Eigenschaften werden zu Fertigungselementkategorien zusammengefasst. Fertigungsvorgangsknoten werden als Rechtecke dargestellt und bilden Fertigungsvorgänge ab, welche als Teilschritte eines Produktionsprozesses zu verstehen sind und eine Wertschöpfung erbringen. Dabei spielen Fertigungselemente für einen Fertigungsprozess unter anderem die Rolle der Input- und Outputfaktoren. Genau wie bei den Fertigungselementen werden auch Fertigungsvorgänge mit ähnlichen Eigenschaften in Fertigungsvorgangskategorien gekapselt. Mithilfe von MFert lassen sich die verschiedenen Zustände eines Produktionssystems darstellen. Dafür existiert zusätzlich ein Zeitmodell, das den dynamischen Einfluss der Steuerung abbildet und durch den Einsatz von Ereignissen eine dynamische Entwicklung des Modellzustands zu bestimmten Zeitpunkten zulässt. (KÖSTERS 2006)

Die Tabelle 17 stellt die vier Elemente der Modellnotation mit der entsprechenden Interpretation für einen Fertigungsprozess dar. Diese ist in diesem Fall schon durch die Elementbeschreibungen im Rahmen des Modells der Fertigung vorgegeben, da es genau für diese Zwecke entwickelt wurde.

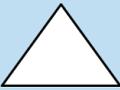
Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Fertigungselementknoten	Bauteil / Zwischenprodukt / Produkt / Ressource
	Fertigungsvorgangsknoten	Fügeoperation / Zusammenbau / Aktion
	Kante	Materialfluss
	Schnittstellenknoten	Verknüpfung zu anderem MFert- Teilmodell zur Hierarchisierung

Tabelle 17: Notationselemente von MFert und Interpretation für Fertigungsprozesse nach (KÖSTERS 2006)

Zur Darstellung des Fertigungsprozesses stehen die Fertigungselement- und Fertigungsvorgangsknoten zur Verfügung. Fertigungselementknoten, die horizontal in einer Reihe mit den Fertigungsvorgangsknoten stehen, stellen das Material dar, das zur Durchführung des jeweiligen Fertigungsprozesses nötig ist oder durch die Ausführung des Fertigungsvorgangs entsteht. Diejenigen Fertigungselementknoten, die vertikal unterhalb eines Fertigungsvorgangsknotens angeordnet sind, bilden die Ressourcen ab, die bei der Ausführung des Fertigungsvorgangs zum Einsatz kommen. Durch die Verbindung der Knoten mit Kanten ist der Materialfluss erkennbar. Der in Kapitel 4.5.2 beschriebene Beispiel-Fertigungsprozess ist mit MFert in Abbildung 52 dargestellt.

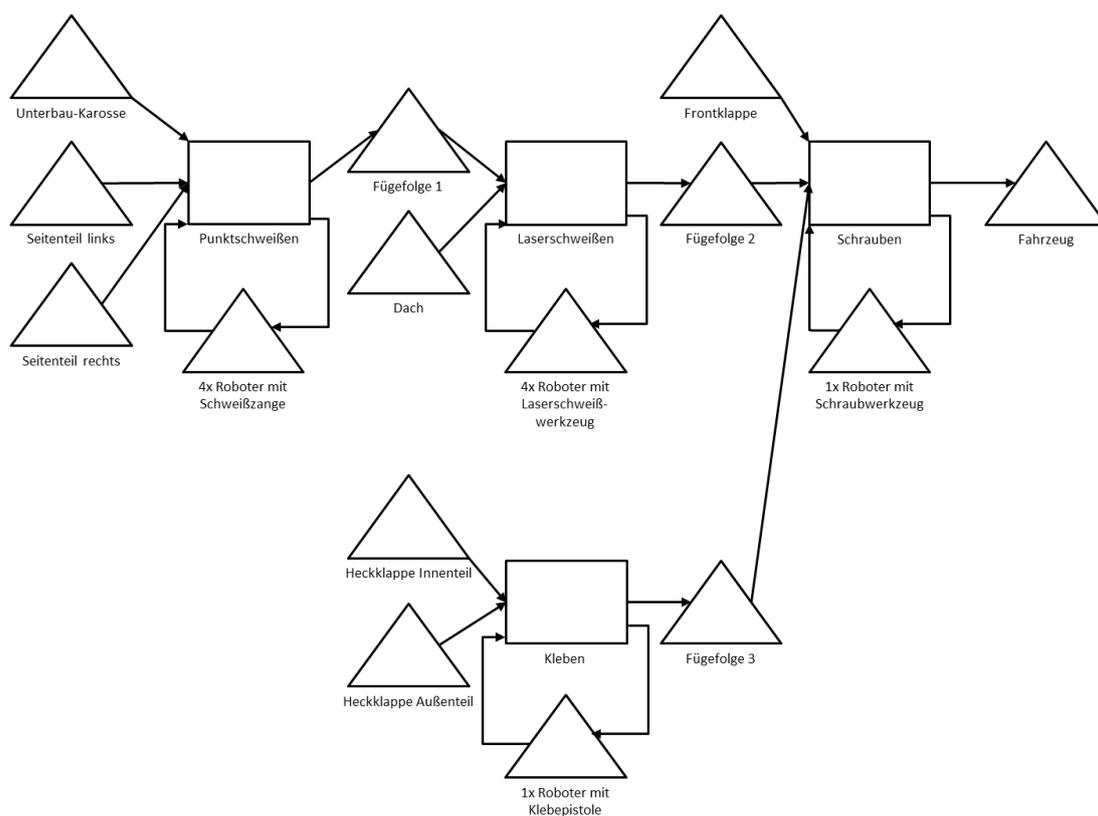
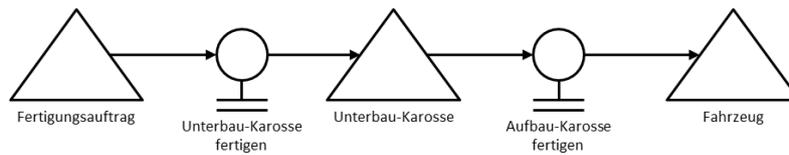


Abbildung 52: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit MFert (eigene Darstellung)

Die direkte Darstellung der den Fertigungsvorgängen zugeordneten Ressourcen ermöglicht es dem Betrachter auf den ersten Blick die Betriebsmittel zu erkennen. Bei umfangreicheren oder komplexeren Prozessen führt dies jedoch zu einer schlechteren Übersichtlichkeit. Auch die nicht vorhandene Unterscheidbarkeit der Symbole der Fertigungselemente in Bezug auf Materialien oder Ressourcen steigert die Verständlichkeit nicht. Eine Hierarchisierung des Modells ist durch den Schnittstellenknoten gegeben und verfeinert einen Fertigungsvorgang. Die Abbildung 53 zeigt das entsprechende Modell des Beispiel-Fertigungsprozesses eine Hierarchieebene über

der aus Abbildung 52 bekannten Darstellung. Diese Hierarchisierung wird mithilfe der Schnittstellenknoten gelöst.



**Abbildung 53: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit MFert (eigene Darstellung)**

Innerhalb dieses hierarchischen Modells lässt sich die Abfolge der Fertigungsschritte mit Bezug auf die beteiligten Materialien abstrakt erkennen. Ein Nachteil von MFert ist jedoch, dass die Modellelemente nicht mit Attributen versehen werden können. Dies macht es nicht möglich bestimmte Fertigungsparameter im Modell darzustellen und damit die Funktionalität und den Informationsgehalt des Modells ausreichend zur Verfügung zu stellen. Damit das Modell der Fertigung dieses unterstützt ist eine Erweiterung notwendig. Diese ist lediglich durch die Anpassung des Meta-Modells möglich, das dann neu definiert werden muss. Ansätze dazu liefert (KÖSTERS 2006). Die Zusammenfassung der Bewertung von MFert anhand der Beurteilungskriterien ist in Tabelle 18 gegeben.

Bewertung MFert			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	4	Materialflussabbildung ohne Einschränkung möglich; Input, Output und Zwischenprodukte klar erkennbar
2	Hierarchisierung	4	es besteht die Möglichkeit Fertigungs-Vorgänge zu verfeinern und somit eine Hierarchie im Modell zu erzeugen
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	4	spezielles Symbol für Fertigungselemente, wie z.B. Ressourcen
4	Zuordenbarkeit von Attributen	0	es existiert keine Möglichkeit, einem Fertigungselement oder -vorgang Attribute zuzuordnen
5	Erweiterbarkeit	2	durch eine Anpassung des Meta-Modells ist eine Erweiterung möglich
6	Verständlichkeit	2	Prozessschritte und Ressourcen klar erkennbar; jedoch durch Abbildung Ressourcen in Modell eher unübersichtlich

**Tabelle 18: Bewertung der Modellierungsmethode "MFert"**

#### 4.5.3.8 Produkt-Prozess-Ressource (PPR) – Prinzip

Das PPR-Prinzip stellt keine generelle Methodenbeschreibung dar, sondern ein prinzipielles Konzept, das in mehreren Softwaresystemen für die Planung von Produktionssystemen zum Einsatz kommt. Dazu gehören zum Beispiel der Process Designer von Tecnomatix (SIEMENS TECNOMATIX 2015) und Delmia von Dassault Systemes (DASSAULT SYSTEMES 2016). Der Fokus im Rahmen dieser Arbeit liegt auf dem Process Designer von Tecnomatix, da dieser bei mehreren deutschen Automobilherstellern innerhalb der Fertigungsplanung für den Karosseriebau als integriertes Planungssystem eingesetzt wird (VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE 2009). Die Zielstellung des PPR-Prinzips ist die Erarbeitung eines Prozess- und Arbeitsplans. Für die weiteren Funktionsmodule im Rahmen der Digitalen Fabrik, wie beispielsweise der Materialflusssimulation oder der Robotersimulation, stellt dieser die Grundlage dar (LÜTJEN 2014). Das PPR-Prinzip stellt dem Namen entsprechend die Produkte, Prozesse und Ressourcen sowie deren Verbindung untereinander dar. Die verknüpfende Einheit ist dabei der Prozess, dem die Instanzen aus Produkt und Ressource zugeordnet sind. Für jeden Schritt im Fertigungsprozess wird der Bedarf an Ressourcen, welche die benötigten Betriebsmittel umfassen, mit den jeweiligen Inputs und Outputs dargestellt. Die drei verschiedenen Dimensionen werden separat mithilfe einer hierarchischen Baumstruktur abgebildet, welche eine hierarchische Gliederung von Produkt, Prozess und Ressource ermöglicht. Der beschriebene Zusammenhang dieser drei Komponenten ist in Abbildung 54 gegeben.

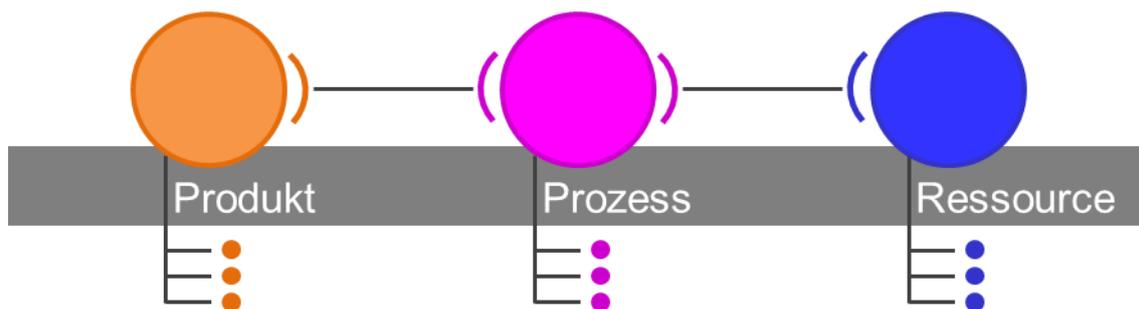


Abbildung 54: schematische Produkt-Prozess-Ressourcen-Struktur im Tecnomatix Process Designer (eigene Darstellung)

Im Tecnomatix Process Designer kommt zur Darstellung des Prozessablaufs das PERT-Diagramm zum Einsatz. PERT steht für „Program Evaluation and Review Technique“ und ist eine Netzplantechnik, die gewöhnlich im Projektmanagement bei der Zeitplanung zum Einsatz kommt (WYTRZENS & WYTRZENS 2010). Tecnomatix hat dieses Diagramm für den Einsatz innerhalb des Process Designer angepasst und weiter-

entwickelt. Die Abläufe im Diagramm werden über eintretende Ereignisse, wie beispielsweise ankommende Bauteile, gesteuert. Ein Nachteil ist dadurch gegeben, dass lediglich synchronisierende Prozesse abgebildet werden können, bei denen mehrere Teilprozesse zu einem zusammengeführt werden. Verzweigende Prozesse sind nicht abbildbar. Die Tabelle 19 zeigt die vorhandenen Notationselemente mit deren Bedeutung innerhalb eines Fertigungsprozesses.

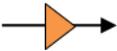
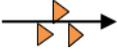
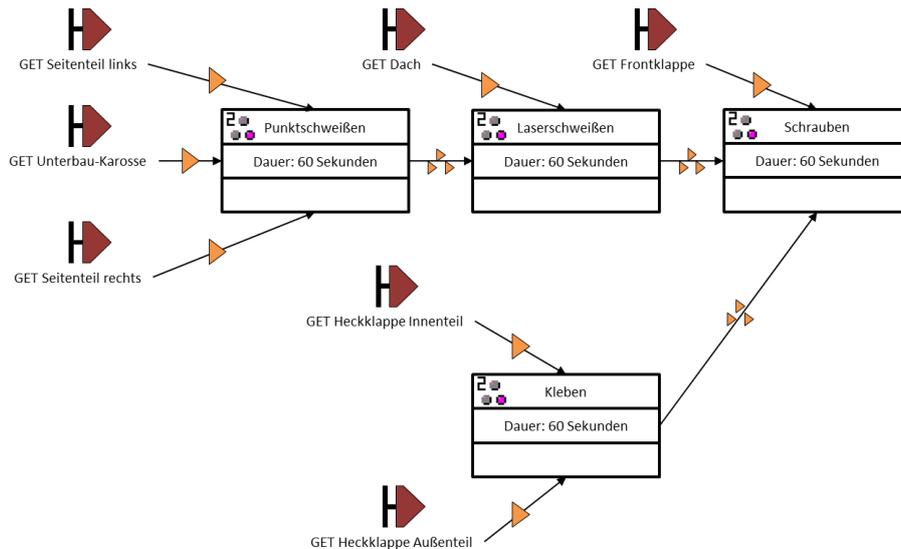
Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Prozess	Fertigungsprozess mit Fügeoperation und Prozessdauer
	Materialzuführung	dem Prozess zugeführtes Bauteil / Material
	Ereignis	Ankunft eines Bauteils
	Materialfluss	Materialfluss zwischen den Prozessschritten

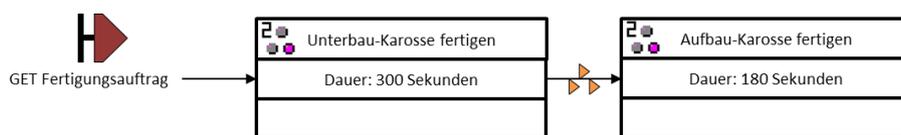
Tabelle 19: Notationselemente der PPR-Darstellung und Interpretation für Fertigungsprozesse

Prozesse mit den zugehörigen Fügeoperationen werden mithilfe von Rechtecken dargestellt, die zudem die Information über die Dauer eines Prozessschrittes enthalten. Diese Darstellung ist angelehnt an die Prozessschritte innerhalb eines PERT-Diagramms. Ereignisse stellen Bauteile und Materialien dar, die dem Fertigungsprozess zugeführt werden. Mithilfe von Kanten in Form einer Materialzuführung oder eines Materialflusses werden die Ereignisse mit den Prozessen und die Prozesse untereinander verbunden. Die Abbildung 55 stellt für den in Kapitel 4.5.2 eingeführten Beispiel-Fertigungsprozess das Modell als PERT-Diagramm im Rahmen des PPR-Prinzips des Process Designers dar.



**Abbildung 55: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit einer PPR-Darstellung (eigene Darstellung)**

Die den Prozessschritten zugeordneten Ressourcen sind innerhalb dieses Modells nicht erkennbar. Dazu ist es notwendig innerhalb des Process Designers in die hierarchische Dimension der Ressourcen zu wechseln. Diese Vorgehensweise stellt einen Nachteil für die Verständlichkeit dar. Die Hierarchisierung hingegen ist ohne Einschränkung möglich, indem jeder Prozess durch einen verfeinerten Prozess dargestellt wird. Exemplarisch ist dies in Abbildung 56 für den Beispiel-Fertigungsprozess aus Kapitel 4.5.2 modelliert.



**Abbildung 56: Hierarchische Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit der PPR-Darstellung (eigene Darstellung)**

In Bezug auf das Zielsystem stellt das PPR-Prinzip einige gute Ansätze dar, jedoch stellt der hohe Funktionsumfang des Tecnomatix Process Designer und die komplexe Navigation über die drei verschiedenen Dimensionen eine Hürde für die gute Verständlichkeit als Modellierungsmethode dar. Weiterhin ist die Darstellung von Zwischenprodukten nicht direkt möglich. Viele erweiterte Informationen und Attribute sind lediglich über die Navigation der hierarchischen Baumstrukturen der drei Dimensionen abrufbar. Die Bewertung des PPR-Prinzips ist anhand der Beurteilungskriterien in Tabelle 20 zusammengefasst.

Bewertung PPR aus Process Designer			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	2	Materialflussabbildung möglich; Zwischenprodukte lassen sich nicht darstellen; keine Verzweigung im Prozess möglich
2	Hierarchisierung	3	Prozessschritte können untergliedert werden, was eine Hierarchisierung ermöglicht
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	1	Im Prozessmodell können Ressourcen nicht abgebildet werden; Bezug zur dem Prozess zugeordneten Ressourcenstruktur
4	Zuordenbarkeit von Attributen	1	Die Attribut-Zuordnung im Prozessmodell ist nicht möglich, jedoch durch indirekte Verknüpfung mit dem Datenmodell
5	Erweiterbarkeit	0	das Modell ist nicht erweiterbar
6	Verständlichkeit	1	Materialfluss gut erkennbar; zur Betrachtung von Attributen und Ressourcen muss Navigationsstruktur durchlaufen werden

Tabelle 20: Bewertung der Modellierungsmethode "PPR aus Process Designer"

#### 4.5.3.9 Parametrische Darstellung

Die Parametrische Darstellung ist eine Modellierungsmethode zur Abbildung von Fertigungsanlagen im Karosseriebau. Sie wird von der Fertigungsplanung der Volkswagen AG konzipiert und befindet sich noch in einem Entwicklungsstadium. Außerdem befassen sich derzeit mehrere wissenschaftliche Arbeiten bei der Volkswagen AG mit diesem Thema. Die Parametrische Darstellung stellt dem Modellierer zwei Sichten zur Verfügung, die jedoch gleichzeitig im Modell abgebildet werden. Im oberen Teil eines Modells wird eine graphische Sicht und im unteren Teil eine tabellarische Sicht dargestellt. Die graphische Sicht bildet den Materialfluss und die Abläufe innerhalb der Fertigungsanlage ab. Die tabellarische Sicht hingegen ordnet den einzelnen Prozessschritten des Fertigungsablaufs bestimmte Parameter zu. Diese sind zunächst das Fügeverfahren und die Nummerierung des Prozessschrittes. Außerdem wird die benötigte Anzahl an Ressourcen, deren freie Kapazität und die Flexibilität der Betriebsmittel in Bezug auf verschiedene Fahrzeugtypen angegeben. Weiterhin sind die einfließenden Bauteile und die definierten Kennzahlen, die das Produkt betreffen, beschrieben. Ergänzend dazu werden in den unteren Zeilen der Tabelle die Parameter angegeben, die die gesamte Anlage und somit den gesamten abgebildeten Prozess beschreiben. Dazu gehören die Flächen- und Investitionsangaben der gesamten Anlage. Die tabellarische Sicht wird in textueller Form angegeben. Die Notationselemente der graphischen Sicht sind in Tabelle 21 dargestellt.

Abbildung	Element-Bezeichnung	Interpretation Fertigungsprozess
	Geo-Prozess (wertschöpfend)	Fertigungsprozess, der Bauteile geometrisch miteinander verbindet
	Vorhaltung Geo-Prozess	Vorhaltung / Reserve für einen möglichen Geo-Prozess
	Prozess (wertschöpfend)	Fertigungsprozess, der Bauteile nicht geomet. miteinander verbindet
	Prozess (nicht wertschöpfend)	Fertigungsprozess, der nicht zur Wertschöpfung beiträgt
	Teiletransport / -handling	Transportprozess für Bauteile
	Teilequelle / -senke	Bauteile als Input (Zwischen-)Produkte als Output
	Kapazitätsüberschreitung	Angabe eines Betriebsmittels mit überschrittener Kapazität
	Freie Kapazität	Angabe eines Betriebsmittels mit freier Kapazität

**Tabelle 21: Notationselemente der Parametrischen Darstellung und Interpretation für Fertigungsprozesse**

Der Umfang dieser Notationselemente ist gering gehalten, um die Verständlichkeit zu gewährleisten. Hellblaue Rechtecke bilden Geo-Prozesse ab. Das bedeutet, dass mindestens zwei Bauteile geometrisch miteinander verbunden werden. Wenn dieses Rechteck weiß ist und mit einer gepunkteten Umrandung dargestellt wird, handelt es sich um eine Vorhaltung eines Geo-Prozesses, was als Reserve verstanden werden kann. Hellblaue Rechtecke mit abgerundeten Ecken bilden alle weiteren wertschöpfenden Prozesse ab. Dies ist der Fall, wenn zwei oder mehr Bauteile miteinander verbunden werden, ohne dabei die Produktgeometrie zu definieren. Diese Verbindungen dienen in der Regel der Erhöhung der Festigkeit. Ist das Rechteck mit abgerundeten Ecken, aber grauer Füllung abgebildet, handelt es sich um einen nicht-wertschöpfenden Prozess, der keinen Transportprozess beschreibt. Dazu gehören beispielsweise qualitätsfördernde Prozesse innerhalb einer Fertigungsanlage. Transportprozesse dagegen werden mithilfe eines weißen Pfeils dargestellt, der zwei Pro-

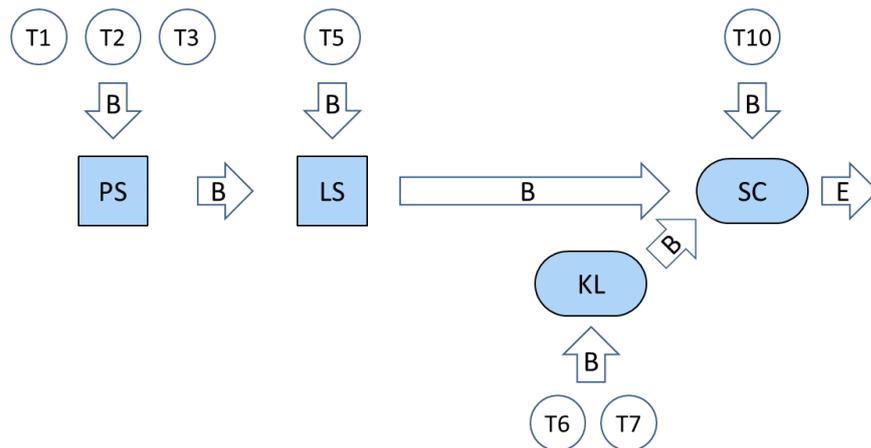
zessschritte miteinander verbindet. Bauteile, die dem Fertigungsprozess zugeführt werden, sind durch weiße Kreise im Modell beschrieben. Weiterhin existiert die Möglichkeit einer Ressource, die jeweilige Kapazitätsauslastung graphisch zuzuordnen. Dabei zeigt ein grünes Sechseck freie Kapazitäten auf und ein roter Blitz die Überschreitung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten.

<b>Kürzel</b>	<b>Prozessbezeichnung</b>	<b>Kürzel</b>	<b>Prozessbezeichnung</b>
<b>B</b>	Beladen	<b>NZ</b>	Nebenzeit
<b>BO</b>	Bolzenschweißen	<b>PS</b>	Punktschweißen
<b>BU</b>	Buckelschweißen	<b>PZ</b>	Prozesszeit
<b>BÜ</b>	Bürsten	<b>Q</b>	Qualität
<b>BZ</b>	Belegungszeit	<b>S</b>	Schachteln
<b>C</b>	Clipsen	<b>SC</b>	Schrauben
<b>CL</b>	Clinchen	<b>SK</b>	Sichtkontrolle
<b>E</b>	Entnahme	<b>SL</b>	Schutzgaslöten
<b>F</b>	Falzen	<b>SM</b>	Mutternstanzen
<b>KL</b>	Kleben	<b>SN</b>	Stanznieten
<b>LL</b>	Laserlöten	<b>SW</b>	Schutzgasschweißen
<b>LS</b>	Laserschweißen	<b>T</b>	Teil
<b>NK</b>	Nahtkontrolle	<b>T*</b>	Teil nach Bearbeitung
<b>NT</b>	Nieten	<b>TZ</b>	Taktzeit

**Tabelle 22: Beschriftungselemente der Parametrischen Darstellung**

Zusätzlich zu den graphischen Symbolen werden den Notationselementen Beschriftungen hinzugefügt, die die Prozess- oder Transportart beschreiben. Diese im Rahmen der Parametrischen Darstellung zur Verfügung stehenden Beschriftungen sind in Tabelle 22 aufgelistet. Wenn weitere Fügeoperationen hinzugefügt werden sollen, ist eine Erweiterung der Kürzel möglich.

Bei der Abbildung des Fertigungsprozesses mit der Parametrischen Darstellung ist darauf zu achten, dass die Spalten in der tabellarischen Sicht den Prozessschritten in der graphischen Sicht zuordenbar sind. Dadurch ist gewährleistet, dass der Betrachter die aufgezählten Parameter richtig zuordnet. In der Abbildung 57 ist der Beispiel-Fertigungsprozess aus Kapitel 4.5.2 mithilfe der Parametrischen Darstellung beschrieben. Dabei ist die Trennung der beiden Sichten gut zu erkennen.



Station	Punktschweißen	Laserschweißen	Kleben	Schrauben
Nummer	1010	1020	1025	1030
Technik	4 Roboter mit Schweißzange	4 Roboter mit Laserschweißwerkzeug	1 Roboter mit Klebepistole	2 Roboter mit Schraubwerkzeug
Einfließende Teile	T1 Unterbau-Karosserie T2 Seitenteil links T3 Seitenteil rechts	T4* Zwischenprodukt aus vorherigem Prozessschritt T5 Dach	T6 Heckklappe Innenteil T7 Heckklappe Außenteil	T8* Zwischenprodukt aus vorherigem Prozessschritt T9* Zwischenprodukt aus vorherigem Prozessschritt T10 Frontklappe
Kennzahlen Produkt	40 Schweißpunkte	1600mm Schweißnaht	2000mm Klebenaht	14 Schrauben
Freie Kapazität	5 Schweißpunkte pro Roboter	200mm pro Roboter		4-6 Schrauben pro Roboter
Flexibilität	nein	nein	nein	nein
LxBxH	Gesamte Anlage 20 m x 10 m x 4 m			
Invest solitär	Gesamte Anlage 500.000 EUR			
Investition kombi	nein			

Abbildung 57: Abbildung des beispielhaften Fertigungsprozesses mit der Parametrischen Darstellung (eigene Darstellung)

Die dem Fertigungsprozess zuzuführenden Bauteile werden ober- bzw. unterhalb der Prozesssymbole angeordnet. Aufgrund der Zuordnung zu den Spalten in der tabellarischen Ansicht ist der Ablauf des Prozesses horizontal von links nach rechts abzubilden. Damit ist der Materialfluss gut erkennbar. Weiterhin ist durch die Ergänzungen in der tabellarischen Sicht eine detaillierte Beschreibung der benötigten Ressourcen möglich. In dieser können zudem weitere Attribute definiert werden. Bei komplexeren Fertigungsprozessen stößt die Parametrische Darstellung jedoch an ihre Grenzen. Zum einen wird die Abbildung bei diesen Prozessen durch die horizontale Darstellung und die zugeordnete tabellarische Sicht unübersichtlicher. Zum anderen ist eine Hierarchisierung des Modells mithilfe der Parametrischen Darstellung nicht möglich. Es besteht weder die Möglichkeit Prozesse detaillierter zu beschreiben, noch über Prozessschnittstellen eine Verbindung herzustellen. Jeder Fertigungsprozess steht in dem Modell somit für sich. Dies erlaubt keine Verknüpfungsfunktion innerhalb der Parametrischen Darstellung. Dafür ist eine Erweiterung des Meta-Modells nötig, die eine Hierarchisierung ermöglicht. Da sich die Parametrische Darstellung noch in der Entwicklungsphase befindet, ist eine Erweiterung derzeit umsetzbar. Die wissenschaftlichen Arbeiten, die

zurzeit zur Entwicklung und Optimierung der Parametrischen Darstellung angefertigt werden, stellen dabei die Basis für eine Erweiterung und konkrete Definition der Modellierungssprache dar. Die Bewertung dieser Modellierungsmethode ist in Tabelle 23 zusammengefasst.

Bewertung Parametrische Darstellung			
Nr.	Kriterium	Bewertung	Bemerkung
1	Darstellung Materialfluss	4	Materialfluss klar erkennbar; zugeführte Teile dargestellt; Fügeoperationen und Transportprozesse abgebildet
2	Hierarchisierung	0	keine Hierarchisierung des Modells möglich
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	3	Ressourcen werden nicht in graphischer Notation, aber in der tabellarischen Sicht sehr detailliert aufgeführt
4	Zuordenbarkeit von Attributen	4	durch die tabellarische Sicht können Attribute zu Prozessen detailliert angegeben werden
5	Erweiterbarkeit	3	Erweiterung des Modells möglich, da noch in der Entwicklungsphase und kein definiertes Meta-Modell existiert
6	Verständlichkeit	2	Materialfluss und Attribute gut erkennbar; bei komplexen Prozessen unübersichtlich; nicht eindeutig

Tabelle 23: Bewertung der Modellierungsmethode "Parametrische Darstellung"

#### 4.5.3.10 Zusammenfassung der Bewertung

Nachdem die verschiedenen Modellierungsmethoden bekannt sind und eine Bewertung anhand der einzelnen Kriterien erfolgt ist, wird im Folgenden entsprechend der in (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015) beschriebenen Nutzwertanalyse der Gesamtnutzwert eines jeden Modellierungsverfahrens ermittelt. Dafür wird zunächst der Teilnutzen eines Bewertungskriteriums für jede Lösungsalternative berechnet. Dieser ergibt sich aus dem Produkt des im Rahmen der vorherigen Bewertung bestimmten Zielfaktors und des Gewichtungsfaktors, der zuvor anhand des paarweisen Vergleichs der Bewertungskriterien ermittelt wurde. Die Summe aller Teilnutzwerte einer Lösungsalternative ergibt den Gesamtnutzen. Anschließend werden die gebildeten Gesamtnutzwerte der unterschiedlichen Modellierungsmethoden in eine absteigende Reihenfolge gebracht. Die Lösungsalternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert besitzt somit in Bezug auf das definierte Zielsystem den höchsten Nutzen. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass eine eindeutige Aussage nur möglich ist, wenn die Gesamtnutzwerte zweier Lösungsalternativen weit genug auseinander liegen. In

diesem Fall gibt es mehrere Möglichkeiten trotzdem eine eindeutige Bewertung vorzunehmen. Dazu gehören beispielweise die Erweiterung der Nutzwertanalyse um zusätzliche Bewertungskriterien oder eine Risikoanalyse der Lösungsalternativen. (BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT 2015)

In Tabelle 24 wird die abschließende Nutzwertanalyse inklusive der Ermittlung der Gesamtnutzwerte der einzelnen Modellierungsmethoden dargestellt.

Nr.	Kriterium	Gewichtungsfaktor	Zielfaktoren und Teilnutzen Modellarten													
			ARIS		UML		BPMN		Petrinetz		MFert		PPR aus PD		Parametrische Darstellung	
			Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN	Zf	TN
1	Darstellung Materialfluss	33,33%	3	1,00	4	1,33	4	1,33	3	1,00	4	1,33	2	0,67	4	1,33
2	Hierarchisierung	6,67%	4	0,27	4	0,27	4	0,27	0	0,00	4	0,27	3	0,20	0	0,00
3	Abbildbarkeit von Ressourcen	10,00%	3	0,30	2	0,20	1	0,10	0	0,00	4	0,40	1	0,10	3	0,30
4	Zuordenbarkeit von Attributen	16,67%	1	0,17	4	0,67	1	0,17	0	0,00	0	0,00	1	0,17	4	0,67
5	Erweiterbarkeit	10,00%	2	0,20	2	0,20	2	0,20	2	0,20	2	0,20	0	0,00	3	0,30
6	Verständlichkeit	23,33%	2	0,47	3	0,70	2	0,47	1	0,23	2	0,47	1	0,23	2	0,47
<b>Gesamtnutzen</b>		<b>100,00%</b>	<b>2,40</b>		<b>3,37</b>		<b>2,53</b>		<b>1,43</b>		<b>2,67</b>		<b>1,37</b>		<b>3,07</b>	
<b>Ranking</b>			<b>5</b>		<b>1</b>		<b>4</b>		<b>6</b>		<b>3</b>		<b>7</b>		<b>2</b>	

Tabelle 24: Zusammenfassung der Nutzwertanalyse

Im linken Bereich dieser Tabelle sind die erforderlichen Bewertungskriterien mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor angegeben. Im rechten Bereich daneben sind die verschiedenen Modellierungsmethoden mit den in den vorherigen Abschnitten ermittelten Zielfaktoren  $Z_f$  aufgelistet. Außerdem ist der daraus berechnete Wert der Teilnutzwerte  $TN$  angegeben, deren Summe den Gesamtnutzwert ergibt. Diese sind im unteren Teil der Tabelle den Modellierungsmethoden zugeordnet. Zusätzlich zu dem in der Tabelle angegebenen Ranking, stellt die Abbildung 58 dieses mithilfe eines Säulendiagramms dar.

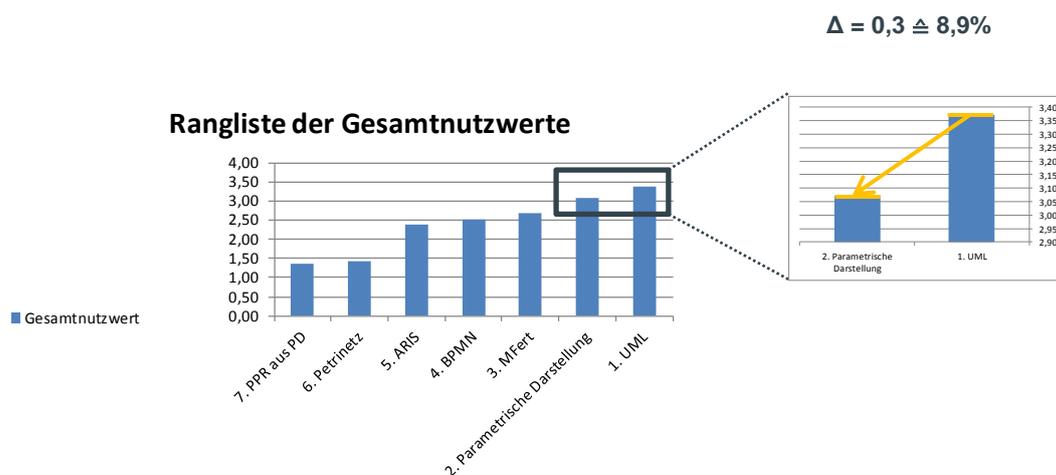


Abbildung 58: Rangliste der Gesamtnutzwerte anhand der Nutzwertanalyse (eigene Darstellung)

Anhand dieser Abbildung ist erkennbar, dass die Modellierungsmethoden der UML und der Parametrischen Darstellung im Rahmen der Nutzwertanalyse die beiden oberen Ränge belegen. Der Abstand zwischen den beiden ist mit 0,3 Punkten hinreichend groß. Es entspricht einem prozentualen Unterschied von 8,9%. Wie bereits oben bei der Beschreibung der Vorgehensweise zur Auswertung einer Nutzwertanalyse erwähnt, ist eine eindeutige Aussage zur Bewertung der Lösungsalternativen nur möglich, wenn die Gesamtnutzwerte zweier Alternativen weit genug auseinander liegen. Der Abstand der Gesamtnutzwerte der Ränge drei bis sieben zum Gesamtnutzwert der UML liegen bei einem relativen Wert von 20,8% bis 59,3% und sind somit ebenfalls signifikant schlechter bewertet. Damit wird im Rahmen dieser Arbeit für die Modellierung von Fertigungsprozessen eine Kombination aus Aktivitäts- und Objektdiagrammen aus dem Umfang der UML verwendet.



## **5 Konzept zur automatisierten Generierung von Fertigungsanlagen**

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Voraussetzungen für die Erarbeitung eines Konzeptes zur automatischen Erzeugung von Fertigungsanlagen in der Fertigungsplanung im Bereich des Karosseriebaus geschaffen wurden, geht es im folgenden Kapitel um die konkrete Herleitung dieses Konzeptes. Dabei wird eine Fertigungsanlage ausgehend von den gegebenen Produktinformationen und Projektprämissen abgeleitet. In einem ersten Schritt erfolgt die Herleitung des Ablaufs anhand der Produktstruktur, sodass eine Implikation des Fertigungsprozesses aus den Produktdaten erfolgt. Anschließend wird eine Verknüpfung von Prozess und Ressource hergestellt, indem den einzelnen Fertigungsschritten die benötigten Betriebsmittel zugeordnet werden. Das Konzept beruht somit auf Beziehungs- und Regelwissen zwischen Produkt, Prozess und Ressource. Jeder Prozessschritt kennt mögliche zu verwendende Ressourcen und diese Ressourcen wiederum wissen, welchen Fertigungsprozess sie ausführen können. Im Rahmen dieses Kapitels wird erläutert, wie diese Art von Wissen beschrieben und algorithmisch genutzt wird. Als Restriktion zur Erarbeitung des Konzeptes gilt die Prämisse, dass zur Herleitung einer Fertigungsanlage lediglich eine Fahrzeugvariante in Form eines Typenvertreters betrachtet wird. Ein Typenvertreter ist eine Variante eines Produktes, die den größten Teil des Produktionsprogramms repräsentiert und somit eine Vereinfachung der Planung in Bezug auf die Variantenvielfalt ermöglicht (SCHENK et al. 2014). Außerdem werden lediglich wertschöpfende Prozessumfänge untersucht.

### **5.1 Aufbau des Konzepts**

Das zu erarbeitende Konzept basiert auf zwei Ansätzen, um eine Fertigungsanlage herzuleiten. Einerseits umfasst es eine Wissensbasis, die das notwendige Wissen zur Planung einer Fertigungsanlage in expliziter Art und Weise beinhaltet. Andererseits gibt es Algorithmen, die das innerhalb der Wissensbasis enthaltene Wissen für die Zwecke der automatisierten Anlagengenerierung extrahieren und nutzbar machen. Das Zusammenspiel dieser beiden Komponenten führt zur Herleitung eines möglichst optimalen Anlagenkonzeptes.

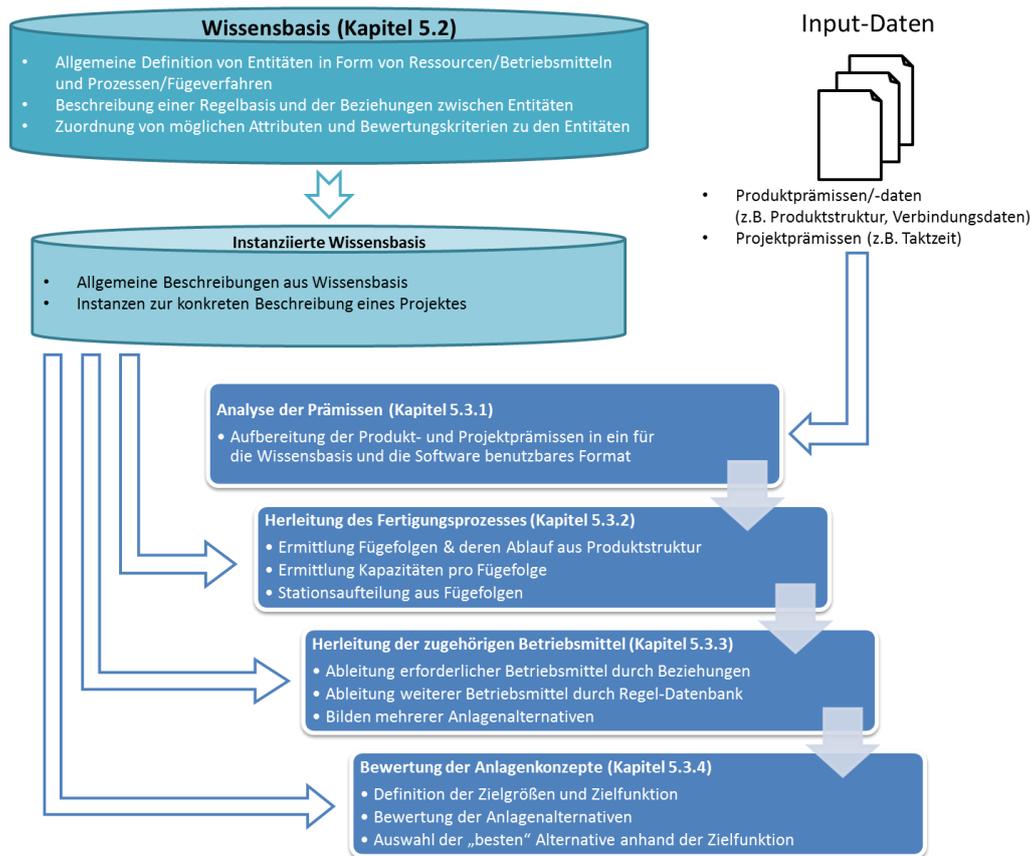


Abbildung 59: Konzeptarchitektur und Funktionsweise (eigene Darstellung)

Die Abbildung 59 zeigt die grobe Konzeptarchitektur und Funktionsweise. Als Fundament dient die Wissensbasis. In dieser sind die, für die Beschreibung der Planung von Fertigungsanlagen im Karosseriebau notwendigen Entitäten, beinhaltet. Dazu gehören beispielsweise Betriebsmittel und Fügeverfahren. Außerdem sind Regeln und Beziehungen zwischen den Entitäten beschrieben und um Attribute ergänzt. Die Herleitung der Wissensbasis wird in Kapitel 5.2 näher erläutert. Um ein konkretes Projekt abbilden zu können, wird die Wissensbasis mit Instanzen der realen Welt angereichert, die den Grundumfang der Wissensbasis ergänzen. Den Ausgangspunkt für die algorithmische Abarbeitung stellen die Input-Daten dar, die zur Herleitung der Fertigungsanlage benötigt werden. Dazu gehören sowohl die Produktprämissen und –daten als auch die Projektprämissen. In einem ersten Schritt werden diese Daten analysiert und verarbeitet, sodass sie für die nachfolgenden Abarbeitungsschritte nutzbar sind. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Nachdem die Eingangsdaten in einer verwendbaren Beschreibungsform vorliegen, werden sie genutzt, um den Fertigungsprozess herzuleiten. Dazu gehört die Ermittlung der einzelnen Fügefolgen und deren Reihenfolge. Zudem erfolgt auf Basis von Kapazität und Auslastung die Aufteilung der

Fügeföhlen auf Stationen. Nähere Details dieses Schrittes werden konzeptuell in Kapitel 5.3.2 angegeben. Mithilfe der zugrundeliegenden Wissensbasis werden im nächsten Schritt den ermittelten Stationen die benötigten Betriebsmittel zugeordnet. Das Konzept zur Bildung mehrerer Stationsalternativen durch die Nutzung von Regel- und Beziehungswissen der Wissensbasis wird in Kapitel 5.3.3 detaillierter beschrieben. In einem letzten Schritt erfolgt die Ermittlung der optimalen Alternative mithilfe von Kennzahlen und Optimierungsalgorithmen durch die Definition einer Zielfunktion. Die Erläuterung dieses Umfangs erfolgt in Kapitel 5.3.4.

## **5.2 Herleitung einer Wissensbasis für die Fertigungsplanung im Karosseriebau**

Zur Beschreibung und maschinellen Verarbeitung von Wissen existieren mehrere Methoden und Technologien. Zur Erarbeitung einer für den Anwendungsfall geeigneten Methode ist in Kapitel 2.4 zunächst das allgemeine Verständnis für Wissen und wissensbasierte Systeme gegeben. In diesem Kapitel erfolgt die Erarbeitung einer Wissensbasis anhand einer zu spezifizierenden Vorgehensweise. Diese wird durch ein wissensbasiertes System in Form einer Ontologie definiert. Der größte Unterschied zu relationalen Datenbanken besteht in der Flexibilität von Struktur und Beziehungen. In Datenbanken werden Daten mithilfe von Tabellen und Spalten strukturiert. Bei einer Ontologie sind Informationen durch die Semantik und logische Regeln über Daten definiert. Weiterhin besteht im Gegensatz zu anderen Wissensrepräsentationen, wie beispielsweise Topic Maps, die Möglichkeit der Inferenz, also des automatischen Schlussfolgerns über Relationen (BORCHERT 2003). Um somit das implizit vorhandene Wissen der Karosseriebauplaner explizit zu beschreiben und verwerten zu können, ist es notwendig auf die umfangreichen und flexiblen Zusammenhangsbeschreibungen von wissensbasierten Systemen zurückzugreifen.

### **5.2.1 Vorgehensweise zum Erstellen der Ontologie**

Für das Erstellen von Ontologien existiert keine standardisierte Vorgehensweise. Eine mögliche Variante des Ablaufs ist in (NOY & MCGUINNESS 2001) beschrieben. Diese wird als Grundlage genutzt und im Rahmen dieser Arbeit um eigene Ergänzungen erweitert. Außerdem sind in (NOY & MCGUINNESS 2001) drei Regeln fixiert, die bei der Erarbeitung einer Ontologie einzuhalten sind. Zuerst ist festgehalten, dass es nicht den einen korrekten Weg zum Erstellen einer Ontologie gibt. Wie bei jedem Modell existieren mehrere Ansätze, eine Domäne abzubilden. Außerdem handelt es sich um einen iterativen Prozess, sodass einige Prozessschritte während des Erstellungsprozesses mehrfach

durchlaufen werden. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da sich mit fortlaufender Zeit Umfänge ändern und angepasst werden müssen. Als dritter Grundsatz gilt die aussagekräftige Benennung von Konzepten innerhalb einer Ontologie. Diese sollten möglichst so benannt werden, dass sie im Rahmen der modellierten Anwendungsdomäne Sinn ergeben und verständlich sind. Der konkrete Ablauf ist in Abbildung 60 angegeben. Im Folgenden werden die einzelnen Ausführungsschritte näher erläutert.

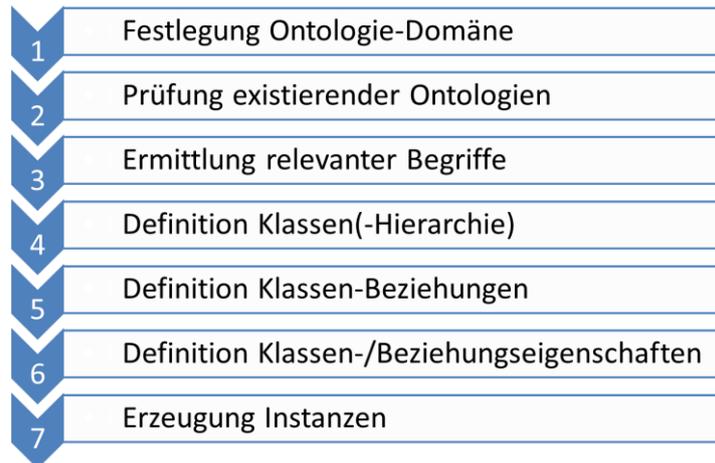


Abbildung 60: Vorgehensweise zur Erarbeitung der Ontologie nach (NOY & MCGUINNESS 2001)

Im ersten Schritt werden die Domäne und der Fokus der Ontologie festgelegt. In dieser Phase gilt es zu klären, welche Anwendungsdomäne beschrieben werden soll und wie diese abgegrenzt ist. Außerdem ist zu ermitteln, für welche Zwecke die Ontologie genutzt werden soll und wer sie nach der Erstellung pflegt. Im Rahmen dieser Phase macht es Sinn, Testfragen zu generieren, die später mithilfe der Ontologie beantwortet werden sollen. Im späteren Verlauf können diese zu Evaluierungszwecken ausgewertet werden.

Der zweite Schritt umfasst eine Rechercharbeit, da hier geprüft wird, ob für die zu modellierende Anwendungsdomäne bereits Ontologien existieren und inwiefern diese den Anforderungen des Anwendungsfalles gerecht werden. Diese Phase dient der Reduzierung des Aufwandes durch gezielte Wiederverwendung.

Danach folgt im dritten Schritt die erste Phase der aktiven Erzeugung der Ontologie. In diesem werden die wichtigen und abzubildenden Begriffe ermittelt. Es gilt also zum Beispiel durch ein Brainstorming zu ermitteln, welche Begriffe existieren und inwiefern diese eingebunden werden sollen. Dabei erfolgt noch keine Einordnung, Klassifizierung oder Hierarchisierung der Begriffe.

Diese folgt im vierten Schritt, in dem die Klassen und deren Hierarchie innerhalb der Ontologie definiert werden. Dazu werden drei unterschiedliche Methoden je nach ihrer Herangehensweise bereitgestellt. Die erste ist die Top-Down-Methode, die bei den allgemeinsten Klassen beginnt und diese nach unten hin zu den spezielleren Klassen immer weiter detailliert. Das Gegenteil dazu stellt die Bottom-Up-Methode dar, in welcher die Erzeugung der Klassen genau entgegengesetzt verläuft, sodass zunächst die sehr speziellen Klassen ermittelt werden, um sie von unten nach oben in eine generellere Klassenstruktur einzugliedern. Die dritte Variante ist eine Kombination dieser beiden Methoden und wird als Middle-Out-Methode bezeichnet. Bei dieser werden auf einer mittleren Ebene Klassen definiert, die von dort aus sowohl top-down als auch bottom-up eingegliedert werden.

Im fünften Schritt werden die Beziehungen zwischen den Klassen ermittelt. Das bedeutet, dass die notwendigen Object- und Datatype-Properties ermittelt werden. Dieser Schritt führt dazu, die bislang hierarchische Struktur in eine semantische, netzartige Struktur zu bringen. Die Definition der Beziehung erfolgt dabei auf der allgemein möglichen Klasse, da die hierarchisch untergeordneten Klassen diese Zusammenhänge erben.

Anschließend werden im sechsten Schritt die Eigenschaften der Beziehungen und Klassen definiert. Dazu gehört die Angabe von Kardinalitäten, Werte- und Definitionsbereichen und weiteren Restriktionen durch Quantoren. Die Schritte vier bis sechs werden iterativ durchgeführt, sodass die Ontologie kontinuierlich wächst und vollständiger wird.

Sobald die Ontologie konzeptuell beschrieben ist, folgt im siebten Schritt das Hinzufügen von Instanzen innerhalb der Klassenhierarchie. Durch diesen Schritt wird die Ontologie konkret. (NOY & MCGUINNESS 2001)

Um bei der Erstellung von Ontologien zu unterstützen, kommen Tools, wie spezielle Ontologie-Editoren oder Inferenzmaschinen zum Einsatz (HITZLER 2008). Editoren dienen dabei der höheren Benutzerfreundlichkeit und ermöglichen das Erstellen und Bearbeiten von Ontologien in OWL mithilfe einer grafischen Benutzeroberfläche. Ein sehr weit verbreiteter Ontologie-Editor ist Protégé (STANFORD UNIVERSITY 2016), welcher von der Stanford University unter einer Open-Source-Lizenz entwickelt wird. Auch im Rahmen dieser Arbeit wird Protégé zur Erstellung der Ontologie verwendet.

Inferenzmaschinen werden auch als Reasoner bezeichnet. Sie stellen Schlussfolgerungen anhand der modellierten Ontologie auf und ermöglichen dadurch zum einen die

Prüfung der Konsistenz einer Ontologie und zum anderen die Generierung von neuem implizitem Wissen, welches in der Ontologie vorhanden ist. In Verbindung mit Protégé wird der Hermit OWL Reasoner benutzt.

### **5.2.2 Eine Ontologie zur Beschreibung von Fertigungsprozessen im Karosseriebau**

Im Folgenden wird die soeben beschriebene Vorgehensweise zum Erstellen von Ontologien angewandt, um das für diesen Anwendungsfall notwendige Modell zu erzeugen. Zuerst erfolgt die Eingrenzung der Anwendungsdomäne. Hierbei handelt es sich um die Fertigungsplanung im Karosseriebau. Dieses sehr umfangreiche Fachgebiet wird eingegrenzt auf das benötigte Wissen zur Erstellung von Fertigungsanlagen. Die in Kapitel 4.2 beschriebenen User-Stories eins bis neun und die im Kapitel 4.4 herausgearbeiteten Prämissen stellen dabei eine Basis für die Eingrenzung dar. Zur Überprüfung, ob die erstellte Ontologie auch dem gewünschten Zweck genügt, werden Testfragen generiert, die mithilfe der Ontologie nach deren Erstellung zu beantworten sind. Diese Fragen sind folgend aufgelistet:

- 1. Welche hierarchisch untergeordneten Bauteile verbindet das übergeordnete Bauteil X miteinander?*
- 2. Durch welche Füge-technik werden Bauteil X1 und Bauteil X2 miteinander verbunden?*
- 3. Welche Betriebsmittel sind in der Lage die Füge-technik Y auszuführen?*
- 4. Welche weiteren Betriebsmittel können bei der Verwendung von Betriebsmittel Z benötigt werden?*

Im nächsten Schritt erfolgt die Recherche nach bereits bestehenden Ontologien im zu modellierenden Bereich. Dabei lässt sich feststellen, dass im Bereich der Fertigungsplanung im Karosseriebau bei der Marke Volkswagen PKW keine existierende Ontologie bekannt ist. Innerhalb dieser sehr spezifischen Anwendungsdomäne ist das Wissen der Planer somit nicht in Form einer Ontologie festgehalten. Darüber hinaus existieren jedoch Ontologien, die im Bereich der Produktentwicklung (GAAG 2009), der Fügeprozesse (LOHSE 2006) oder der allgemeinen Produktionssysteme (KÖSTERS 2006) eingeordnet werden. Ansätze dieser Wissensbasen werden auch für diese Arbeit genutzt. Dabei ist hauptsächlich die Arbeit von (LOHSE 2006) zu nennen. Zur Auswertung des Wissens innerhalb der Ontologie durch ein zu entwickelndes Software-System sind



Bei der Betrachtung der drei großen Kategorien Produkt, Prozess und Ressource liegt es nahe daraus drei separate Hierarchien von Klassen zu erzeugen. Die Produktdaten unterscheiden sich in zwei verschiedene Arten von Informationen, die einerseits die Struktur und andererseits die Verbindungen beschreiben. Die Unterscheidung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher erläutert. Der *Prozess* an sich steht noch eine Hierarchieebene unter der *Aktivität*, die als allgemeinste Form eines Vorgangs definiert ist. Außerdem wird die Klasse *Projekt* genutzt, um die Projekteigenschaften und die entsprechenden Prämissen beschreiben zu können. Diese fünf Klassen auf der höchsten Hierarchieebene sind in Abbildung 62 angegeben. Das Vorgehen zur Erstellung dieser Ontologie erfolgt somit Top-Down. Die fünf Basisklassen werden von der Klasse *Entität* abgeleitet, die die allgemeinste Klasse definiert. Zur Veranschaulichung werden innerhalb dieses Kapitels Darstellungen von Ontologien und deren Bestandteilen benutzt. Rechtecke stellen dabei Klassen dar. Ellipsen stehen für Literale mit einem Datentypen. Object-Properties werden durch gerichtete blaue Kanten zwischen Klassen angegeben. An diesen Kanten befindet sich deren Bezeichnung und Kardinalität in der Form *[min...max]*. Die Datatype-Properties werden durch gerichtete grüne Kanten zwischen Klassen und Literalen dargestellt. Die hierarchische Struktur in Form einer Generalisierungsfunktion zwischen Klassen wird mithilfe der aus UML-Klassendiagrammen bekannten Generalisierungskanten abgebildet, wobei die nicht ausgefüllte Pfeilspitze auf die generellere Klasse zeigt.

Die Produktdaten geben Auskunft über zwei verschiedene Arten von Informationen. Zum einen betrifft dies den hierarchischen Aufbau der Produktstruktur und zum anderen die Art und Weise mit der die verschiedenen Produktkomponenten miteinander verbunden sind. Beide Informationsarten werden in jeweils einer Ontologie beschrieben. Dazu wird zunächst eine Klassenhierarchie für beide Ontologien erarbeitet. Die Produktstruktur wird baumartig beschrieben. Der Wurzelknoten stellt das fertige *Produkt* dar, das entweder für sich steht oder aus mehreren Bauteilen besteht. Diese Teile werden wiederum als *Produkt* betrachtet. Es gilt zu beachten, dass im Rahmen dieser Arbeit die Begriffe *Produkt* und *Bauteil* synonym zueinander betrachtet werden. Es handelt sich dabei entweder um ein *Zusammenbauteil* oder ein *Einzelbauteil*. *Einzelbauteile* definieren den elementarsten Bestandteil eines fertigen *Produktes* und können in der Produktstruktur nicht weiter zerlegt werden. Wenn ein Bauteil in der Produktstruktur als elementares Teil angegeben ist, jedoch aus mehreren Teilen besteht, die bereits verbaut zur Fertigungsanlage transportiert werden, handelt es sich im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls um ein *Einzelbauteil*. Ein *Zusammenbauteil* unterscheidet sich

von einem *Einzelbauteil*, indem es aus mehreren *Produkten* besteht, die miteinander verbunden sind. Damit sind bereits alle drei notwendigen Konzepte für die Erstellung der *Produkt*-Hierarchie gegeben. Diese sind in Abbildung 63 dargestellt.

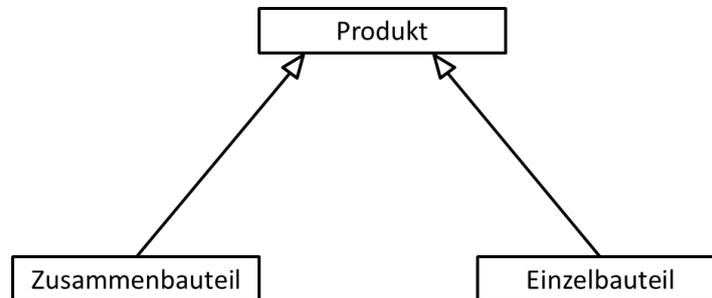


Abbildung 63: Teil-Ontologie für das Produkt (eigene Darstellung)

Die zweite Teilontologie beschreibt die *Verbindungen* der einzelnen Bauteile miteinander zu einem *Zusammenbauteil*. Diese Klassenhierarchie der verschiedenen *Verbindungen* ist in Abbildung 64 angegeben. Für die Verbindungsarten erfolgt eine taxonomische Klassifizierung, die sich an (HABERHAUER & BODENSTEIN 1996) anlehnt. Nach dieser besteht eine *Verbindung* in der Art und Weise einer *Form*-, einer *Stoff*- oder einer *Reibschlussverbindung*. Bei einer *Formschlussverbindung* kommt es zu einer „Kraftübertragung über die Formelemente, die als Mitnehmer wirken“ (HABERHAUER & BODENSTEIN 1996). Ein Beispiel dafür sind Bolzenverbindungen. *Stoffschlussverbindungen* werden hergestellt, indem die zu verbindenden Teile an den Kontaktstellen zu einer nicht lösbaren Einheit verbunden werden. Diese Art der *Verbindung* tritt im Karosseriebau besonders häufig auf. Dazu gehören beispielsweise das Schweißen und das Kleben. Die *Reibschlussverbindung* erfolgt durch Reibungskräfte, die beim Verspannen von zwei sich berührenden Flächen entstehen. Zu dieser Verbindungsart gehört zum Beispiel das Schrauben. Jede *Verbindung* zwischen zwei Bauteilen ist einer dieser Kategorien zugeordnet.

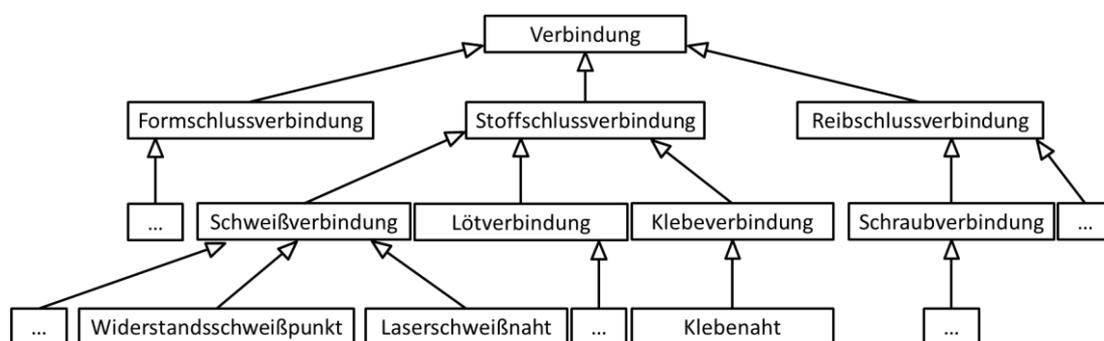


Abbildung 64: Teil-Ontologie für die Verbindungen (eigene Darstellung)

Durch diese beiden Hierarchien ist es möglich, die zur Verfügung stehenden Produktdaten in Klassen einzuordnen. Der nächste Abschnitt beschreibt Klassenhierarchien für *Prozesse*. Auch hier gibt es zwei unterschiedliche Informationskomponenten, die in separaten Hierarchien beschrieben werden. Die erste Teilhierarchie, die in Abbildung 65 angegeben ist, klassifiziert die verschiedenen Umfänge eines *Prozesses*. Die generellste Klasse wird wie in (LOHSE 2006) durch die *Aktivität* dargestellt. Von dieser Klasse werden alle weiteren abgeleitet. Die elementarste Form einer *Aktivität* ist die *Operation*, welche eine spezielle Aktion innerhalb des Fertigungsprozesses abbildet. *Operationen* werden in der später beschriebenen zweiten Teilontologie für *Prozesse* weiter spezifiziert. *Prozesse* selbst sind auch eine Art der *Aktivität*, die jedoch weitere Teilaktivitäten enthalten können. Eine spezielle Prozessart ist die *Fügefolge*. Diese umfasst mehrere *Fügeoperationen* und dient dazu mindestens zwei *Bauteile* miteinander zu verbinden. Die zweite Prozessart ist der *Takt*. Dieser beschreibt eine zeitliche Einheit eines getakteten Fertigungsprozesses, wie er im Bereich des Karosseriebaus zu finden ist.

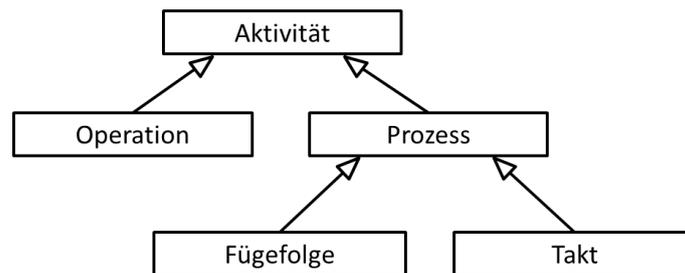


Abbildung 65: Teil-Ontologie für die Aktivität (eigene Darstellung)

Wie oben erwähnt lassen sich *Operationen* weiter spezifizieren. Konsequenterweise wird hier auch auf die Klassifizierung aus (LOHSE 2006) zurückgegriffen. Die verschiedenen Arten von *Operationen* sind abhängig von ihrem Zweck sortiert. Es lassen sich beispielsweise *Transport-, Vorbereitungs- und Fügeoperationen* unterscheiden. *Transportoperationen* umfassen alle elementaren *Aktivitäten*, die zum Transport eines Bauteils vom Punkt A zum Punkt B erforderlich sind. Dabei kann es sich beispielsweise um eine Handlingsoperation eines Roboters oder um das Bewegen auf einem Stauförderer handeln. *Vorbereitungsoperationen* beschreiben elementare *Aktivitäten*, die vor dem eigentlichen Fertigungsprozess auszuführen sind. Dazu gehört zum Beispiel das Bestücken eines Einlegefensters durch einen Mitarbeiter. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanteste Operationsart ist die *Fügeoperation*. Diese ist eng verbunden mit der oben beschriebenen *Fügefolge*, indem sie einen Bestandteil dieser darstellt. Unter *Fügeope-*

*rationen* werden all die *Operationen* verstanden, die zwei oder mehr Bauteile mithilfe eines bestimmten Verfahrens zusammenfügen. Demzufolge ist die *Fügeoperation* weiter klassifiziert in die verschiedenen Arten des Fügens. Dazu gehören unter anderem die *Schweiß-*, die *Klebe-* und die *Schrauboperation*. Neben den *Transport-*, *Füge-* und *Vorbereitungsoperationen* existieren weitere Arten der *Operationen*, die auf dieser Klassenebene definiert werden. Die Klassifizierung der *Operationen* ist in Abbildung 66 dargestellt.

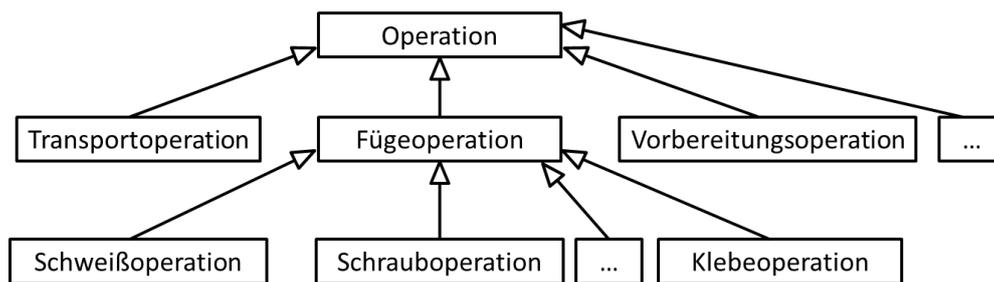


Abbildung 66: Teil-Ontologie der Operationen (eigene Darstellung)

Die letzte Säule, für die eine Klassenhierarchie erzeugt wird, ist der Bereich der *Ressourcen*. Je nach Betrachtungsebene handelt es sich bei einer *Ressource* um eine *Fertigungsanlage*, eine *Station* oder einen *Produktionsfaktor*. Eine *Fertigungsanlage* beschreibt einen Bereich innerhalb der Fertigung, der ein bestimmtes Produkt oder Zwischenprodukt herstellt. Diese umfasst in den meisten Fällen mehrere *Stationen*, die wiederum eine Kombination von *Produktionsfaktoren* darstellen und mithilfe von unterschiedlichen *Betriebsmitteln* am Fortschritt des Produktionsvorgangs beteiligt sind. Angelehnt an (KÖSTERS 2006) werden diese *Produktionsfaktoren* weiter unterteilt in *Gebrauchs-* und *Verbrauchsobjekte*. Unter *Gebrauchsobjekten* werden *Mitarbeiter* und *Betriebsmittel* verstanden, die den Fertigungsprozess unmittelbar voran bringen und als aktive Bestandteile zu bestimmten *Operationen* zugeordnet sind. Der Unterschied zwischen *Mitarbeitern* und *Betriebsmitteln* besteht darin, dass es sich bei *Mitarbeitern* um menschliche und bei *Betriebsmitteln* um maschinelle *Ressourcen* handelt. *Betriebsmittel* lassen sich analog zu den *Operationen* noch in speziellere Klassen unterteilen, die den jeweiligen Aktivitätsarten zugeordnet sind. *Verbrauchsobjekte* sind Hilfs- und Werkstoffe, die an einem Fertigungsprozess lediglich passiv teilnehmen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Bereich der *Betriebsmittel*. Die *Ressourcen*-Hierarchie, die in diesem Abschnitt beschrieben wurde, ist in Abbildung 67 graphisch angegeben.

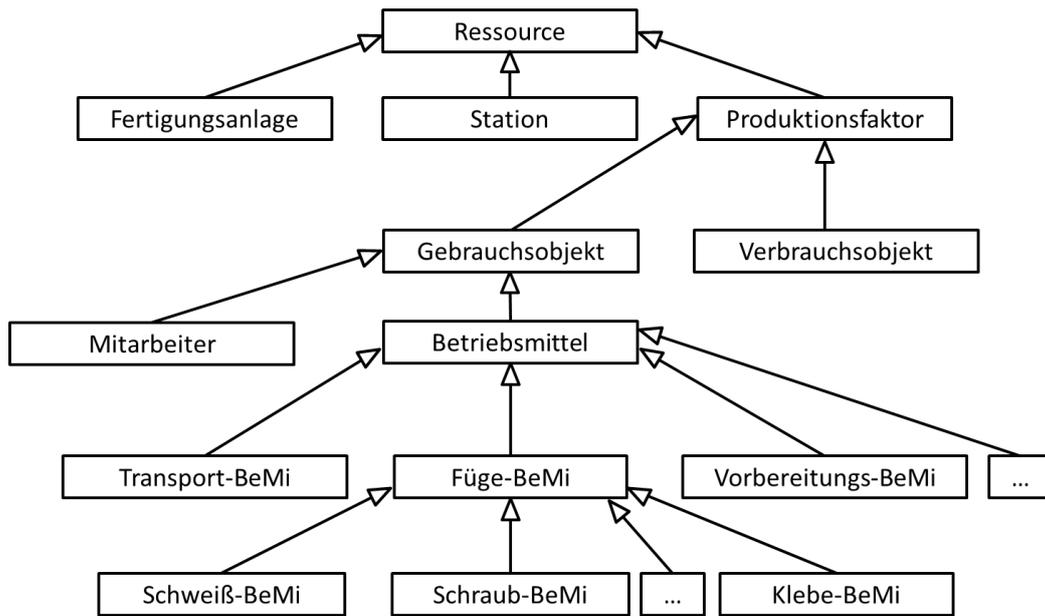


Abbildung 67: Teil-Ontologie der Ressourcen (eigene Darstellung)

Damit ist der komplette Umfang an Klassen-Hierarchien für die zu modellierende Domäne vorhanden. Die Hierarchien liegen jedoch separat vor und sind in keiner Weise verbunden. Im nächsten Schritt werden semantische Relationen zwischen den definierten Klassen generiert und die einzelnen Klassen-Hierarchien durch Object-Properties verknüpft. Außerdem werden die Datatype-Properties definiert. Die allgemeinste Klasse *Entität* besitzt drei Attribute in Form von Datatype-Properties, welche in Abbildung 68 dargestellt sind. Diese sind der *Name*, die *Beschreibung* und ein *XML-Tag*, dessen Bedeutung beim Produktdaten-Import im Kapitel 5.3.1 näher erläutert wird. Diese drei haben eine annotierende Funktion zur Identifizierung und Erläuterung aller abzubildenden Individuen. Sie werden als Zeichenketten abgebildet. Da beide Attribute auf der höchsten Klassen-Hierarchieebene definiert sind, können alle Instanzen innerhalb der Ontologie damit ergänzt werden.

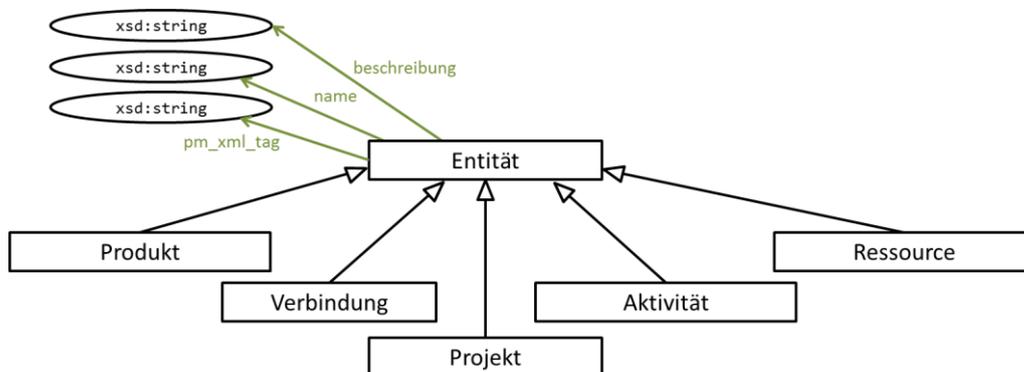


Abbildung 68: Datatype-Properties der Klasse "Entität" (eigene Darstellung)

Ebenso wie die Klasse der *Entitäten*, werden für die Klasse *Projekt* lediglich die Data-type-Properties festgelegt. Abbildung 69 zeigt diese Beschreibung. *Projekte* definieren sich über bestimmte Prämissen. Diese sind im Kapitel 4.4 bereits erarbeitet worden und umfassen für die Ontologie den *Standort*, den *Mechanisierungsgrad*, die *Typflexibilität*, die *Gesamtverfügbarkeit*, die *Ausbringung pro Stunde* und die *Taktzeit*. Eine Erläuterung dieser Begriffe befindet sich ebenfalls in Kapitel 4.4. Um eine Weiterverwendung im Sinne der Berechnungsmöglichkeiten zu ermöglichen, werden die *Ausbringung*, die *Taktzeit*, die *Gesamtverfügbarkeit* und der *Mechanisierungsgrad* als Gleitkommazahlen abgebildet.

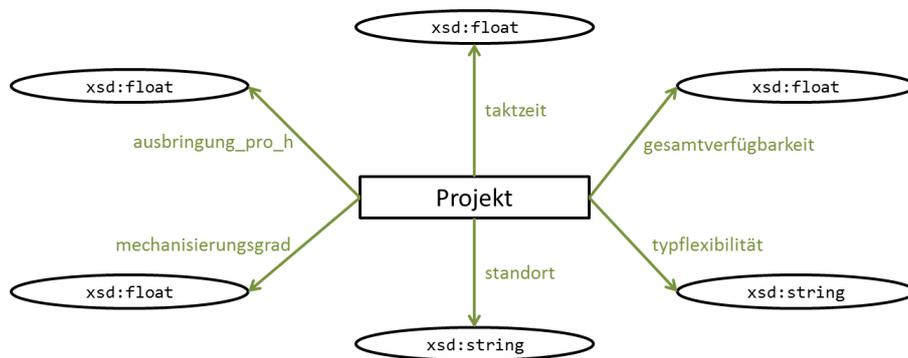


Abbildung 69: Datatype-Properties der Klasse "Projekt" (eigene Darstellung)

Das *Produkt* besitzt vier verschiedene Attribute, die es näher beschreiben. Die *Teilenummer* identifiziert jedes Bauteil entsprechend der Vorgabe der Produktentwicklung und wird als Zeichenkette abgebildet. Von dieser stammt auch die Information über den *Reifegrad* des Bauteils. Dieser gibt Auskunft über den Konstruktions- und Entwicklungsstand. Er wird in Form einer Zeichenkette mit der Angabe eines Meilensteines, die das *Produkt* im Produktentstehungsprozess erreicht hat, beschrieben. Außerdem werden die Produkteigenschaften des *Materials* und des *Gewichts* mitgegeben. Die Übersicht der Datatype-Properties ist in Abbildung 70 angegeben.

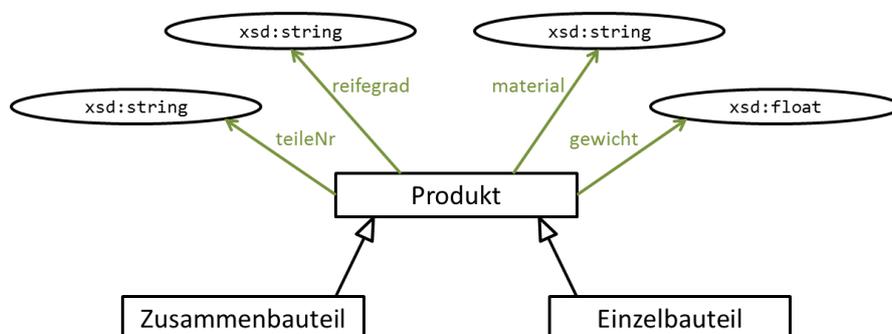


Abbildung 70: Datatype-Properties der Klasse "Produkt" (eigene Darstellung)

Neben den Attributen werden für die *Produkt*-Ontologie auch Relationen in Form von Object-Properties definiert. Die Beziehungsübersicht für das Produkt ist in Abbildung 71 zu sehen. Die Produkthierarchie wird durch die Relationen *ist\_direkte\_Komponente\_von* und deren inverse Relation *hat\_direkte\_Komponente* hergestellt. Jedes *Zusammenbauteil* besteht aus mindestens zwei weiteren Komponenten, die entweder wieder ein *Zusammenbauteil* oder ein *Einzelbauteil* sind. Ebenso kann ein *Produkt* nur eine direkte Komponente von höchstens einem *Zusammenbauteil* sein. Ein *Einzelbauteil* ist definiert als ein *Produkt*, das nicht aus weiteren Komponenten besteht. Damit ist der Zusammenhang zwischen *Zusammen-* und *Einzelbauteilen* innerhalb einer Produkthierarchie klar beschrieben. Den zweiten Aspekt in der *Produkt*-Ontologie stellen die Verbindungsdaten dar. Zunächst kann jedes *Produkt* mit weiteren *Produkten* verbunden sein. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um das Endprodukt. Die Klasse *Verbindung* definiert die Instanzen der Verbindungsarten, die mehrere Bauteile miteinander verbinden und ist über die Object-Property *verbindet* in die *Produkt*-Ontologie integriert.

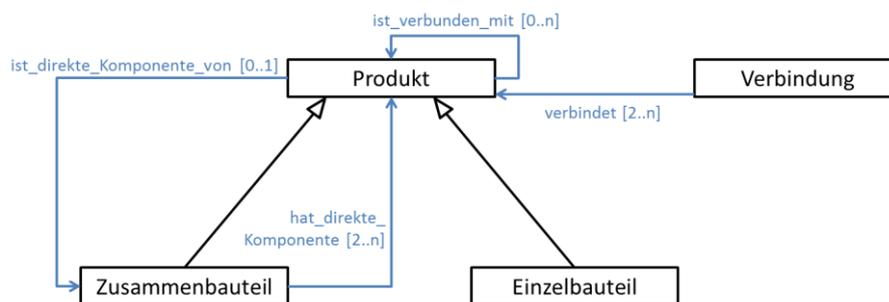


Abbildung 71: Object-Properties der Klasse "Produkt" (eigene Darstellung)

Bei der Teil-Ontologie für die Prozessbeschreibung wird lediglich ein Attribut in Form der Datatype-Property für die *Dauer* ergänzt. Dieses beschreibt bei allen zeitlichen *Entitäten*, die innerhalb dieser Teil-Ontologie definiert sind die zeitliche Dauer eines Vorgangs und wird durch den Vererbungsmechanismus auch in den innerhalb der Klassenhierarchie weiter unten definierten Klassen bereitgestellt. Die Prozesshierarchie wird durch die Object-Property *hat\_subAktivitaet* hergestellt, welche es ermöglicht *Prozesse* in weitere Prozessbestandteile zu unterteilen. Weiterhin wird die Reihenfolgebeziehung mithilfe von *hat\_Vorgänger* und *hat\_Nachfolger* erzeugt, wobei beide Object-Properties als invers zueinander definiert werden. Diese Reihenfolge wird auf der Ebene der *Fügefolgen* erstellt. Jede *Fügefolge* kann mehrere Vorgänger, jedoch nur höchstens einen Nachfolger besitzen. Außerdem wird jede *Fügefolge* einem *Takt* zugeordnet. Lediglich in dem Fall, dass die Vorgangsdauer einer *Fügefolge* die zur

Verfügung stehende Taktzeit überschreitet, wird eine *Fügefølge* mehreren *Takten* zugeordnet. Die Übersicht der Object- und Datatype-Properties ist in Abbildung 72 dargestellt.

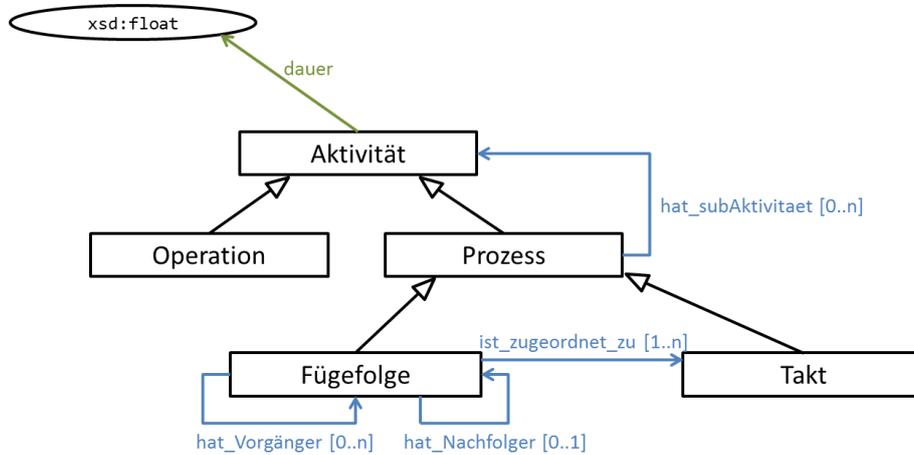


Abbildung 72: Datatype- und Object-Properties der Klasse "Aktivität" (eigene Darstellung)

Auch bei der *Ressourcen*-Ontologie existieren Beziehungen zwischen den Klassen. Zunächst werden Relationen definiert, die die verschiedenen Fertigungsebenen innerhalb eines Karosseriebaus erzeugen. Eine *Fertigungsanlage* kann aus weiteren untergeordneten *Fertigungsanlagen* bestehen, was mithilfe von *hat\_subAnlage* ausgedrückt wird. Sobald sich eine *Fertigungsanlage* nicht mehr weiter vernünftig aufteilen lässt, werden dieser mit der Relation *hat\_Station Stationen* zugeordnet. Bei genauerer Betrachtung einer *Station* ergeben sich dessen Bestandteile in Form von *Gebrauchsobjekten*. Dafür sorgt die Object-Property *hat\_Inhalt*. Der Sachverhalt, dass zur Nutzung gewisser *Gebrauchsobjekte* weitere *Gebrauchsobjekte* notwendig sind, wird mit *benötigt* definiert. Dies ist zum Beispiel der Fall bei einer Schweißzange. Diese benötigt je nach Ausführungsart einen Roboter oder Mitarbeiter, um den Fertigungsprozess auszuführen. Außerdem existiert bei der Teilontologie der Ressourcen eine Datatype-Property, die die *Kosten* definiert. Dadurch wird die Möglichkeit erzeugt, später eine kostenoptimierte Zielfunktion zu benutzen. Dieses Attribut und die zuvor beschriebenen Relationen sind in Abbildung 73 angegeben.

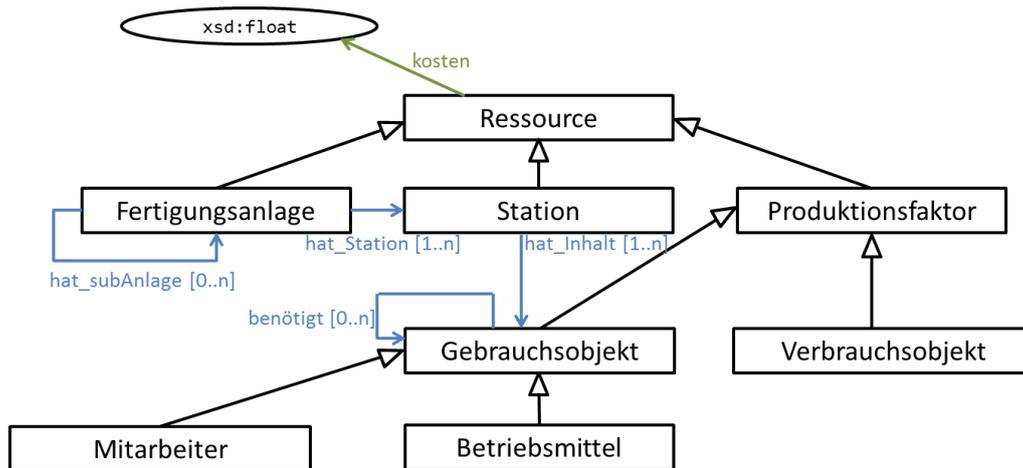


Abbildung 73: Datatype- und Object-Properties der Klasse "Ressource" (eigene Darstellung)

Zusätzlich zu den Relationen innerhalb der Teil-Ontologien gibt es noch Beziehungen, die diese miteinander verbinden. Dargestellt sind diese in Abbildung 74. Dabei wurde im Sinne der Übersichtlichkeit darauf verzichtet, die bereits eingeführten Relationen erneut abzubilden. Ein Gesamtabbild der Ontologie ist im Anhang zu finden. Die Klasse *Produkt* erhält mit *gehört\_zu* eine weitere Beziehung, die jedes Bauteil einem bestimmten *Projekt* zuordnet. Eine *Verbindung* wird zu einer *Fügefolge* durch *ist\_Teil\_von* in Beziehung gesetzt. Sie gehört dabei zu genau einer *Fügefolge*, die wiederum aus mehreren *Verbindungen* bestehen kann. Auch die Klasse *Zusammenbauteil* wird mit der Klasse *Fügefolge* in Beziehung gesetzt, indem mit *fügt* angegeben wird, welches *Zusammenbauteil* im Rahmen welcher *Fügefolge* gefertigt wird. Die Relation zwischen *Verbindungen* und *Fügeoperationen* wird durch die Object-Property *realisiert* hergestellt. Damit besteht eine konkrete Beziehung zwischen den Produktdaten und den Prozessdaten. Die Relation *realisiert* besitzt jedoch noch weitere Sub-Properties, die eine spezifische Beziehung zwischen den einzelnen Verbindungsarten und deren entsprechenden Fügeoperationsarten aufbauen. In der Abbildung 74 sind auszugsweise die Object-Properties *schweißt* und *klebt* angegeben. Dies bedeutet, dass im Rahmen einer bestimmten *Schweiß-* oder *Klebeoperation* eine zugeordnete *Schweiß-* oder *Klebeverbindung* erzeugt wird. Weiterhin sind die Bestandteile einer *Fügefolge* durch die Relation *besteht\_aus* beschrieben. Eine *Fügefolge* ergibt sich somit aus einer Menge an *Fügeoperationen*. Der Abbildung 74 ist außerdem zu entnehmen, dass ein *Takt* durch *entspricht* genau einer *Station* zugewiesen ist. Eine *Station* ist äquivalent zu einem *Takt*, wobei ein *Takt* die Prozesssicht und eine *Station* die Ressourcensicht darstellt. Mithilfe von *führt\_aus* wird definiert, welche *Füge-Betriebsmittel* welche *Fügeoperationen* durchführen. Dieses Wissen bringt die Möglichkeit hervor, die oben

aufgeführte dritte Testfrage zu beantworten. Dabei ist es denkbar, dass ein *Füge-Betriebsmittel* mehrere *Fügeoperationen* ausführt. Durch die Angabe dieser Relationen besteht die Möglichkeit ausgehend vom Produkt bis hin zur Ressourcenübersicht den Fertigungsprozess zu definieren. Damit ist die Basisontologie im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet. Nun gilt es diese zu nutzen und algorithmisch mit Instanzen zu füllen.

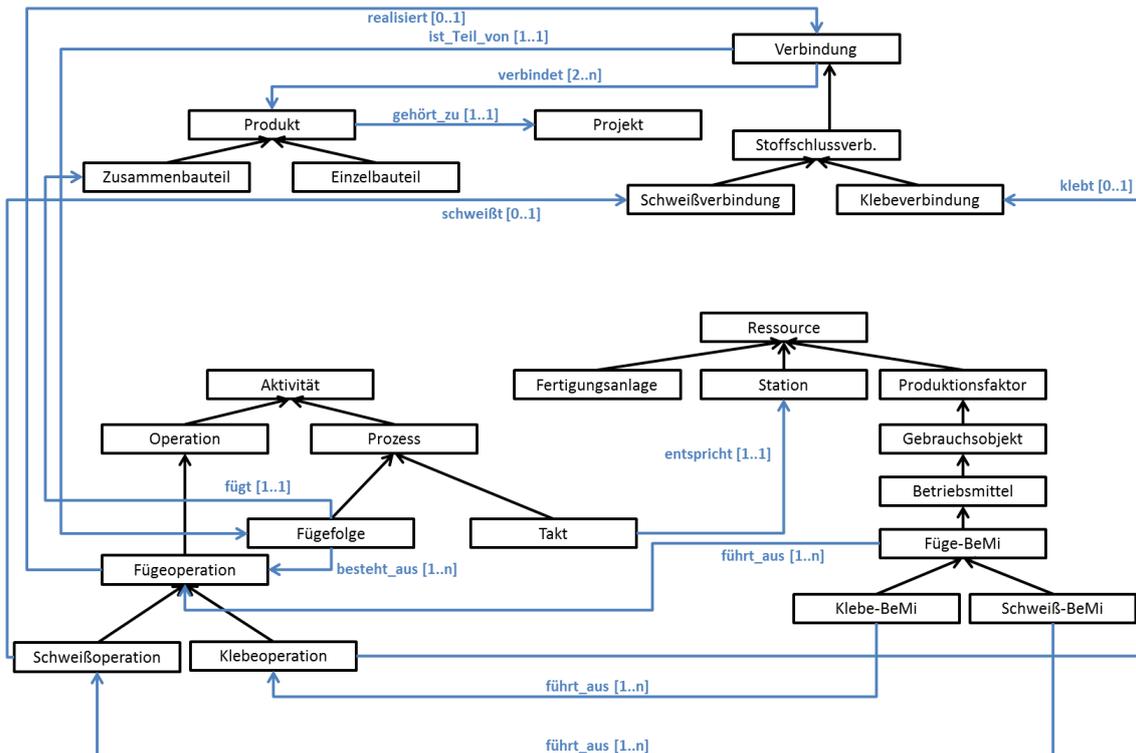


Abbildung 74: Gesamtübersicht der erarbeiteten Ontologie (eigene Darstellung)

### 5.3 Vorgehensweise zur Herleitung der Fertigungsanlagen

Die erstellte Ontologie bildet die Wissensbasis für Zusammenhänge im Karosseriebau. Nun gilt es dieses maschinenlesbar beschriebene Wissen auch nutzbar zu machen. Dazu wird folgend ein algorithmisches Vorgehen erarbeitet, das es ermöglicht, ausgehend von erhaltenen Produktdaten eine Fertigungsanlage herzuleiten.

#### 5.3.1 Analyse der Prämissen und Abbildung in Ontologie

Sowohl die Produkt- als auch die Verbindungsdaten stammen von der Produktentwicklung. Sie sind somit als Input für das zu konzipierende System zu betrachten. Die Verbindungsdaten werden dabei anhand der Produktdaten beschrieben. Diese Situation ist in Abbildung 75 beschrieben. Aktuell werden die Produktdaten in sehr unterschiedlichen und nicht standardisierten Formaten zur Verfügung gestellt. Im Bereich der Pro-

duktstandards für den Karosseriebau wurde jedoch ein einheitliches Datenformat auf XML-Basis erarbeitet. Dieses wird auch im Planungssystem Process Designer genutzt und dient im Rahmen dieser Arbeit als Basis für die weiteren Betrachtungen.

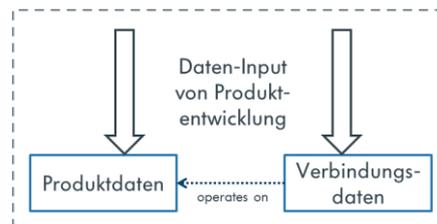


Abbildung 75: Eingangsdaten für das Konzept (eigene Darstellung)

Somit existiert ein Beschreibungsstandard für Produkt- und Verbindungsdaten innerhalb der Karosseriebauplanung. Dieser wird im Rahmen der Konzepterstellung genutzt. Um jedoch diese Daten auch innerhalb der entwickelten Ontologie nutzbar zu machen, ist es notwendig die Daten zu mappen. Vorteilhaft ist dabei, dass sowohl das Ausgangsdatenformat als auch die Ontologie mit XML-basierten Sprachen beschrieben sind. Ein Produkt ist in der XML-Datei zur Produktdatenbeschreibung durch eine hierarchische Produktstruktur definiert. Ähnlich zur erarbeiteten Ontologie wird zwischen *Zusammen-* und *Einzelbauteilen* unterschieden. *Zusammenbauteile* werden jedoch als *PmCompoundPart* und *Einzelbauteile* als *PmPartInstance* bezeichnet. Die ObjectProperty *hat\_direkte\_Komponente* innerhalb der Ontologie entspricht dem XML-Tag *<children>* in der Produktbeschreibung. Durch diese Information ist die Beantwortung der ersten Testfrage aus Kapitel 5.2.2 nachgewiesen. Durch die Angabe von *<item>*-Tags unterhalb des *<children>*-Tags werden die direkten Bauteil-Komponenten definiert. Der Zusammenhang dieser Darstellungsvarianten ist in Abbildung 76 gegeben.

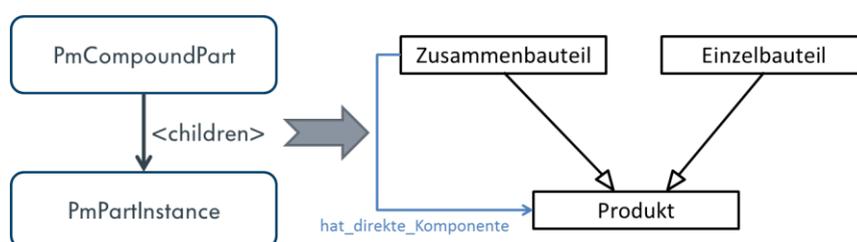


Abbildung 76: Zusammenhang zwischen Produktdaten in XML-Datei und Ontologie (eigene Darstellung)

Zusätzlich stellt die Tabelle 25 ein direktes Mapping zwischen der ursprünglichen Beschreibung auf der linken Seite und derjenigen mit der OWL-Ontologie auf der rechten Seite dar. An dieser Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass hauptsächlich durch die Benutzung von URIs innerhalb der Ontologie zur Verknüpfung von Entitäten der Um-

fang der Datei zunimmt. Die Definition der Daten ist dabei jedoch wesentlich genauer, was die Möglichkeit der Maschinenverarbeitung weiter erhöht. Dazu gehört auch, dass die einzelnen Bauteile als verschieden voneinander definiert werden müssen. Nur durch diese Zusatzinformation kann ein späteres automatisches Schlussfolgern ermöglicht werden. Dies geschieht durch eine OWL-Collection, die alle Mitglieder als disjunkt voneinander definiert. Zu dieser Menge werden alle Bauteile hinzugefügt. Dadurch ist belegt, dass ein exaktes Mapping der vorhandenen Produktdaten in die Ontologie möglich ist.

<pre> &lt;PmCompoundPart ExternalId="2768"&gt;    &lt;name&gt;CompoundPart&lt;/name&gt;    &lt;comment&gt;Zusammenbauteil&lt;/comment/&gt;    &lt;status&gt;Open&lt;/status&gt;    &lt;children&gt;     &lt;item&gt;8913&lt;/item&gt;      &lt;item&gt;5372&lt;/item&gt;   &lt;/children&gt; &lt;/PmCompoundPart&gt; </pre>	<pre> &lt;owl:NamedIndividual rdf:about= "http://www.example.org/ontology#ZSB1"&gt;   &lt;rdf:type rdf:resource= "http://www.example.org/ontology#Produkt"/&gt;   &lt;pm_xml_tag rdf:datatype= "&amp;xsd:string"&gt;PmCompoundPart&lt;/pm_xml_tag&gt;   &lt;teileNr rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;2768&lt;/teileNr&gt;    &lt;name rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;CompoundPart&lt;/name&gt;    &lt;beschreibung rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;     Zusammenbauteil&lt;/beschreibung&gt;    &lt;reifegrad rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;Open&lt;/reifegrad&gt;    &lt;hat_direkte_Komponente     rdf:resource="http://www.example.org/ontology#EBT1"/&gt;   &lt;hat_direkte_Komponente     rdf:resource="http://www.example.org/ontology#EBT2"/&gt; &lt;/owl:NamedIndividual&gt; </pre>
<pre> &lt;PmPartInstance ExternalId="8913"&gt;    &lt;name&gt;Teil li*&lt;/name&gt;    &lt;comment&gt;Einzelbauteil&lt;/comment/&gt;    &lt;status&gt;Open&lt;/status&gt; &lt;/PmPartInstance&gt; </pre>	<pre> &lt;owl:NamedIndividual rdf:about= "http://www.example.org/ontology#EBT1"&gt;   &lt;rdf:type rdf:resource= "http://www.example.org/ontology#Einzelbauteil"/&gt;   &lt;teileNr rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;8913&lt;/teileNr&gt;    &lt;name rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;Teil li*&lt;/name&gt;    &lt;beschreibung rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;     Einzelbauteil&lt;/beschreibung&gt;    &lt;reifegrad rdf:datatype="&amp;xsd:string"&gt;Open&lt;/reifegrad&gt; &lt;/owl:NamedIndividual&gt; </pre>

**Tabelle 25: Gegenüberstellung XML-Datei (links) und OWL-Ontologie (rechts) zur Produktdatenbeschreibung**

Auch die Verbindungsdaten liegen in der gleichen XML-Input-Datei vor, in denen auch die Produktdaten beschrieben sind. Ebenso wie bei den Produktdaten ist es notwendig, ein Mapping zwischen den Ausgangsdaten und der Ontologie zu erzeugen. Dieses wird in Abbildung 77 veranschaulicht. Alle Verbindungsdaten werden innerhalb des `<PmMfgLibrary>`-Tags aufgelistet. Erneut geschieht dies mithilfe von `<item>`-Tags unterhalb des `<children>`-Tags. Auf dieser Ebene befinden sich die verschiedenen *Verbindungen*, die ihrer Verbindungsart als Klasse zugeordnet sind. Durch die Verwendung von `<operatesOn>` wird definiert, welche Bauteile der Klasse `PmPartInstance` die Verbindung zusammenfügt. Dies entspricht der ObjectProperty *verbindet*.

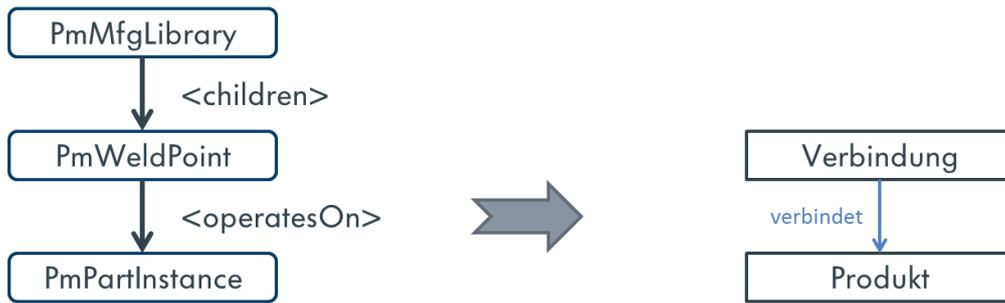


Abbildung 77: Zusammenhang zwischen Verbindungsdaten in XML-Datei und Ontologie (eigene Darstellung)

Die Tabelle 26 zeigt für die Beschreibung der Verbindungsdaten eine Gegenüberstellung der beiden Datenformate. Wieder befindet sich auf der linken Seite der Ausschnitt aus der XML-Datei, die als Ausgangsformat verwendet wird. Die rechte Seite zeigt die Ontologie im RDF/XML-Format auszugsweise für die Beschreibung der Verbindung. Auch bei den Verbindungsdaten ergibt sich die Erkenntnis, dass ein Mapping der Verbindungsdaten in die Ontologie möglich ist. Die Ontologie bietet somit nachweislich die Möglichkeit, die von der Produktentwicklung bereitgestellten Daten in Bezug auf Produktstruktur und Verbindungen abzubilden.

<pre> &lt;PmMfgLibrary ExternalId="5370"&gt;   &lt;name&gt;MfgLibrary*&lt;/name&gt;   &lt;comment&gt;alle Verbindungen&lt;/comment&gt;   &lt;children&gt;     &lt;item&gt;4346&lt;/item&gt;     &lt;item&gt;4528&lt;/item&gt;   &lt;/children&gt; &lt;/PmMfgLibrary&gt;  &lt;PmWeldPoint ExternalId="4346"&gt;    &lt;name&gt;Schweisspunkt1&lt;/name&gt;    &lt;comment&gt;Schweisspunkt&lt;/comment&gt;    &lt;operatesOn&gt;     &lt;item&gt;8913&lt;/item&gt;      &lt;item&gt;5372&lt;/item&gt;   &lt;/operatesOn&gt; &lt;/PmWeldPoint&gt;         </pre>	<pre> &lt;owl:NamedIndividual rdf:about=   "http://www.example.org/ontology#SP1"&gt;   &lt;pm_xml_tag rdf:datatype="xsd:string"&gt;     PmWeldPoint&lt;/pm_xml_tag&gt;    &lt;rdf:type rdf:resource     "http://www.example.org/ontology#Verbindung"/&gt;    &lt;name rdf:datatype="xsd:string"&gt;Schweisspunkt1&lt;/name&gt;    &lt;beschreibung rdf:datatype="xsd:string"&gt;     Schweisspunkt&lt;/beschreibung&gt;    &lt;verbindet rdf:resource=     "http://www.example.org/ontology#EBT1"/&gt;   &lt;verbindet rdf:resource=     "http://www.example.org/ontology#EBT2"/&gt; &lt;/owl:NamedIndividual&gt;         </pre>
--	--

Tabelle 26: Gegenüberstellung XML-Datei (links) und OWL-Ontologie (rechts) zum Thema Verbindungsdaten

Bei der Definition der Object-Properties für die Produkt-Ontologie wurden neben den Relationen *hat\_direkte\_Komponente* und *verbindet* die Beziehungen *ist\_direkte\_Komponente\_von* und *ist\_verbunden\_mit* beschrieben. Die beiden Object-

Properties *hat\_direkte\_Komponente* und *ist\_direkte\_Komponente\_von* stehen durch ihre inverse Beziehungseigenschaft in einer direkten Verbindung zueinander. In der Ontologie ist es lediglich notwendig eine der beiden Relationen für eine *Produkt*-Instanz zu beschreiben. Durch Inferenz wird die inverse Eigenschaft automatisch zur *Produkt*-Instanz hinzugefügt. Diese automatische Schlussfolgerung wird in der Abbildung 78 im Ontologie-Editor Protégé gezeigt. Auf der linken Seite der Abbildung wird *ist\_direkte\_Komponente\_von* als invers zu *hat\_direkte\_Komponente* definiert. Die rechte Seite der Abbildung zeigt das Inferenzergebnis des hier verwendeten Reasoners HermiT. Der gelbe Kasten stellt in Protégé dar, dass diese Eigenschaft durch Inferenz ermittelt wurde. Auch durch Inferenz ermittelte Daten können in der Ontologie abgespeichert und weiterverwendet werden.

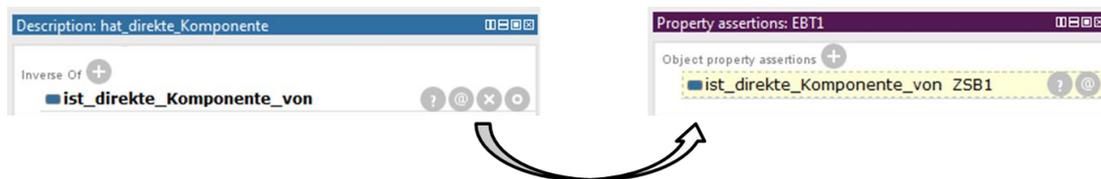


Abbildung 78: automatische Schlussfolgerung der Komponentenbeziehung in Protégé (eigene Darstellung)

Die Object-Property *ist\_verbunden\_mit* kann nicht durch die einfache Angabe einer Beziehungseigenschaft automatisch geschlussfolgert werden. Es gibt jedoch die Möglichkeit, Ontologien um Regeln anzureichern. Dies erfolgt mithilfe von SWRL (HORROCKS et al. 2014). Diese Abkürzung steht für Semantic Web Rule Language. Die SWRL ermöglicht es Regeln, wie sie auch aus anderen logischen Programmiersprachen wie Prolog bekannt sind, auf die Wissensbasis anzuwenden. Die Definition dieser Regeln ist in Protégé sehr einfach zu ergänzen. Die Beschreibung direkt im OWL-Quelltext ist wesentlich aufwendiger. Um schlussfolgern zu können, dass zwei Bauteile miteinander verbunden sind, ist es zuerst erforderlich, dass die beteiligten Variablen deklariert werden. In Protégé erfolgt dies in der Form: *Klassenbezeichnung(?Variablenbezeichnung)*. Zu definieren sind zwei Produkt- und eine Verbindungsvariable. Jeder Fakt wird durch ein Komma voneinander getrennt. Außerdem wird festgelegt, dass die beiden Bauteile voneinander verschieden sein müssen, so dass nicht gilt, dass jedes Bauteil mit sich selber verbunden ist. Wenn eine *Verbindung* ein erstes Bauteil *verbindet* und die gleiche *Verbindung* ein zweites Bauteil *verbindet*, dann kann geschlussfolgert werden, dass diese Bauteile miteinander verbunden sind. Zur besseren Verständlichkeit ist dieses Vorgehen in Tabelle 27 noch einmal abgebildet.

Produkt(?P1), Produkt(?P2), Verbindung(?V1),  DifferentFrom (?P1, ?P2),  verbindet(?V1, ?P1), verbindet(?V1, ?P2) -> ist_verbunden_mit(?P1, ?P2)	<u>Festlegung der Variablen</u> <i>Deklaration der ersten Produktvariable P1</i> <i>Deklaration der zweiten Produktvariable P2</i> <i>Deklaration der Verbindungsvariable V1</i>  <u>Variablenrestriktionen</u> <i>Definition, dass P1 und P2 unterschiedlich voneinander sind</i>  <u>Aufstellung der Regel</u> <i>Wenn V1 zunächst P1 verbindet</i> <i>und V1 auch P2 verbindet,</i> <i>dann folgt daraus, dass</i> <i>P1 mit P2 verbunden ist.</i>
---	---

Tabelle 27: Regeldefinition zur Inferenz der Verbindungen

Auch die Klassifizierung der importierten Produkt- und Verbindungsdaten erfolgt durch Inferenz. Die Bauteile werden beim XML-Mapping in die Ontologie lediglich innerhalb der Klasse *Produkt* definiert. Es findet keine Unterscheidung zwischen Einzel- und Zusammenbauteil statt. Ebenso wird jede gemappte Verbindung der Klasse *Verbindung* zugeordnet. Die Klassifizierung erfolgt mithilfe der Datatype-Property *pm\_xml\_tag*. Diese beinhaltet den ursprünglichen Bezeichner des XML-Tags aus der importierten Datei. Wie bereits oben beschrieben, werden *Einzel-* und *Zusammenbauteile* durch die XML-Tags *PmPartInstance* und *PmCompoundPart* beschrieben. Auch bei den Verbindungen existieren eindeutige XML-Tags, die die Zuordnung zu einer Verbindungsart ermöglichen. Das Tag *PmWeldPoint* definiert beispielsweise einen *Schweisspunkt*. Durch diese eindeutige Zuordenbarkeit ist es möglich, weitere Regeln aufzustellen, die anhand des Attributs *pm\_xml\_tag* eine Klassifizierung vornehmen. Dieses wird am Beispiel des *Zusammenbauteils* in Tabelle 28 gezeigt. Die Regeln für die Zuordnung der *Einzelbauteile* und Verbindungsarten werden analog dazu gebildet. Die damit zusammengetragenen Informationen ermöglichen zudem die Beantwortung der zweiten Testfrage aus Kapitel 5.2.2.

Produkt(?P), pm_xml_tag(?P, "PmCompoundPart")  -> Zusammenbauteil(?P)	<i>Angenommen, die Instanz P ist ein Produkt</i> <i>und dieses Produkt P besitzt das XML-Tag</i> <i>„PmCompoundPart“,</i> <i>dann folgt daraus,</i> <i>dass P ein Zusammenbauteil ist.</i>
---	--

Tabelle 28: Regeldefinition zur Inferenz der Zusammenbauteile

Für die automatische Durchführung des Mappings von der Input-XML-Datei in die OWL-Ontologie-Datei ist es notwendig eine Software zu verwenden. Dabei existieren bereits viele Tools, die genau diesen Zweck erfüllen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit eine eigene Software zu entwickeln, die genau für diesen Anwendungszweck eingesetzt wird und in den hier erarbeiteten Prozess integriert wird. Diese Aufgabe wird nicht im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Durch die erlangten Erkenntnisse wird die Annahme getroffen, dass ein Mapping möglich ist und die Produkt- und Verbindungsdaten korrekt in der Ontologie beschrieben sind. Das ist der Ausgangspunkt für die weitere Erarbeitung des Konzeptes, denn diese Daten stellen die Basis zur Herleitung des Fertigungsprozesses dar.

### 5.3.2 Herleitung des Fertigungsprozesses

Die Verknüpfung zwischen den gegebenen Produktdaten und dem Fertigungsprozess erfolgt über die Fügeoperationen. Den real existierenden Verbindungen wird somit ein Prozessschritt zugeordnet. In der Ausgangssituation besitzt die Ontologie keine Instanzen für die Operationen. Daher wird die Ontologie mit Instanzen gefüllt. Für jede Verbindung, die mithilfe der gegebenen Verbindungsdaten instanziiert wurde, wird eine entsprechende Instanz in der Klasse *Operation* erzeugt. Diese erhält zusätzlich die Object-Property *realisiert*, welche die Instanz der *Operation* mit der Instanz der *Verbindung* in Relation setzt. Durch das Einführen einer weiteren Regel pro Verbindungsart in der Ontologie ist es möglich, lediglich aus der Information, welche Verbindung eine bestimmte Operation realisiert, zu ermitteln, um was für eine Art von Operation es sich handelt. Diese Regel wird am Beispiel einer Schweißverbindung in Tabelle 29 erläutert.

<p>Operation(?O), Schweißverbindung(?SV), realisiert(?O, ?SV)</p> <p>-&gt;</p> <p>Schweißoperation(?O), schweisst(?O, ?SV)</p>	<p><i>Sei O eine Instanz der Klasse Operation und sei SV eine Instanz der Klasse Schweißverbindung. Wenn die Operation O die Schweißverbindung SV realisiert, dann folgt daraus, dass O eine Schweißoperation ist und diese auch die Schweißverbindung SV schweißst.</i></p>
--	--

Tabelle 29: Regeldefinition zur Inferenz von Schweißverbindungen und –operationen

Im nächsten Schritt wird jeder instanziierten Operation das Attribut für die *Dauer* aufgeprägt. Damit bekannt ist, welche Dauer für welche Art von Operation notwendig ist, wird für jede Operationsart eine Referenz als Instanz in der Basis-Ontologie angelegt. Jede Instanz, die anschließend erzeugt wird, beruht auf diesen Referenzen. Die Data-type-Property *dauer* wird ebenso mithilfe einer zur Ontologie hinzugefügten Regel

durch Inferenz ermittelt. Die Erklärung der Funktionsweise dieser Regel ist wieder am Beispiel einer Schweißoperation in Tabelle 30 abgebildet.

<p>Schweissoperation(?SO),  dauer(WPS_Referenz, ?TD),  DifferentFrom (?SO,WPS_Referenz)  -&gt;  dauer(?SO, ?TD)</p>	<p><i>Es sei SO eine Instanz der Klasse Schweißoperation und es sei TD die Dauer der Referenz für eine Schweißoperation.  Dabei gilt, dass es sich bei SO nicht selber um die Referenz handelt.  Dann folgt daraus, dass der Schweißoperation SO die Dauer der Referenz zugeordnet wird.</i></p>
---	--

**Tabelle 30: Regeldefinition zur Inferenz der Operationsdauer einer Schweißoperation**

Durch die nun vorhandene Beziehung zwischen den Verbindungsdaten und ihren jeweiligen Operationen ist es möglich, die Fügefolgen herzuleiten. Die Reihenfolge der auszuführenden Fügefolgen wird anhand der Fertigungsebene aus der Produktstruktur ermittelt. Sowohl die Aufgabe der Zuordnung von Fügeoperationen zu den Fügefolgen als auch der Bildung der Reihenfolge der einzelnen Fügefolgen erfolgt durch Inferenz innerhalb der Ontologie. Dazu wird zunächst für jedes in der Ontologie vorhandene *Zusammenbauteil* eine Instanz innerhalb der Klasse *Fügefolge* gebildet. Gleichzeitig erhält die jeweilige Fügefolge die Object-Property *fügt*, welche das Zusammenbauteil zur Fügefolge in Beziehung setzt. Die inverse Relation *gefügt\_in* wird später durch Inferenz automatisch geschlussfolgert. Nun gilt es diese *Fügefolgen*-Instanz mit Informationen anzureichern und sie in Relation zu setzen zu den bereits vorhandenen Elementen der Ontologie. Dafür werden zuerst alle direkten Komponenten des zur Fügefolge gehörenden Zusammenbauteils mithilfe der Object-Property *hat\_direkte\_Komponente* ermittelt. Ausgehend davon werden die Verbindungen ermittelt, die diese Komponenten durch die Relation *verbindet* besitzen. Durch diese Verbindungsinformationen lässt sich herleiten, welche Fügeoperationen diese realisiert. Anschließend wird für die ausgewählte *Fügefolge*-Instanz die Relation *besteht\_aus* zu den jeweiligen ermittelten Fügeoperationen hergestellt. Dieses Vorgehen wird durch die Regel 1 im oberen Teil der Tabelle 31 ausgedrückt.

Die Zuordnung der Fügeoperationen zu den Fügefolgen ist damit erfolgt. Auch die Reihenfolgeaufgabe lässt sich mithilfe einer Inferenzregel in der Ontologie lösen. Dazu wird die Information der direkten Komponente zwischen zwei Bauteilen innerhalb der Produktstruktur benötigt. Die Fügefolge, die dem Bauteil auf der unteren Ebene in der Hierarchie zugeordnet ist, wird dabei als Vorgänger der anderen Fügefolge definiert.

Dadurch, dass die Relationen *hat\_Vorgänger* und *hat\_Nachfolger* als invers zueinander definiert sind, kann daraus automatisch die Relation *hat\_Nachfolger* geschlussfolgert werden. Die entsprechende Regel 2 befindet sich im unteren Teil der Tabelle 31.

<p><b>Regel 1 (Zuordnungsaufgabe)</b></p> <p>Produkt(?K), Zusammenbauteil(?ZSB),</p> <p>Fuegefolge(?FF), Verbindung(?V), Fügeoperation(?FO),</p> <p>gefuegt_in(?ZSB, ?FF),</p> <p>hat_direkte_Komponente(?ZSB, ?K),</p> <p>verbindet(?V, ?K), realisiert(?FO, ?V)</p> <p>-&gt; besteht_aus(?FF, ?FO)</p>	<p><u>Festlegung der Variablen</u> Deklaration der Variable K als Produkt Deklaration der Variable ZSB als Zusammenbauteil Deklaration der Variable FF als Fügefolge Deklaration der Variable V als Verbindung Deklaration der Variable FO als Fügeoperation</p> <p><u>Aufstellung der Regel</u> Betrachtet wird das ZSB, das in FF zusammengesetzt wird. Wenn dieses ZSB aus der Komponente K besteht und die Verbindung V dieses K verbindet und eine bestimmte Fügeoperation FO wiederum das V realisiert, dann folgt daraus, dass die Fügefolge FF aus der Fügeoperation FO besteht.</p>
<p><b>Regel 2 (Reihenfolgeaufgabe)</b></p> <p>Zusammenbauteil(?ZSB),</p> <p>Produkt(?P), Fuegefolge(?FF_V),</p> <p>Fuegefolge(?FF_N),</p> <p>hat_direkte_Komponente(?ZSB, ?P),</p> <p>gefuegt_in(?ZSB, ?FF_N), gefuegt_in(?P, ?FF_V)</p> <p>-&gt; hat_Vorgaenger(?FF_N, ?FF_V)</p>	<p><u>Festlegung der Variablen</u> Deklaration der Variable ZSB als Zusammenbauteil Deklaration der Variable P als Produkt Deklaration der Variable FF_V als Fügefolge Deklaration der Variable FF_N als Fügefolge</p> <p><u>Aufstellung der Regel</u> Sei ZSB das zu P übergeordnete Bauteil und die Fügefolge FF_N fügt das ZSB und die Fügefolge FF_V fügt das P, dann gilt, dass FF_N den Vorgänger FF_V hat.</p>

Tabelle 31: Regeldefinition zur Lösung der Zuordnungs- und Reihenfolgeproblematik

Der Prozessablauf ist damit hergeleitet. Es folgt die Aufteilung der Arbeitsinhalte auf die zeitlichen Einheiten und möglichen Ressourcen. Dabei werden unterschiedliche Alternativen gebildet, die anschließend bewertet werden. Zurzeit ist es mit der Struktur der Ontologie nicht möglich verschiedene Alternativen abzubilden. Daher ist einer Erweiterung notwendig. Die Einordnung dieser Anpassungen ist in Abbildung 79 dargestellt. Die neu hinzugefügte Klasse *Alternative* wird auf höchster Ebene unterhalb der Klasse *Thing* und auf einer Stufe mit der Klasse *Entität* eingegliedert. Es werden je nach Anwendungsfall verschiedene Arten von Alternativen unterschieden. Die *Alternativengruppe* ist die allgemeinste Klasse, die direkt einer oder mehreren Fügefolgen zugeordnet werden kann. Jede *Alternativengruppe* besitzt die Möglichkeit, aus mehreren *Arbeitsfolge-Varianten* zu bestehen. Die *Arbeitsfolge-Varianten* stellen die unterschiedlichen zeitlichen Aufteilungen der Arbeitsinhalte dar und ergeben sich somit aus den verschiedenen Aufteilungen der enthaltenen *Fügefolge*. Auch die *Arbeitsfolge-Varianten* lassen sich weiter unterteilen in mehrere *Betriebsmittelvarianten*. Diese stellen die untersten Knoten des Variantenbaums dar. Eine *Betriebsmittelvariante* beschreibt die genaue Belegung mit Ressourcen und wird mindestens einem *Takt* zugeordnet.

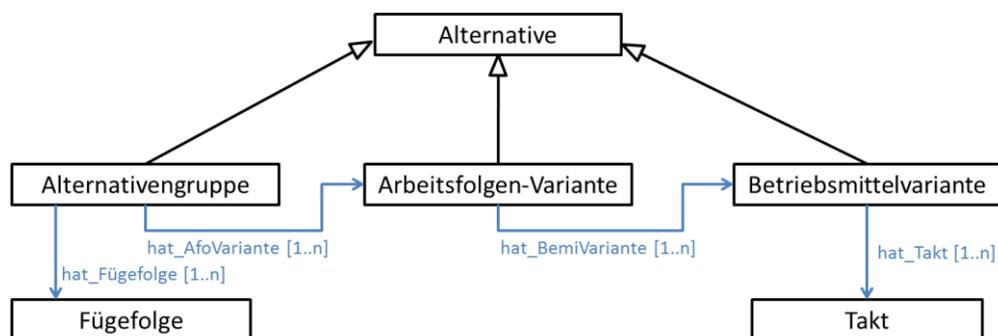


Abbildung 79: Ergänzung der Ontologie um die Klasse "Alternative" (eigene Darstellung)

Durch diese Anpassung der Ontologie ist es nun möglich die einzelnen Alternativen erzeugen zu lassen. In einem ersten Schritt werden die *Alternativengruppen* und deren zugehörige *Arbeitsfolge-Varianten* gebildet, indem hauptsächlich die zeitliche Komponente betrachtet wird. Dabei wird iterativ jede *Fügefolge* und deren kapazitative Auslastung für einen *Takt* geprüft. Der erste Fall ist die Existenz von freien Kapazitäten innerhalb eines Taktes, sodass mehrere Fügefolgen zusammengefasst werden, um den jeweiligen Takt auszulasten. Dazu werden anhand der Vorgänger- und Nachfolgerbeziehungen der Fügefolgen diese so lange zu einer *Arbeitsfolge-Variante* hinzugefügt, bis die Kapazität nicht mehr erweiterbar ist. Das gilt dann auch für den Fall, dass

die Kapazität einer Fügefolge genau der entspricht, die ein Takt besitzt. Außerdem muss das Fügeverfahren der aufeinanderfolgenden Fügefolgen gleich sein. Der zweite Fall stellt das Gegenteil zum ersten dar. Dieser bildet die Situation ab, dass die Kapazität eines Taktes nicht ausreichend ist, um eine Fügefolge vollständig auszuführen. Wenn dies der Fall ist, wird die Fügefolge auf ihre einzelnen Fügeoperationen heruntergebrochen und diese werden auf die einzelnen Takte aufgeteilt. Für jede unterschiedliche Kombination wird eine neue *Arbeitsfolge-Variante* erzeugt. Die für eine Fügefolge gebildeten Varianten werden in einer *Alternativengruppe* zusammengefasst. Im nächsten Schritt gilt es nun die gebildeten Arbeitsfolge-Varianten mit Ressourcen konkret zu hinterlegen.

### 5.3.3 Herleitung der Betriebsmittelzuordnung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Bildung des Fertigungsablaufs mithilfe der *Arbeitsfolge-Varianten* erfolgt ist, werden in diesem Abschnitt die *Betriebsmittelvarianten* erzeugt. Diese stellen die konkrete Aufteilung der Ressourcen und somit die Instanziierung der einzelnen Varianten an Fertigungsflüssen dar. Der konzeptuelle Kern der Herleitung der Ressourcenbelegung der einzelnen Takte ist die innerhalb der Ontologie beschriebene Object-Property *benötigt*. Diese definiert für eine bestimmte Ressource, welche weiteren Ressourcen sie benötigt, um die Funktionsweise ausführen zu können. Für die semantische Richtigkeit ist es jedoch erforderlich die Relation weiter zu detaillieren. Dafür wird diese unterteilt in die beiden Object-Properties *benötigt\_notwendig* und *benötigt\_alternativ*. Die Relation *benötigt\_notwendig* beschreibt die Beziehung zwischen zwei Ressourcen A und B, wobei die Ressource A die Ressource B unbedingt benötigt, um zu funktionieren. Sobald A in einer Station vorhanden ist, ist auch B vorhanden. Mit der Relation *benötigt\_alternativ* werden alternative Abhängigkeiten zwischen mehreren Ressourcen beschrieben. So bedeutet diese Beziehung zum einen zwischen einer Ressource A und einer Ressource B und zum anderen zwischen einer Ressource A und einer Ressource C, dass A entweder B oder C benötigt, um die Funktion auszuführen. Es handelt sich somit um eine exklusive Oder-Beziehung zwischen einer und mehreren anderen Ressourcen. Genau diese Relation wird benötigt, um verschiedene *Betriebsmittelvarianten* bilden zu können. Das Wissen, welche Ressourcen in Abhängigkeit zu anderen Ressourcen stehen, wird mithilfe von Regeln innerhalb der Ontologie abgebildet. Diese ermöglichen sowohl die Abbildung direkter Zusammenhänge zwischen zwei Betriebsmitteln als auch die Abbildung von indirekten Zusammenhängen, die beispielsweise durch eine spezielle Situation gege-

ben sind. Da zum Zeitpunkt der Erstellung der Ontologie und der Regeln noch keine konkreten Instanzen vorliegen, werden innerhalb jeder Ressourcenklasse Referenzen angelegt, von denen die späteren Instanzen abgeleitet werden. Auf diese wird in den Regeln verwiesen.

<p><b>Regel 1 (direkte Notwendigkeit)</b></p> <p>Industrie_Roboter(?IR),          DifferentFrom (?IR, IR_Referenz)          -&gt;          benoetigt_notwendig(?IR, PODEST_Ref)</p>	<p><i>Es sei IR ein Industrie-Roboter und dieser sei nicht die eigene Referenz, dann folgt daraus, dass dieser IR auch unbedingt ein Roboterpodest benötigt.</i></p>
<p><b>Regel 2 (direkte Alternativenbildung)</b></p> <p>Schweisszange(?SZ),          DifferentFrom (?SZ, SZ_Referenz)          -&gt;          benoetigt_alternativ(?SZ, STAEND_Ref),          benoetigt_alternativ(?SZ, IR_Referenz)</p>	<p><i>Es sei SZ eine Schweißzange und diese sei nicht die eigene Referenz, dann folgt daraus, dass diese entweder einen Ständer oder einen Industrie-Roboter benötigt.</i></p>
<p><b>Regel 3 (indirekte Notwendigkeit)</b></p> <p>Schweisszange(?SZ),          Industrie_Roboter(?IR),          DifferentFrom (?IR, IR_Referenz),            hat_direktes_BeMi(?SZ, ?IR)            -&gt;          benoetigt_notwendig(?IR, SPANNVOR_Ref)</p>	<p><i>Es sei SZ eine Schweißzange und es sei IR ein Industrie-Roboter und dieser sei nicht die eigene Referenz und die konkrete Schweißzange ist am Roboter befestigt, dann folgt daraus, dass auch eine Spannvorrichtung benötigt wird.</i></p>

**Tabelle 32: Regeldefinition zur Erzeugung der Abhängigkeiten zwischen Ressourcen**

Um die Umsetzung einer Beziehung zwischen zwei Ressourcen zu instanzieren, wird die Object-Property *hat\_direktes\_Bemi* zur Ontologie hinzugefügt. Die Tabelle 32 zeigt beispielhaft die Aufstellung von drei Regeln dieser Art. Im ersten Beispiel wird die direkte Abhängigkeit von einem Industrie-Roboter, der in jedem Fall ein Roboterpodest benötigt, beschrieben. Das zweite Beispiel zeigt die Möglichkeit auf, alternative Ressourcenbelegungen zu bilden. Es beschreibt konkret den Fakt, dass die Befestigung einer Schweißzange entweder an einem Ständer oder an einem Industrie-Roboter umsetzbar ist. Das dritte Beispiel beinhaltet eine indirekte Abhängigkeit zwischen Res-

sources. So sagt dies aus, dass wenn eine Schweißzange an einem Industrie-Roboter befestigt ist, auch eine Spannvorrichtung benötigt wird, in der die Schweißpunkte gesetzt werden. Durch dieses erzeugte Wissen ist die Beantwortung der vierten Testfrage in Kapitel 5.2.2 möglich.

Es ist denkbar, auch Abhängigkeiten zum Produkt, wie zum Beispiel Material und Gewicht, in die Regeln mit einzubeziehen. Diese Möglichkeit wird jedoch in dem hier vereinfachten Beispiel nicht genutzt und ist zusammen mit Experten des Fachbereichs auszuarbeiten.

Zur Bildung der *Betriebsmittelvarianten* wird iterativ der Inhalt einer jeden Station traversiert. Zunächst werden die primären Ressourcen in Form der *Füge-Betriebsmittel* anhand der jeweiligen zu einer *Fügefolge* gehörenden *Fügeoperationen* hinzugefügt. Wenn ein Betriebsmittel A dabei die Relation *benötigt\_notwendig* Betriebsmittel B besitzt, dann wird diesem auch die Beziehung *hat\_direktes\_BeMi* Betriebsmittel B hinzugefügt. Ist jedoch die Relation *benötigt\_alternativ* Betriebsmittel B vorhanden, dann wird im ersten Schritt wieder die Beziehung *hat\_direktes\_BeMi* Betriebsmittel B hinzugefügt und zusätzlich eine neue *Betriebsmittelvariante* gebildet, die den alternativen Ast iterativ abarbeitet. Durch mehrere Iterationen werden dadurch alle Alternativen erzeugt. Das Ergebnis ist eine Folge von *Alternativen-Gruppen*, die mithilfe der Fügefolgen eine Reihenfolge bilden. Diesen sind *Arbeitsfolge*- und *Betriebsmittelvarianten* zugeordnet, die sowohl die zeitlichen als auch die ressourcenabhängigen Alternativen abbilden. Für jede *Alternativen-Gruppe* ist im nächsten Schritt die optimale *Betriebsmittelvariante* zu wählen, um eine möglichst optimale Fertigungsanlage zu erhalten.

#### **5.3.4 Bewertung von Anlagenkonzepten mithilfe von Kennzahlen**

Ausgehend von den gebildeten Alternativen wird folgend beschrieben, wie der optimale Fertigungsablauf ermittelt wird. Zunächst ist es erforderlich die wichtigsten Kennzahlen zu definieren, die zur Bewertung einer Fertigungsanlage benötigt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich die Wichtigkeit bestimmter Kennzahlen projektspezifisch unterscheidet. Daher ist es sinnvoll eine flexible Zielfunktion zu beschreiben, die die unterschiedlichen Kennzahlen priorisiert. Relevante Kennzahlen im Bereich der Fertigungsplanung im Karosseriebau sind unter anderem die Investitionskosten, die Betriebskosten, die Energieeffizienz und die benötigte Fläche. Es werden bei der Marke Volkswagen PKW derzeit mehrere wissenschaftliche Arbeiten in diesem Umfeld erstellt, die sich ausschließlich mit dem Ermitteln der relevantesten Kennzahlen zur Bewertung einer Fertigungsanlage beschäftigen. Aus diesem Grund wird dieses Gebiet

im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht. Das innerhalb dieser Arbeit erstellte Konzept besitzt die Fähigkeit, auf jede Art von Kennzahl flexibel reagieren zu können, sodass die Möglichkeit besteht, die aus den anderen Arbeiten entstandenen Ergebnisse zum Thema der relevantesten Planungskennzahlen weiter zu verwenden. Die Zielfunktion  $ZF$  ist definiert in der Form:

$$ZF_{BV_m} = w_{K_1} x_{K_1 m} + w_{K_2} x_{K_2 m} + \dots + w_{K_n} x_{K_n m}$$

Sie wird für jede der  $m$  *Betriebsmittelvarianten*  $BV$  angegeben. Das Ergebnis der Zielfunktion ergibt sich aus der Summe der Produkte der zu einer bestimmten Kennzahl  $K$  gehörenden Gewichtungsfaktoren  $w$  und des Wertes der Kennzahl  $x$ . Der Gewichtungsfaktor bildet die Priorität einer bestimmten Kennzahl ab. Die Werte der einzelnen Kennzahlen werden den Instanzen innerhalb der Ontologie durch die Ableitung der vorhandenen Referenzen und deren Datatype-Properties direkt aufgeprägt. Damit ergibt sich für jede *Betriebsmittelvariante* ein Wert der Zielfunktion. Um nun eine möglichst optimale Fertigungsanlage aus der Vielzahl an Varianten zu ermitteln, ist es zunächst erforderlich die einzelnen Alternativen aufzubereiten. Abstrakt lassen sich die verschiedenen Varianten als ein Graph mit unterschiedlichen Pfaden darstellen, sodass sich ein gerichteter und azyklischer Graph ergibt. Die Knoten werden abgebildet durch die einzelnen *Betriebsmittelvarianten* und alle vorhandenen Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen bilden die Kanten dazwischen. Außerdem werden Kantengewichte hinzugefügt, die dem Ergebnis der Zielfunktion der *Betriebsmittelvariante* entsprechen, auf die die gerichtete Kante zeigt. Weiterhin wird der Graph so vorbereitet, dass er umgekehrt zum Materialfluss aufgebaut wird. Eine gerichtete Kante zeigt somit immer auf einen möglichen Vorgänger. Zudem wird ein zusätzlicher Knoten hinzugefügt, der das Ende der Fertigungsanlage darstellt und als eindeutiges Ziel eines jeden möglichen Materialflusses dient. Da der Graph entgegengesetzt zum Fertigungsfluss aufgebaut ist, stellt dieser den Anfangsknoten dar und es existiert somit keine Kante, die auf diesen Knoten gerichtet ist.

Durch die Eigenschaften des gebildeten Graphen bietet sich die Möglichkeit an, einen Algorithmus zur Ermittlung des kürzesten Pfades zu benutzen. Dabei ist zu beachten, dass es sich nicht um einen kürzesten, sondern eher um einen in Bezug auf die Zielfunktion minimalen Pfad handelt. Für die Lösung dieses Problems existieren verschiedene Arten von Algorithmen. Dazu gehören zum Beispiel der Dijkstra-Algorithmus, der Bellman-Ford-Algorithmus und der Floyd-Warshall-Algorithmus. Das günstigste Laufzeitverhalten hat mit einer Komplexität von  $\mathcal{O}(n \cdot \log n + m)$  der Dijkstra-Algorithmus bei der Verwendung von Fibonacci-Heaps als Datenstruktur (KRUMKE & NOLTEMEIER

2005). Dieser erfordert als Eingangsgröße einen Graphen, der keine negativen Kantengewichte besitzt und einen definierten Startknoten. Beide Bedingungen sind gegeben. Der Algorithmus ermittelt die kürzesten Pfade zwischen dem Startknoten und allen anderen Knoten, sodass es auch möglich ist die im Fertigungsablauf vorhandenen Zusammenflüsse zu betrachten. Die allgemeine Vorgehensweise des Algorithmus wird folgend beschrieben. Ausgehend vom angegebenen Startknoten werden die benachbarten und erreichbaren Knoten ermittelt. Für diese werden iterativ die günstigsten Wege ausgewählt. Dabei ist es auch möglich, dass Verbesserungen vorgenommen werden. Dieses Vorgehen findet solange statt, bis alle Knoten untersucht wurden (KRUMKE & NOLTEMEIER 2005), (VELDEN 2014). Nun werden die kürzesten Pfade vom Ende der Fertigungsanlage bis zu den verzweigten Startpunkten ermittelt. Dabei besteht die Möglichkeit, dass eine Fügefolge, die einem Startpunkt entspricht, mehrere *Betriebsmittelvarianten* bilden kann. Dann wird diejenige mit dem kürzesten Pfad aus der *Alternativengruppe* ausgewählt. Durch die Bildung der Summe aller ausgewählten Knoten, die auf den kürzesten Pfaden liegen, ergibt sich der Gesamtwert der Zielfunktion. Damit ist die in Bezug auf die Zielfunktion optimale Fertigungsanlage anhand der Produkt- und Projektprämissen erzeugt.

#### **5.4 Zusammenfassung des Konzeptes**

Im Rahmen dieses Kapitels wurde das Konzept zur automatisierten Erzeugung von Karosseriebau-Fertigungsanlagen auf Grundlage von gegebenen Produktdaten und Projektprämissen erläutert. Die Basis des Konzeptes ist eine Wissensbasis in Form einer Ontologie, die Planungswissen und Zusammenhänge zwischen Fertigungsverfahren und Betriebsmitteln beinhaltet. Mithilfe einer vorgegebenen Herangehensweise ist die Ontologie erzeugt worden. Sie repräsentiert explizit durch Klassen und Beziehungen das implizit beim Anlagenplaner vorhandene Wissen und macht es somit nutzbar für Software. Anhand dessen analysiert ein Algorithmus zunächst die Produktdaten und bereitet die Produktstrukturinformationen so auf, dass sie für das weitere Vorgehen und innerhalb der Ontologie verwendbar sind. Darauf aufbauend wird anschließend der Fertigungsfluss gebildet. Dabei kommt es zur Bildung von verschiedenen Varianten, die aus unterschiedlichen Ausführungsarten und Stationsaufteilungen resultieren. Im folgenden Schritt wird diese zeitliche Komponente um konkrete Ressourcen ergänzt. Dafür werden Regeln verwendet, die innerhalb der Ontologie beschrieben sind und zur Bildung weiterer Varianten führen. Dadurch entsteht ein Graph, der alle möglichen Alternativen zur Bildung des Fertigungsablaufs aufzeigt. Durch die Hinterlegung

von Kennzahlen in der Ontologie besteht die Möglichkeit eine Zielfunktion zu ermitteln, die die Werte der einzelnen Kennzahlen je nach ihrer Priorität gewichtet. Anschließend werden für diesen gebildeten Graphen mithilfe des Dijkstra-Algorithmus die kürzesten Pfade vom Ende der Fertigungsanlage bis zu den Startpunkten ermittelt. Daraus wird die in Bezug auf die Zielfunktion optimale Fertigungsanlage ermittelt. Zur Überprüfung und näheren Erläuterung des vorgestellten Konzeptes wird es im nächsten Kapitel anhand eines konkreten Beispiels evaluiert.

## 6 Evaluierung des Konzeptes an einem Fallbeispiel

Nach der Erläuterung des Konzeptes im vorherigen Kapitel, geht es im Folgenden um die Anwendung dieses Konzeptes auf ein konkretes Fallbeispiel. Anhand dessen wird die Funktionsweise noch einmal deutlicher beschrieben. Weiterhin dient dieses Beispiel als ein Nachweis, dass der konzeptuelle Gedanke an einem praktischen Fall funktioniert. Das Beispiel ist dabei so gewählt, dass es einem fiktiven Produkt entspricht, um den Fokus auf die Vorgehensweise zu legen. Es besitzt einige vereinfachende Eigenschaften und Restriktionen, die im Laufe der nachfolgenden Abschnitte erläutert werden.

### 6.1 Vorstellung des Fallbeispiels

In einem ersten Schritt gilt es die gegebenen Prämissen und das vorhandene Wissen zu beschreiben. Damit das Konzept funktioniert, wird eine Wissensbasis in Form einer Ontologie benötigt. Diese enthält das im Laufe einer Fertigungsanlagenplanung benötigte und meist implizite Wissen in einer expliziten Beschreibung. Das Grundgerüst dieser Ontologie ist ausführlich im vorherigen Kapitel erklärt. Dieses ist allgemeingültig für die Planung einer Fertigungsanlage im Karosseriebau beschrieben und wird somit auch für das Fall-Beispiel genutzt. Zusätzlich zu diesen generellen Informationen existieren projektabhängige Informationen, die durch Prämissen definiert sind. Diese betreffen sowohl das Projekt an sich als auch das Produkt.

#### 6.1.1 Inhalt der Wissensbasis

Die zuvor entwickelte Ontologie bildet die Wissensbasis. Sie enthält die taxonomischen und relationalen Informationen über allgemeine Anlagenplanungen im Rahmen der Fertigungsplanung des Karosseriebaus. Damit stellt sie die Struktur und das Wissen bereit, welches im Laufe dieses Beispiels benötigt wird. Zunächst werden die benötigten *Fügeoperationen* mit ihren Eigenschaften definiert. In diesem Fallbeispiel werden zwei verschiedene Fügeverfahren verwendet. Dies ist zum einen das *Widerstandspunktschweißen* und zum anderen das *Clinchen*, das ein Druckfügeverfahren darstellt. Diese beiden Verfahren sind erforderlich, da das Produkt aus den beiden verschiedenen Materialien *Stahl* und *Aluminium* besteht. Für das Fügen von Stahlverbindungen wird das Widerstandspunktschweißen genutzt. Beim Fügen von Bauteilen, bei denen mindestens eines davon aus Aluminium besteht, wird das Clinchen verwendet. Die beiden Verfahren unterscheiden sich in ihrer Dauer der Ausführung. Das Setzen eines Widerstandsschweißpunktes wird in diesem Beispiel eine Zeit von 20 Sekunden benö-

tigen, wohingegen das Setzen eines Clinch-Punktes 15 Sekunden benötigt. Zur späteren Bewertung der Fertigungsanlage werden zu den einzelnen Ressourcen Kennzahlen hinterlegt. Diese sind in diesem Beispiel die Investitionskosten und der Energieverbrauch. Für die quantitative Beschreibung werden fiktive Einheiten verwendet. Bei den Investitionskosten handelt es sich um Investitionseinheiten (IE), wobei eine hohe Zahl für hohe Kosten steht. Beim Energieverbrauch werden Energieeinheiten (EE) verwendet. Auch hier steht eine höhere Zahl für einen größeren Energieverbrauch. Die Zuordnung dieser Kennzahlen zu den in der Ontologie vorhandenen Ressourcen ist in Tabelle 33 abgebildet. Dabei sind nur Ressourcen definiert, die für die Durchführung dieses Beispiels benötigt werden.

Ressourcenbezeichnung	Investitionskosten (IE)	Energieverbrauch (EE)
<b>Füge-Betriebsmittel</b>		
Punktschweißzangen-Referenz	4	6
Clinchzangen-Referenz	3	4
<b>Unterstützungs-Betriebsmittel</b>		
Industrieroboter-Referenz	8	3
Greifer-Referenz	2	2
Spannvorrichtung-Referenz	2	2
Roboterpodest-Referenz	1	0
Ständer-Referenz	1	0

Tabelle 33: Investitionskosten und Energieverbrauch der benötigten Ressourcen

Außerdem werden innerhalb der Ontologie Regeln definiert, die später die Bildung von Inferenzen ermöglichen. Eine Auswahl dieser Regeln ist bereits im Kapitel 5.3 beschrieben. Eine vollständige Übersicht befindet sich im Anhang C, D und E.

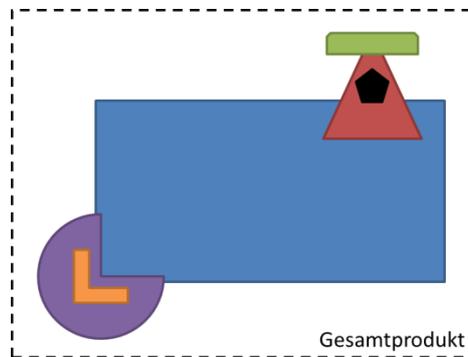
### 6.1.2 Vorstellung der gegebenen Projekt-Prämissen

Das fiktive Projekt dieses Fallbeispiels wird am Standort Deutschland geplant. Es besitzt daher einen hohen Mechanisierungsgrad von 80%. Weiterhin ist geplant von dem fertigen Produkt 102 Stück pro Stunde herzustellen. Dies ergibt bei einer gegebenen Gesamtverfügbarkeit von 85% eine Taktzeit von 30 Sekunden. Vom herzustellenden Produkt existiert nur ein Typ, der gefertigt wird. Daher wird auf die Planung einer flexiblen Fertigungsanlage verzichtet.

### 6.1.3 Vorstellung der gegebenen Produkt-Prämissen

Die Produkt- und Verbindungsdaten werden im Rahmen dieses Konzeptes als gegeben angenommen. Das fiktive Produkt, das für dieses Fallbeispiel verwendet wird, ist

eine Menge von sechs verschiedenen Blechen, welche aus Stahl oder Aluminium bestehen und jeweils eine unterschiedliche geometrische Form besitzen. Das zusammengesetzte Gesamtprodukt ist in Abbildung 80 dargestellt.



**Abbildung 80: Abbildung des fiktiven Beispiel-Produktes in der Gesamtansicht (eigene Darstellung)**

Eines der beiden Bauteile auf der untersten Produktstrukturebene ist das Einzelbauteil 5, welches ein Aluminiumblech in der Form eines schwarzen Fünfecks darstellt. Das andere Bauteil auf dieser Ebene ist das Einzelbauteil 6, das als Geometrie eines roten Dreieckes aus Aluminium abgebildet ist. Diese beiden Bauteile werden zum Zusammenbauteil 4 zusammengefügt. Dieses wiederum wird mit Einzelbauteil 4 verbunden, welches ebenso aus Aluminium besteht und die Form eines grünen Rechteckes mit zwei abgerundeten Ecken besitzt. Daraus ergibt sich Zusammenbauteil 3. In Verbindung mit dem blauen und rechteckigen Stahl-Blech wird das Zusammenbauteil 2 gebildet. Daraus entsteht ein Stahl-Aluminium-Mix. Um das Gesamtprodukt zu erhalten, wird das Zusammenbauteil 2 mit dem aus Stahl bestehenden Zusammenbauteil 1 verbunden. Dieses besitzt zum einen die Komponente Einzelbauteil 2, welche die Form eines zu Dreiviertel gefüllten violetten Kreises besitzt und zum anderen das Einzelbauteil 3, das ein Blech in oranger L-Form darstellt. Diese soeben beschriebene Produktstruktur ist in Abbildung 81 angegeben. Türkis gefärbte Strukturknoten stellen dabei Bauteile dar, die aus Aluminium bestehen, wohingegen ockerfarbene Strukturknoten für Bauteile aus Stahl stehen. Bauteile mit einem Stahl-Aluminium-Mix werden mit einer türkis-ockerfarbenen Schraffur abgebildet.

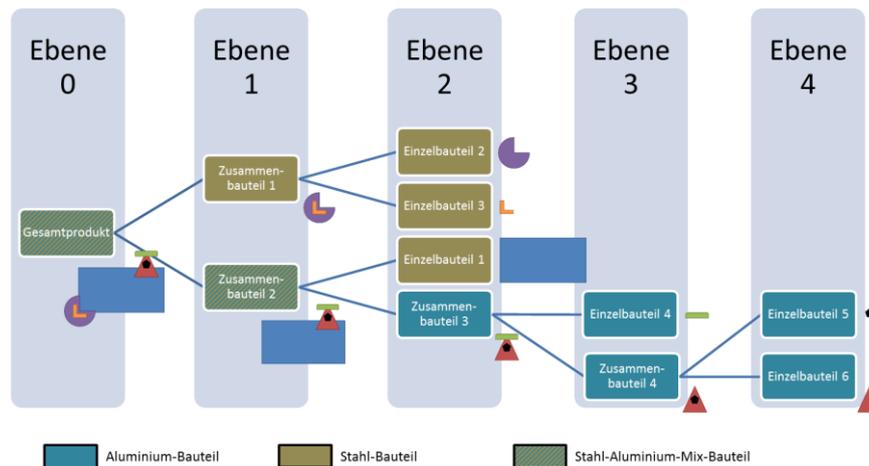


Abbildung 81: Produkt-Struktur des fiktiven Beispiel-Produktes (eigene Darstellung)

Damit ist bekannt, wie das Produkt strukturell aufgebaut ist. Es werden jedoch noch die Informationen benötigt, auf welche Art und Weise die einzelnen Bauteile miteinander verbunden sind. Eine Übersicht dieser Verbindungen ist in Abbildung 82 dargestellt. Die Einzelbauteile 5 und 6 werden mithilfe eines Clinch-Punktes durch einen hohen Druck zusammengefügt. Dies ist notwendig, da beide Bauteile aus Aluminium bestehen. Anschließend wird das daraus entstandene Zusammenbauteil 4 wiederum durch einen Clinch-Punkt mit dem Einzelbauteil 4 verbunden. Um das Zusammenbauteil 2 zu erhalten, werden vier Clinch-Punkte benötigt, die das Einzelbauteil 1 und das Zusammenbauteil 3 zusammenfügen. Da die Einzelbauteile 2 und 3 aus Stahl bestehen, werden diese mithilfe von vier Widerstandsschweißpunkten zum Zusammenbauteil 1 verschweißt. Abschließend werden drei Widerstandsschweißpunkte gesetzt, die aus den Zusammenbauteilen 1 und 2 das Gesamtprodukt bilden.

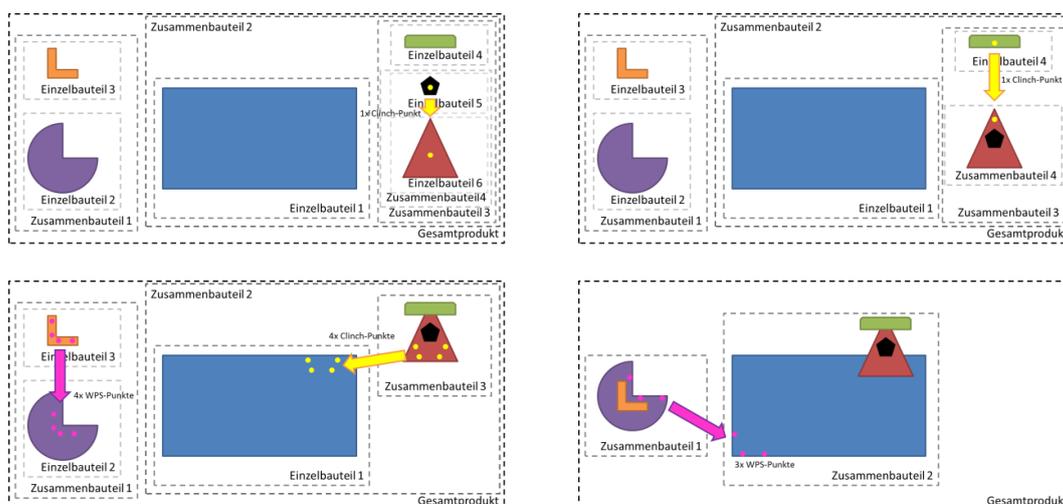


Abbildung 82: Übersicht der Verbindungen zwischen den Produkt-Komponenten (eigene Darstellung)

## 6.2 Aufbereitung der Projekt- und Produkt-Prämissen

Die Produktdaten sind wie im Kapitel 5.3.1 beschrieben in einer XML-Datei gegeben, die der Fertigungsplanung von der Produktentwicklung zur Verfügung gestellt wird. Mithilfe eines XML-Transformators werden die benötigten XML-Tags und deren Inhalte in die RDF/XML-Datei der Ontologie übertragen. Dadurch sind sowohl die Produktattribute als auch die Struktur- und Verbindungsbeziehungen in der Ontologie vorhanden. Durch die zuvor definierten Regeln ermöglicht die Ontologie das automatische Schlussfolgern von weiteren Beziehungen. Die Instanzenbeschreibung für ein *Zusammenbauteil* und für ein *Einzelbauteil* innerhalb des Ontologie-Editors Protégé ist in Abbildung 83 gegeben. Die gelb hinterlegten Klassen und Relationen zeigen die die durch Inferenz automatisch erzeugten Beziehungen.

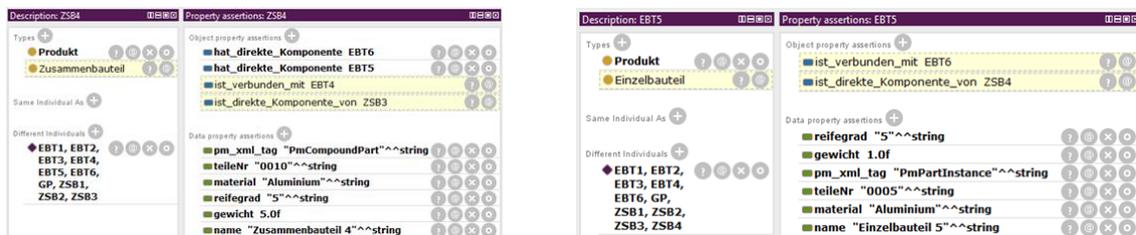


Abbildung 83: Beschreibung der Instanzen "ZSB4" und "EBT5" in Protégé (eigene Darstellung)

Mithilfe der Datatype-Property *pm\_xml\_tag*, die aus der importierten XML-Datei der Produktentwicklung erzeugt wird, ist die Klasse des Bauteils zu bestimmen und somit festzulegen, ob es sich um ein *Einzel-* oder *Zusammenbauteil* handelt. Die Object-Property *ist\_direkte\_Komponente\_von* wird ebenfalls automatisch geschlussfolgert und ergibt sich aus der Information eines *Zusammenbauteils*, welches die Relation *hat\_direkte\_Komponente* besitzt. Die Beziehung *ist\_verbunden\_mit* zwischen zwei Bauteilen wird über die Instanz einer *Verbindung* erzeugt, indem dort definiert wird, welche Bauteile diese verbindet. Die Abbildung 84 zeigt den Ausschnitt im Ontologie-Editor Protégé, in dem der erste Clinch-Punkt definiert wird. Dort ist ebenfalls zu erkennen, dass dieser die beiden *Einzelbauteile fünf* und *sechs* miteinander verbindet. Außerdem wird erneut die Art der Verbindung über das *pm\_xml\_tag* ermittelt.

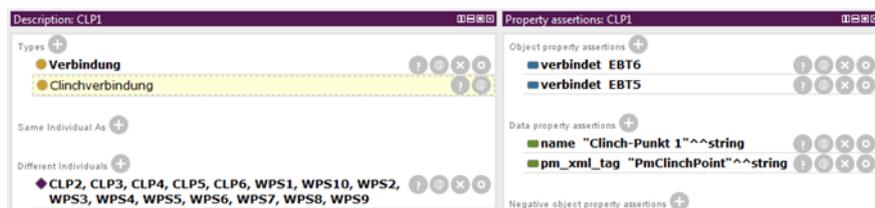


Abbildung 84: Beschreibung der Instanz "CLP1" in Protégé (eigene Darstellung)

### 6.3 Herleitung des Fertigungsprozesses

Nachdem die gegebenen Produktdaten aufbereitet wurden und somit innerhalb der Ontologie zur Verfügung stehen, gilt es nun eine Beziehung zu den Aktivitätsentitäten herzustellen und daraus den Fertigungsprozess zu erzeugen. Dafür werden zunächst die Inhalte der einzelnen Fügefolgen und deren Reihenfolge im Ablauf der Fertigung ermittelt. Anschließend werden durch die Bildung von Alternativengruppen und Arbeitsfolge-Varianten mögliche zeitliche Abläufe innerhalb einer Fügefolge erzeugt.

#### 6.3.1 Ermittlung der Fügefolgen und deren Reihenfolge

Im ersten Schritt wird eine Verbindung zwischen der Produkt-Teilontologie und der Prozess-Teilontologie hergestellt, indem für jede innerhalb der Klasse *Verbindung* vorhandene Instanz eine Instanz in der Klasse *Operation* erzeugt wird. Zusätzlich wird diese um die Object-Property *realisiert* angereichert, welche als Objekt die Verbindungsinstanz erhält, anhand derer die Operationsinstanz erstellt wurde. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 85 schematisch abgebildet.

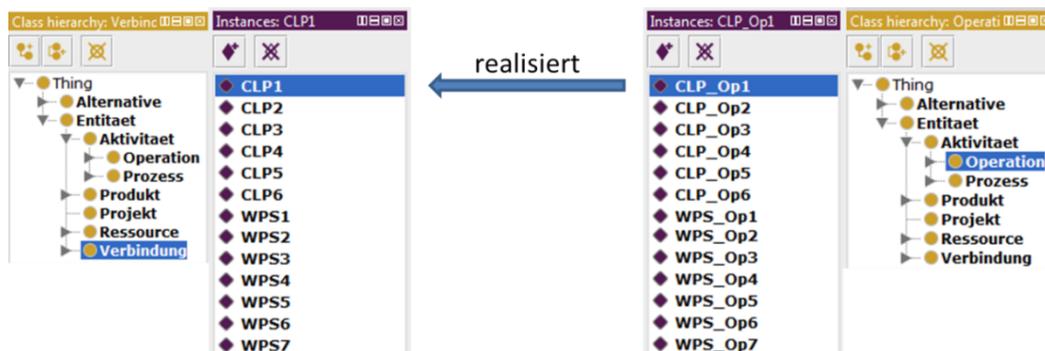


Abbildung 85: Definition der Object-Property "realisiert" in Protégé (eigene Darstellung)

Die Ontologie ermöglicht es durch Inferenz, den zuvor in der allgemeinen Klasse *Operation* erzeugten Instanzen durch Regeln in eine bestimmte Sub-Klasse der *Operationen* einzugliedern. Weiterhin wird auch die Beziehung *realisiert* durch das Schlussfolgern verfeinert und eine Sub-Beziehung für die spezifische Fügeoperation hergestellt. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist in Abbildung 86 zu erkennen. Auch hier sind die gelb hinterlegten Klassen und Object-Properties das Resultat der Inferenz.



Abbildung 86: Beschreibung der Instanz "CLP\_Op1" in Protégé (eigene Darstellung)

Danach wird für jede Instanz innerhalb der Klasse *Zusammenbauteil* eine entsprechende Instanz in der Klasse *Fügefolge* erstellt. Letztere erhält ergänzend die Relation *fügt* mit der auslösenden Instanz der Klasse *Zusammenbauteil* als Objekt. Dieser Prozessschritt wird in Abbildung 87 gezeigt.

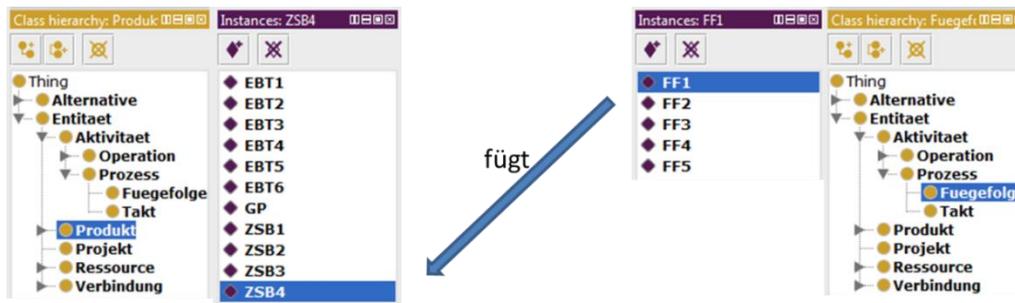


Abbildung 87: Definition der Object-Property "fügt" in Protégé (eigene Darstellung)

Anhand dieser Informationen ist es möglich, die Reihenfolge der Fügefolgen und deren Inhalt in Form von Fügeoperationen zu ermitteln. Dies erfolgt mithilfe der in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Regeln. Zur Ermittlung des Fügefolgeninhalts werden diejenigen Fügeoperationen gesucht, die eine Verbindung zwischen den Bauteilen erzeugen, die in Bezug zu der jeweiligen Fügefolge stehen. Die Herstellung der Reihenfolge geschieht über die Vorgängerbeziehungen der Fügefolgen. Wenn ein Bauteil X, das eine direkte Komponente eines Zusammenbauteils Y ist, in einer bestimmten Fügefolge A gefügt wird und das Zusammenbauteil Y in einer Fügefolge B gefügt wird, dann ist die Fügefolge A der Vorgänger der Fügefolge B. Da die beiden Object-Properties *hat\_Vorgänger* und *hat\_Nachfolger* in einer inversen Beziehung zueinander stehen, wird automatisch auf den Nachfolger einer Fügefolge geschlossen. Das Ergebnis durch Inferenz innerhalb der Ontologie ist in Abbildung 88 in Protégé dargestellt.

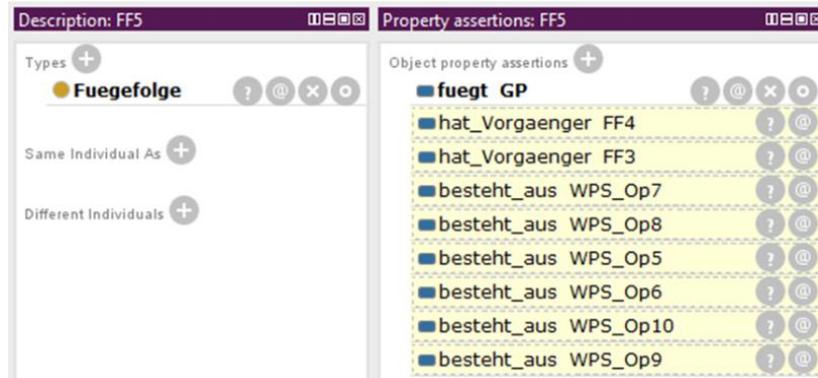


Abbildung 88: Beschreibung der Instanz "FF5" in Protégé (eigene Darstellung)

Aus diesen Reihenfolgeinformationen wird anschließend der Fertigungsablauf in graphischer Form gebildet. Diese ist in Abbildung 89 zu sehen. Dabei kommt die in Kapitel 4.5 ermittelte Modellierungsform zum Einsatz. In dieser sind sowohl alle Eingangsbau- teile in Form von *Einzelbauteilen* als auch alle Zwischen- und Endprodukte in Form von *Zusammenbauteilen* erkennbar. Weiterhin sind die Reihenfolge und das zugehörige Fügeverfahren der Fügefolgen ersichtlich. Dieser Graph bildet die Grundlage für die anschließende Bildung der einzelnen Alternativen.

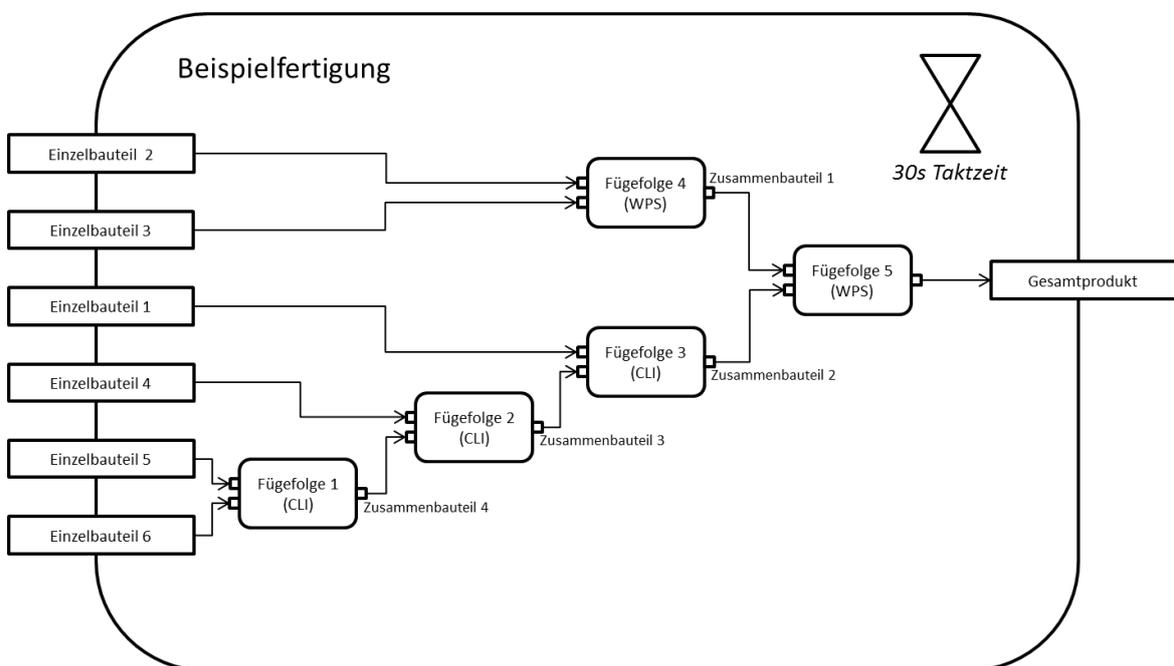


Abbildung 89: ermittelter Fertigungsprozess (eigene Darstellung)

### 6.3.2 Bildung der Alternativengruppen und Arbeitsfolge-Varianten

Auf Grundlage der vorhandenen Informationen innerhalb der Ontologie werden im Folgenden verschiedene Alternativen zur Fertigung des Produktes erzeugt. Dabei kommt es zur Bildung von Alternativengruppen, die wiederum mehrere Arbeitsfolgevarianten beinhalten. Innerhalb einer Alternativengruppe kommt es am Ende dieser Vorgehensweise zur Auswahl genau einer Arbeitsfolgevariante. Algorithmisch werden iterativ alle vorhandenen Fügefolgen betrachtet und den Alternativengruppen direkt zugeordnet. Dabei untersucht dieser zum einen, ob mehrere aufeinanderfolgende Fügefolgen sowohl die gleiche Art von Fügeoperationen ausführen als auch zeitlich die Kapazität eines Taktes nicht überschreiten und zum anderen, wenn dies nicht der Fall ist, ob die Fügefolge auf mehrere Takte aufgeteilt werden kann oder muss. Im ersten Fall werden diese Fügefolgen in einem Takt zusammengefasst und einer Alternativengruppe zugeordnet. Diese besitzt damit mehrere aufeinanderfolgende Fügefolgen, die zudem eine Arbeitsfolgevariante darstellen. Im zweiten Fall werden anhand der in der Fügefolge enthaltenen Fügeoperationen die sinnvoll möglichen zeitlichen Aufteilungen vorgenommen. Dabei wird zudem die Eigenschaft genutzt, dass bestimmte Operationen es ermöglichen, parallel ausgeführt zu werden. Anhand des Fallbeispiels wird dieses Verfahren folgend angewendet. Alternativengruppen werden in den nachfolgenden Abbildungen als  $ALTGR[n]$  abgekürzt, wobei  $n$  die Nummerierung zur Identifizierung darstellt. Arbeitsfolgevarianten werden durch  $AFO[n_m]$  abgekürzt. Die Variable  $n$  entspricht der Alternativengruppe, der die Arbeitsfolgevariante zugeordnet ist und die Variable  $m$  steht für die Nummerierung der Arbeitsfolgevariante innerhalb der Alternativengruppe. Betriebsmittelvarianten werden nachfolgend als  $BEVA[n_m_p]$  bezeichnet. Dabei entsprechen das  $n$  und das  $m$  den Zuordnungen zu Alternativengruppen und Arbeitsfolgevarianten. Das  $p$  nummeriert und identifiziert die Betriebsmittelvariante. Zuerst wird die *Fügefolge 1* untersucht, welche eine Clinch-Operation ausführt. Diese wird der *Alternativengruppe 1* zugeordnet. Die Dauer einer jeden Fügeoperation, die zur Fügefolge gehört, ist in dem Array *dauer\_operationen\_array* angegeben. Zur Prüfung der Über- oder Unterschreitung der zeitlichen Kapazität einer Fügefolge werden die Elemente innerhalb dieses Arrays aufsummiert. Da die zeitliche Summe der Fügeoperationen innerhalb der *Fügefolge 1* die Taktzeit unterschreitet, wird zusätzlich die nachfolgende Fügefolge betrachtet. Dabei handelt es sich um die *Fügefolge 2*, welche ebenfalls eine Clinch-Operation ausführt. Das bedeutet, dass diese aus Sicht des Fügeverfahrens mit der *Fügefolge 1* verbunden werden kann. Durch das Addieren der Operationsdauer zu der bisher gebildeten Summe ergibt sich exakt die vorgegebene

Taktzeit. Damit ist auch die zeitliche Kapazität passend, um die *Fügefolge 1* und die *Fügefolge 2* in einem Takt und somit innerhalb einer Arbeitsfolge-Variante zu verbinden. Die Bildung der ersten Alternativengruppe ist damit abgeschlossen und in Abbildung 90 zusammengefasst.

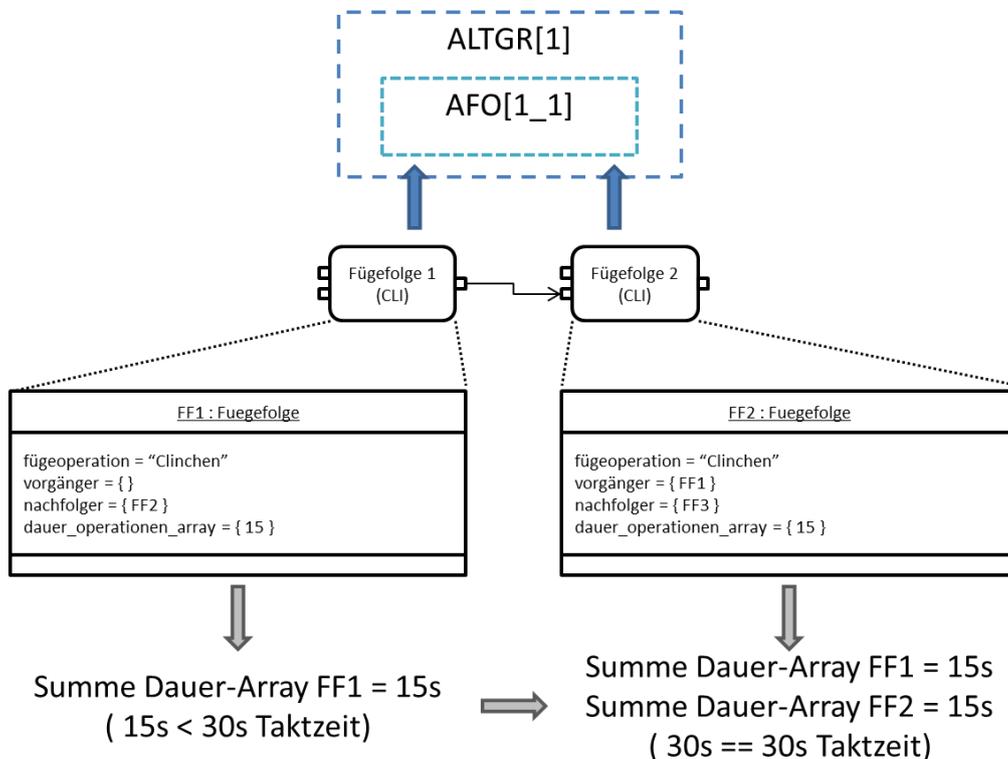


Abbildung 90: Herleitung der ersten Alternativengruppe (eigene Darstellung)

Danach wird die nächste Fügefolge untersucht. In diesem Fall handelt es sich um die *Fügefolge 3*. Diese wird der *Alternativengruppe 2* zugeordnet. Sie besitzt vier Operationen des Clinchens. Damit ist die Summe der Dauer aller Fügeoperationen innerhalb dieser Fügefolge größer als die Taktzeit. Im Gegensatz zur vorherigen Alternativengruppe wird an dieser Stelle nicht versucht mehrere aufeinanderfolgende Fügefolgen zusammenzufassen, sondern die aktuelle Fügefolge aufzuteilen und für diese Aufteilung alle Möglichkeiten zu ermitteln. Diese werden in Form von Arbeitsfolge-Varianten abgebildet. In diesem Beispiel ist es möglich die *Fügefolge 3* auf zwei verschiedene Art und Weisen aufzuspalten. Die erste Alternative ist die Aufteilung auf zwei aufeinanderfolgende Takte, die jeweils zwei Clinch-Operationen ausführen. Damit werden alle vier in der *Fügefolge 3* vorhandenen Clinch-Operationen seriell ausgeführt. Die zweite Alternative ist die Abarbeitung aller vier Clinch-Operationen innerhalb eines Taktes. Dazu ist es jedoch erforderlich jeweils zwei Clinch-Operationen parallel auszuführen, um es

in der vorgesehenen Taktzeit zu fertigen. Diese Information hat im weiteren Verlauf einen Einfluss auf die Wahl der Ressourcen. Mit diesem Schritt ist auch die zweite Alternativengruppe fertiggestellt. Die Abbildung 91 zeigt das soeben beschriebene Vorgehen.

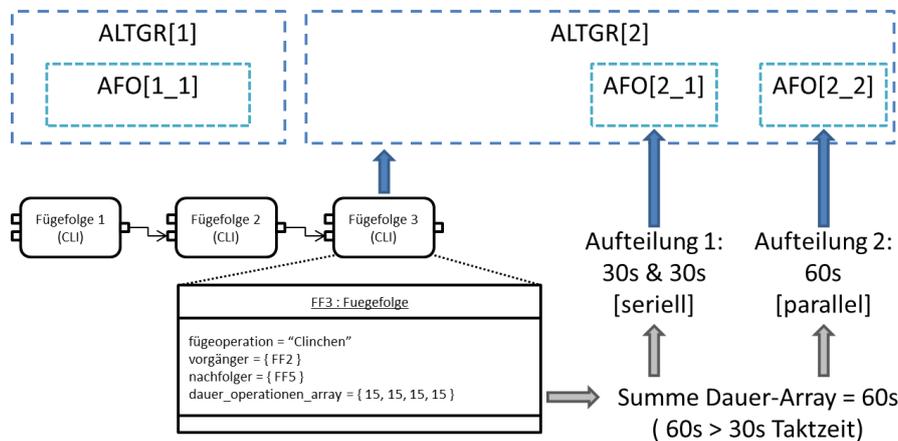


Abbildung 91: Herleitung der zweiten Alternativengruppe (eigene Darstellung)

Die vierte Fügefolge, die zur *Alternativengruppe 3* gehört, beinhaltet vier Fügeoperationen für das Widerstandspunktschweißen. Es ist dabei zu beachten, dass das Setzen eines Widerstandsschweißpunktes fünf Sekunden länger dauert als das Setzen eines Clinch-Punktes. Dies hat Auswirkungen auf die Aufteilungen, die zu den Arbeitsfolge-Varianten führen. Die Summe der Dauer der Operationen innerhalb von *Fügefolge 4* überschreitet ebenso die Taktzeit. Wie bei der zweiten Alternativengruppe erfolgt die Bildung der Aufteilungsmöglichkeiten nach dem gleichen Prinzip. Es gibt mögliche Alternativen zur zeitlichen Aufteilung, die in fünf Arbeitsfolge-Varianten resultieren. Die erste bildet die vollständig serielle Abarbeitung der Fügeoperationen, was zu vier aufeinanderfolgenden Takten führt. Bei der zweiten Arbeitsfolgevariante erfolgt in einem Takt die parallele Ausführung von zwei Widerstandsschweißpunkten und in zwei weiteren Takten die serielle Abarbeitung der beiden übrigen Punkte. Diese werden bei der dritten Aufteilungsmöglichkeit ebenso parallel gesetzt, sodass sich in dem Fall nur noch zwei Takte zur Durchführung ergeben. Das ist auch bei der vierten Arbeitsfolge-Variante der Fall. Jedoch werden bei dieser einem Takt drei parallel gesetzte Widerstandsschweißpunkte zugeordnet und dem anderen Takt lediglich ein Punkt. In der fünften Arbeitsfolge-Variante erfolgt die Ausführung aller Fügeoperationen parallel in einem Takt. Alle fünf Arbeitsfolge-Varianten der dritten Alternativengruppe sind in der Abbildung 92 dargestellt.

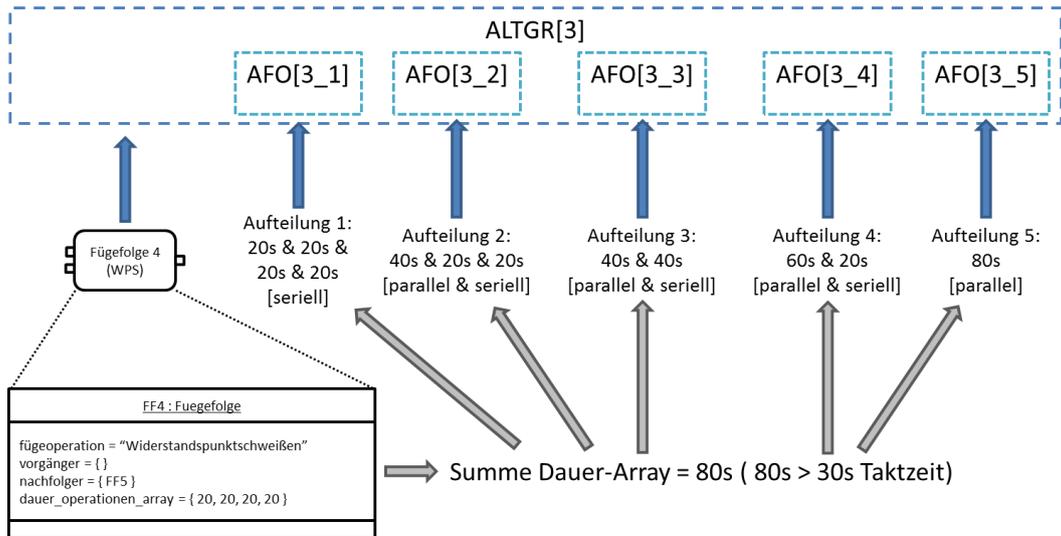


Abbildung 92: Herleitung der dritten Alternativengruppe (eigene Darstellung)

Zuletzt wird die fünfte Fügefolge untersucht. Zugehörig zu dieser ist die *Alternativengruppe 4*. Durch den Inhalt von drei Widerstandsschweißpunkten überschreitet diese Fügefolge ebenfalls die zeitliche Kapazität der Taktzeit. Aus diesem Grund wird erneut die mögliche Aufteilung ermittelt und daraus drei Arbeitsfolge-Varianten gebildet. Dabei kommt es zu einer komplett seriellen Lösung, einer komplett parallelen Lösung und einer Kombination aus zwei Takten mit jeweils einer seriellen und einer parallelen Taktausführung. Die erstellte Alternativengruppe mit den zugeordneten Arbeitsfolge-Varianten ist in Abbildung 93 dargestellt.

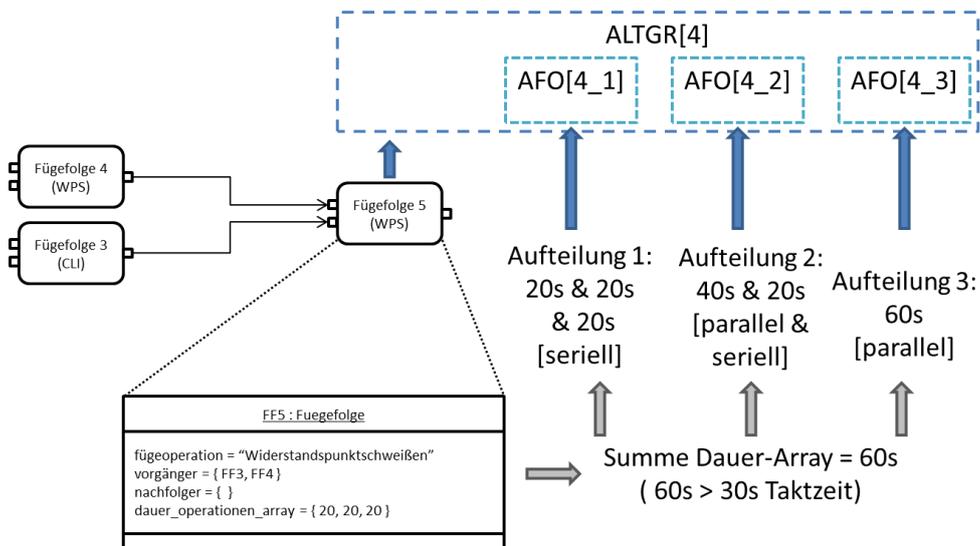


Abbildung 93: Herleitung der vierten Alternativengruppe (eigene Darstellung)

## 6.4 Herleitung der zum Fertigungsprozess benötigten Ressourcen

Nachdem im vorherigen Abschnitt die zeitlichen Varianten erzeugt wurden, gilt es anschließend die alternativen Ressourcenzuordnungen zu finden. Diese werden im Rahmen dieses Konzeptes als *Betriebsmittelvarianten* bezeichnet. Eine Arbeitsfolge-Variante kann dabei mehrere Betriebsmittelvarianten enthalten. Iterativ wird jede dieser Arbeitsfolge-Varianten betrachtet. Eine Übersicht der Vorgehensweise ist in Abbildung 94 zu sehen. Zunächst wird für die erste *Arbeitsfolge-Variante* eine neue *Betriebsmittelvariante* (1) mit der zugehörigen *Station* (2) angelegt. Im nächsten Schritt ist es notwendig herauszufinden, welche Instanzen der Klasse *Füge-BeMi* zur aktuellen *Betriebsmittelvariante* gehören. Dazu wird ermittelt, welche Fügefolgen eine Verbindung zur Arbeitsfolge-Variante besitzen, in der die Betriebsmittelvariante angelegt ist (3). Diese Fügefolgen beinhalten direkt die Fügeoperationen, die dort ausgeführt werden. Für jede der dort vorhandenen Instanzen der Fügeoperationen wird ebenfalls eine Instanz in der Klasse *Füge-BeMi* angelegt (4). Die zuvor erzeugte *Station* erhält daraufhin zusätzlich die Object-Property *hat\_Inhalt* mit Bezug auf die soeben erzeugten Instanzen der Klasse *Füge-BeMi* (5). Da die Dauer der Fügeoperationen innerhalb der betrachteten Station nicht größer als die Taktzeit ist, werden die diesen Fügeoperationen zugeordneten Instanzen der Klasse *Füge-BeMi* als identisch definiert. Dies geschieht mithilfe der vordefinierten Relation *sameAs* (6).

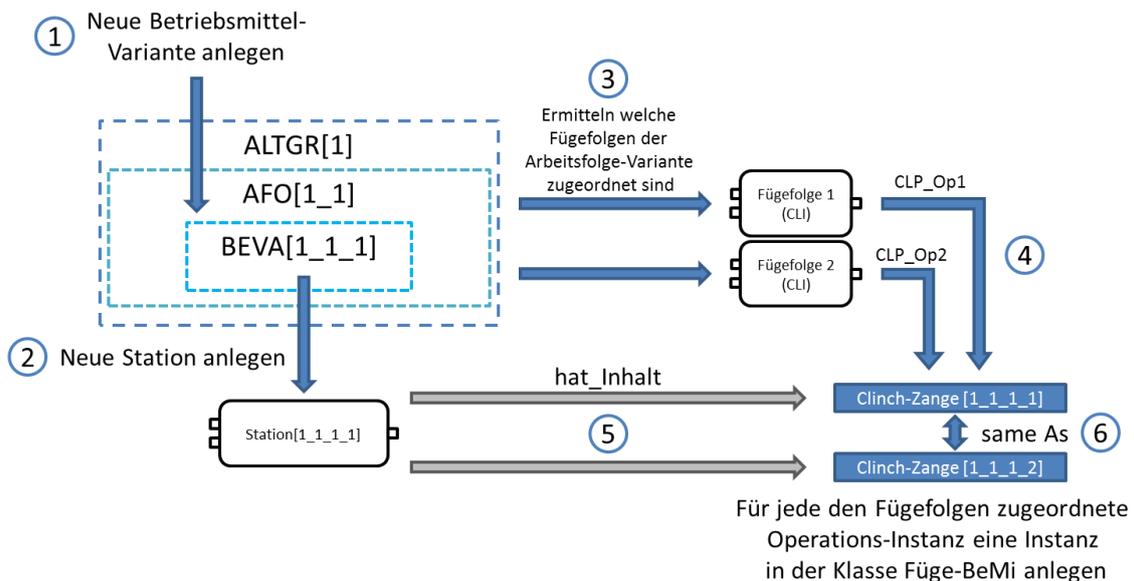


Abbildung 94: Herleitung der ersten Betriebsmittel-Variante (eigene Darstellung)

Anschließend wird die hinzugefügte Instanz der *Clinch-Zange* weiter untersucht und es werden mithilfe von Regeln die abhängigen Ressourcen gebildet. In der Abbildung 95 wird die folgend beschriebene, iterative Analyse der alternativen und notwendigen Ressourcen der *Clinch-Zange 1\_1\_1\_1* gezeigt. Dabei werden Bildausschnitte der Ontologie in Protégé gezeigt. Durch Inferenz wird ermittelt, dass die *Clinch-Zange 1\_1\_1\_1* entweder einen *Ständer* oder einen *Industrieroboter* benötigt. Dies wird ausgedrückt durch die beiden gelb hinterlegten Object-Properties *benötigt\_alternativ ST\_Referenz* und *benötigt\_alternativ IR\_Referenz*. Durch die Existenz dieser beiden Relationen wird im Anschluss eine neue *Betriebsmittelvariante* innerhalb der gleichen *Arbeitsfolge-Variante* erzeugt, die die bis dahin ermittelten Informationen der ursprünglichen Betriebsmittelvariante auch enthält. Ab diesem Punkt stellt die eine Betriebsmittelvariante den Pfad für die Umsetzung mit einem *Ständer* (siehe linke Hälfte der Abbildung 95) und die andere Betriebsmittelvariante den Pfad für den Einsatz eines *Industrieroboters* (siehe rechte Hälfte der Abbildung 95), an dem die *Clinch-Zange* befestigt wird, dar. Dieses Vorgehen wird an jeder Verzweigung dieser Art durchgeführt. Es folgt die Beschreibung des ersten alternativen Pfades, der vorsieht, dass die *Clinch-Zange* an einem *Ständer* befestigt ist. Da die Instanz der *Clinch-Zange* mit der Object-Property *benötigt\_alternativ* auf die Referenz des *Ständers* zeigt, wird zunächst eine Instanz innerhalb der Klasse angelegt, der diese Referenz zugehört. In diesem Fall ist dies die Klasse *Ständer*. Außerdem erhält die Instanz der *Clinch-Zange* die Relation *hat\_direktes\_BeMi* mit der soeben erzeugten Instanz für einen konkreten *Ständer*. Damit wird ausgedrückt, dass die *Clinch-Zange* an dem *Ständer* befestigt ist. Durch erneute Inferenz wird ermittelt, dass die Verwendung der *Clinch-Zange* an einem *Industrieroboter*, die Verwendung eines *Greifers* zur Folge hat. Wie bereits beschrieben, erfolgt hier das gleiche Vorgehen für das Instanzieren dieser Beziehung. Es wird eine neue Instanz in der Klasse *Greifer* gebildet, auf die die Object-Property *hat\_direktes\_Betriebsmittel* der *Ständer*-Instanz zeigt. Eine neue Betriebsmittelvariante wird nicht erzeugt, da keine alternativ benötigten Betriebsmittel existieren. Durch dieses Vorgehen wird ermittelt, dass zusätzlich ein *Industrieroboter* und ein *Roboterpodest* benötigt werden. Bei der Betrachtung des zweiten alternativen Pfades werden die Abhängigkeiten untersucht, wenn die *Clinch-Zange* an einem *Industrieroboter* befestigt wird. Durch die Umsetzung dieses Zusammenhangs ergibt sich, dass notwendigerweise ein *Roboterpodest* und eine *Spannvorrichtung* benötigt werden. Diese beiden Ressourcen benötigen jedoch keine weiteren. Durch die Analyse dieser beiden Pfade ergeben sich die beiden zur *Arbeitsfolge-Variante 1\_1* gehörigen Betriebsmittel-

Varianten. Mithilfe von Regeln wird aus diesen Erkenntnissen der Inhalt der einzelnen Stationen innerhalb der Betriebsmittelvariante ermittelt. Dieser wird konkret durch die transitive Object-Property *hat\_indirektes\_BeMi* ausgedrückt.

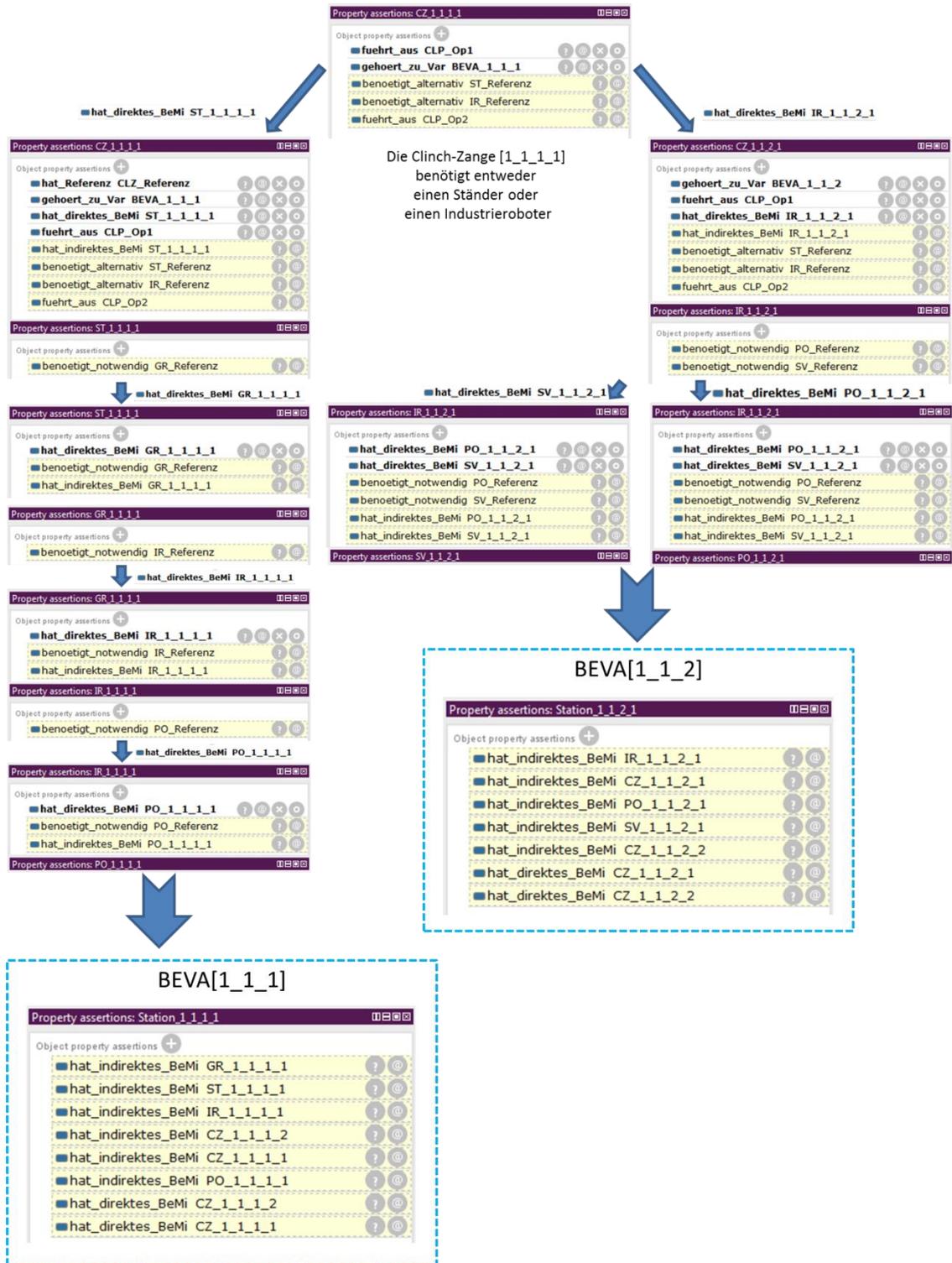


Abbildung 95: Betrachtung der alternativen Betriebsmittel-Belegung (eigene Darstellung)

Diese Bildung wird bei allen weiteren Arbeitsfolge-Varianten ebenso durchgeführt. In diesem Fallbeispiel gibt es nur die Möglichkeit ein *Füge-BeMi* an einem *Ständer* oder an einem *Industrieroboter* zu befestigen. Der erste Fall wird als *stationäre Ausführung* und der zweite Fall als *robotergeführte Ausführung* bezeichnet. Weiterhin existiert die Restriktion, dass die im vorherigen Schritt als parallel auszuführende Fügeoperationen innerhalb einer Station nur robotergeführt durchgeführt werden können, da nur diese Ausführungsart eine parallele Abarbeitung ermöglicht. Wenn eine Arbeitsfolge-Variante mehrere Stationen vorgibt, dann werden die verschiedenen Permutationen zur Aufteilung der stationären und robotergeführten Prozesse gebildet. Die Abbildung 96 zeigt dies am Beispiel der zweiten Alternativengruppe. Die *Arbeitsfolge-Variante 2\_1* besteht aus zwei Stationen, die jeweils zwei Clinch-Punkte nacheinander setzen. Daher lassen sich diese entweder rein stationär oder rein robotergeführt durchführen, was durch die *Betriebsmittelvarianten 2\_1\_1* und *2\_1\_3* ausgedrückt wird. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit eine Station stationär und die andere robotergeführt auszustatten. Das entspricht der *Betriebsmittelvariante 2\_1\_2*. Dabei ist zu beachten, dass in der Ausführung dieses Fallbeispiels zur Vereinfachung nur eine Alternative der Bildung der Reihenfolge pro Betriebsmittelvariante betrachtet wird. Somit wird hier die erste Station den Fügeprozess stationär durchführen und die zweite Station robotergeführt. Der Fall, dass die Clinch-Punkte in der ersten Station robotergeführt gesetzt werden und in der zweiten Station stationär, wird nicht untersucht. Da bei der *Arbeitsfolge-Variante 2\_2* mehrere Fügeoperationen parallel in einer Station ausgeführt werden, entsteht daraus lediglich eine Betriebsmittel-Variante, die robotergeführt ausgeführt wird. Eine Auflistung aller Alternativengruppen mit ihren Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten ist im Anhang F zu finden.

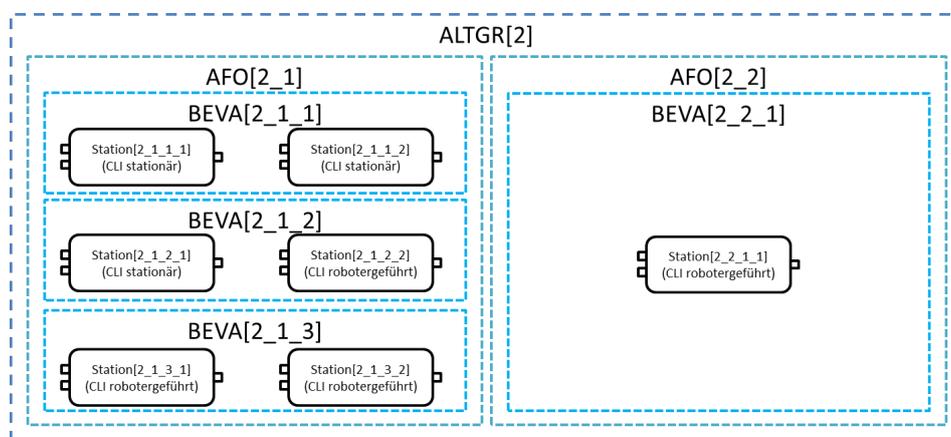


Abbildung 96: Komplette zweite Alternativengruppe mit allen Betriebsmittel-Varianten (eigene Darstellung)

## 6.5 Bewertung der alternativ ermittelten Anlagenkonzepte

Damit sind mithilfe des in der Ontologie vorhandenen Wissens die möglichen Alternativen gebildet. Jede davon besitzt Attribute und Eigenschaften, die eine Bewertung der verschiedenen Fertigungskonzepte erlaubt. Zur Bewertung wird eine Zielfunktion verwendet. Diese lautet wie in Kapitel 5.3.4 beschrieben:

$$ZF_{BV_m} = w_{K_1} x_{K_1 m} + w_{K_2} x_{K_2 m} + \dots + w_{K_n} x_{K_n m}$$

In diesem konkreten Beispiel existieren zwei Kennzahlen, die zur Bewertung herangezogen werden. Dies sind  $K_1 = \text{Investitionskosten}$  und  $K_2 = \text{Energieverbrauch}$ . Beide Kennzahlen werden als gleich wichtig erachtet und erhalten somit die gleiche Gewichtung von 50%. Damit ist  $w_{K_1} = w_{K_2} = 0,5$ . Die Variable  $x$  bezeichnet den konkreten Wert einer Kennzahl für die jeweilige Betriebsmittelvariante. In Abbildung 97 ist die *Betriebsmittelvariante 2\_1\_2* detailliert mit ihren Attributen dargestellt.

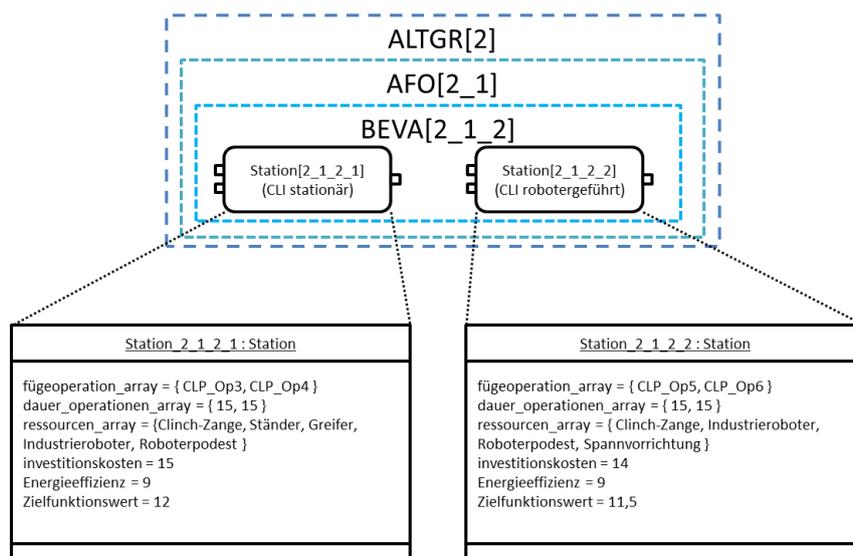


Abbildung 97: Inhalt der Betriebsmittel-Variante 2\_1\_2 (eigene Darstellung)

Unter anderem sind auch die Investitionskosten und der Energieverbrauch pro Station ersichtlich. Eine Summierung der Kennzahlenwerte über die Stationen hinweg ergibt den Gesamtwert der Betriebsmittelvariante. Für die Investitionskosten werden  $x_{K_1 2_1_2} = 29$  Investitionseinheiten und für den Energieverbrauch  $x_{K_2 2_1_2} = 18$  Energieeinheiten errechnet. In diesem Fall ergibt sich daraus für die *Betriebsmittelvariante 2\_1\_2* die Zielfunktion:

$$ZF_{BV_{2_1_2}} = w_{K_1} x_{K_1 2_1_2} + w_{K_2} x_{K_2 2_1_2} = 0,5 \cdot 29 + 0,5 \cdot 18 = 23,5$$

Dieser Zielfunktionswert wird für alle Betriebsmittelvarianten berechnet. Es gilt nun eine Entscheidung zu treffen, welche Betriebsmittelvariante pro Alternativengruppe die optimalste darstellt. Dazu ist es nicht möglich lokal für jede Alternativengruppe die anhand der Zielfunktion beste Variante auszuwählen, da die darin enthaltenen Stationen in einer Beziehung zueinander stehen. Für dieses Fallbeispiel gilt dafür die Restriktion, dass in zwei aufeinanderfolgenden Betriebsmittelvarianten nicht nur die gleiche Ausführungsart in Form von stationären oder robotergeführten Prozessen auftreten darf. Das bedeutet, dass wenn in einer der aktuellen Betriebsmittelvariante vorgelagerten Betriebsmittelvariante nur stationäre Prozesse auftreten, dann muss in der aktuell betrachteten mindestens ein robotergeführter Prozess vorhanden sein. Diese Restriktion wird in Abbildung 98 veranschaulicht.

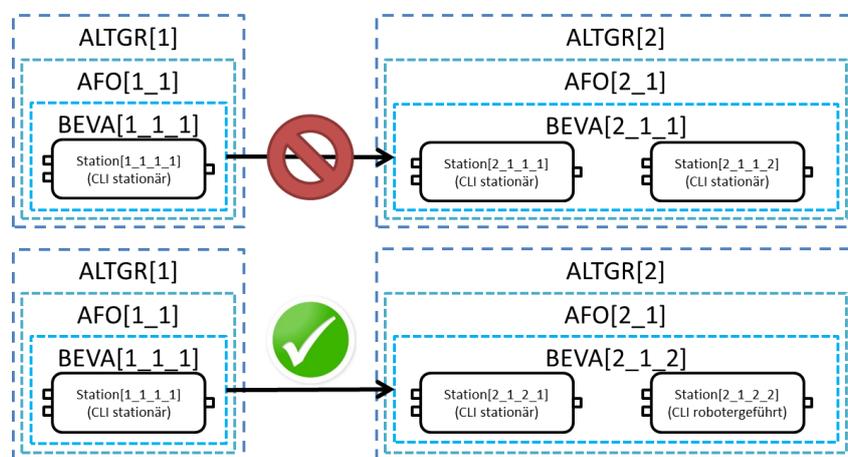


Abbildung 98: Restriktion für aufeinanderfolgende Betriebsmittel-Varianten (eigene Darstellung)

Um nun einen Graphen zu erzeugen, der mithilfe des Algorithmus von Dijkstra auf die kürzesten Pfade untersucht wird, ist es notwendig diesen aufzubereiten. Zu diesem Zeitpunkt existieren die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Alternativengruppen, sodass bekannt ist, welche die Vorgänger und Nachfolger einer Alternative sind. Die Richtung dieser Beziehungen wird zunächst umgekehrt, da der Dijkstra-Algorithmus vom Ziel der Fertigungsanlage alle kürzesten Pfade zu den Eingangsbereichen der Anlage ermittelt. Dieser Schritt ist in Abbildung 99 aufgezeigt.

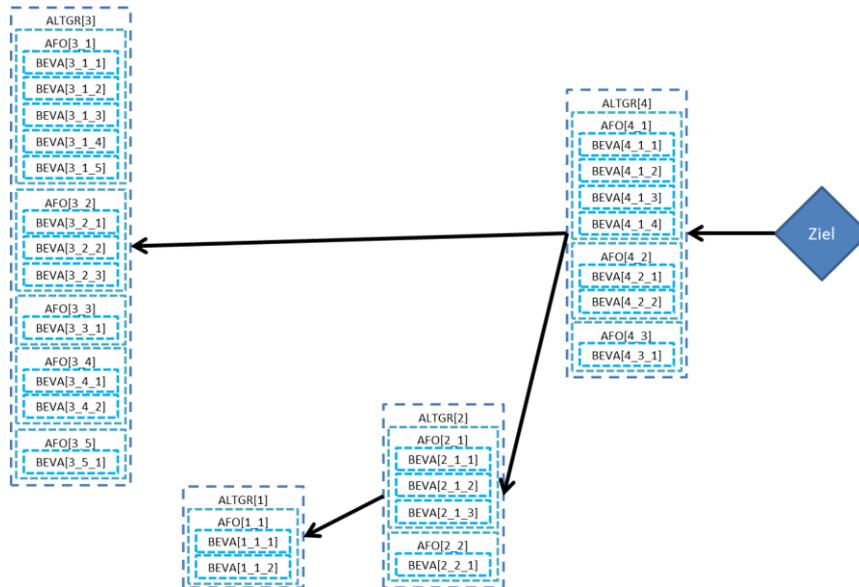


Abbildung 99: Vorbereitung des Graphen für den Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

Außerdem werden die durch die Restriktionen nicht erlaubten Kanten nicht in den Graphen aufgenommen. Zusätzlich dazu werden die Kantengewichte als Information hinzugefügt. Diese entsprechen dem jeweiligen Wert der Zielfunktion, auf dessen Betriebsmittelvariante die Kante zeigt. Dieses resultiert in dem Graphen der Abbildung 100. Die durch die oben beschriebene Restriktion nicht erlaubten Kanten sind rot dargestellt. Anhand dieses Ausgangsgraphen wird im nächsten Abschnitt mithilfe des Dijkstra-Algorithmus die in Bezug auf die Zielfunktion optimale Fertigungsanlage ermittelt.

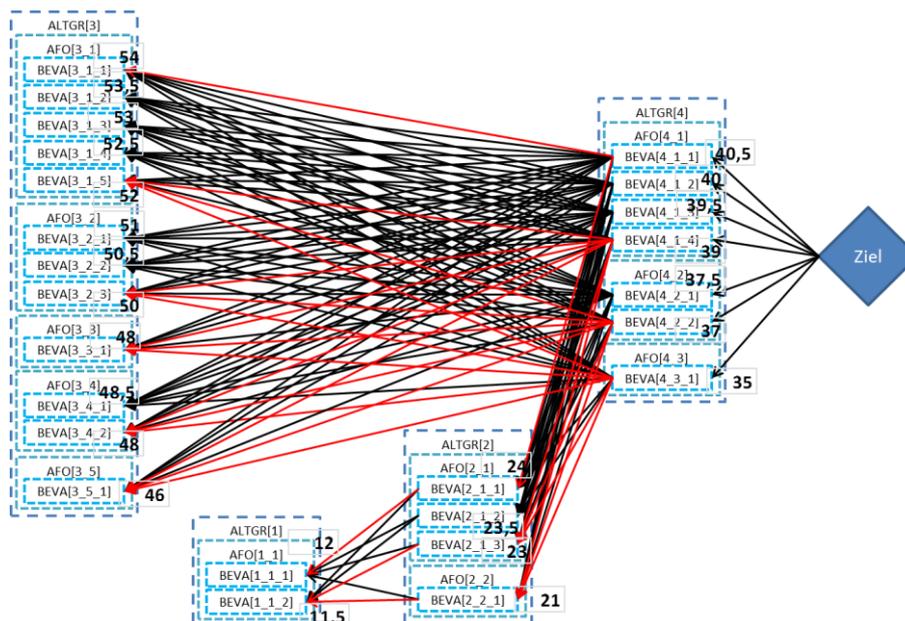


Abbildung 100: Löschen der verbotenen Kanten (eigene Darstellung)

### 6.5.1 Anwendung des Algorithmus von Dijkstra

Im ersten Schritt werden zwei Listen angelegt. Die erste Liste umfasst alle Knoten, die bereits besucht wurden und abgeschlossen sind. Zu diesen ist die kürzeste Distanz bereits bekannt. In den folgenden Abbildungen sind die darin enthaltenen Knoten grün hinterlegt. Die andere Liste ist eine Warteschlange in Form einer Priority-Queue, in der die benachbarten Knoten der bereits besuchten Knoten enthalten sind. Sie umfasst somit die Knoten, die als nächstes besucht werden. Diese Liste ist flexibel und wird im Verlauf des Algorithmus angepasst. In den Abbildungen dieses Kapitels werden diese Knoten mit blauem Hintergrund dargestellt. Außerdem wird der Startknoten festgelegt, von dem aus alle kürzesten Pfade zu den anderen Knoten ermittelt werden. Der Startknoten entspricht dem letzten Knoten in der Fertigungsanlage. In der Abbildung 101 werden die ersten Schritte des Algorithmus dargestellt. Dort wird zuerst der Startknoten als rot hinterlegter und aktuell betrachteter Knoten mit der Distanz 0 definiert. Alle weiteren Knoten werden mit einer unendlichen Distanz definiert, da zu diesen bislang kein Pfad ermittelt wurde.

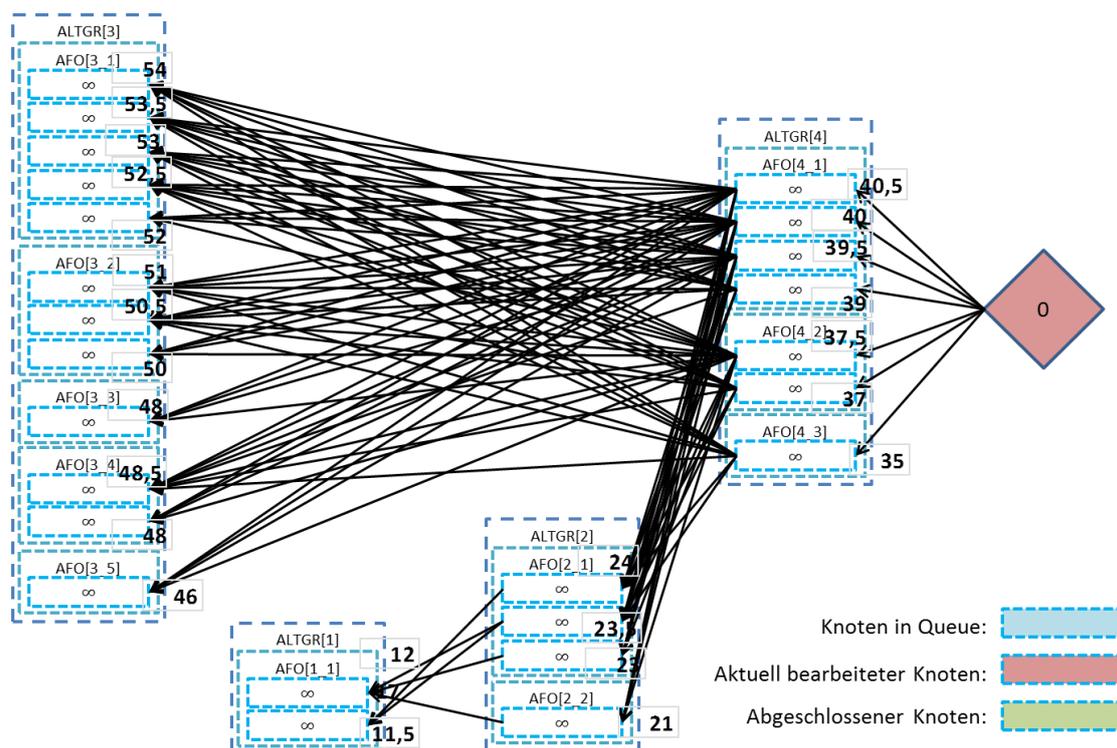


Abbildung 101: Erster Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

Anschließend werden die auf den Startknoten folgenden Knoten um die Information der Distanz angereichert. Diese entspricht dem Kantengewicht vom Startknoten zu den Nachfolgerknoten. Außerdem werden diese Knoten in die Queue der demnächst zu

bearbeitenden Knoten aufgenommen. Der Startknoten ist damit abgearbeitet. Als nächstes wird aus der Queue derjenige Knoten ausgewählt, der die zu dem Zeitpunkt geringste Distanz aufweist. In diesem Fall ist dies der Knoten der *Betriebsmittelvariante 4\_3\_1*. Die Untersuchung des Knotens, der die rote Markierung besitzt, wird in Abbildung 102 gezeigt. Dort ist erkennbar, dass sich auch aus dem Schritt zuvor die Knoten der vierten Alternativengruppe in der Queue befinden. Für den aktuell betrachteten Knoten werden erneut alle Nachfolger ermittelt. Da deren Distanz zurzeit unendlich ist, wird die Summe aus der Distanz zum aktuellen Knoten mit dem Kantengewicht der Nachfolgerknoten gebildet. Diese wird den Nachfolgeknoten als Distanz aufgeprägt und sie werden ebenfalls der Queue der noch zu untersuchenden Knoten hinzugefügt. Damit ist dieser Knoten auch abgeschlossen.

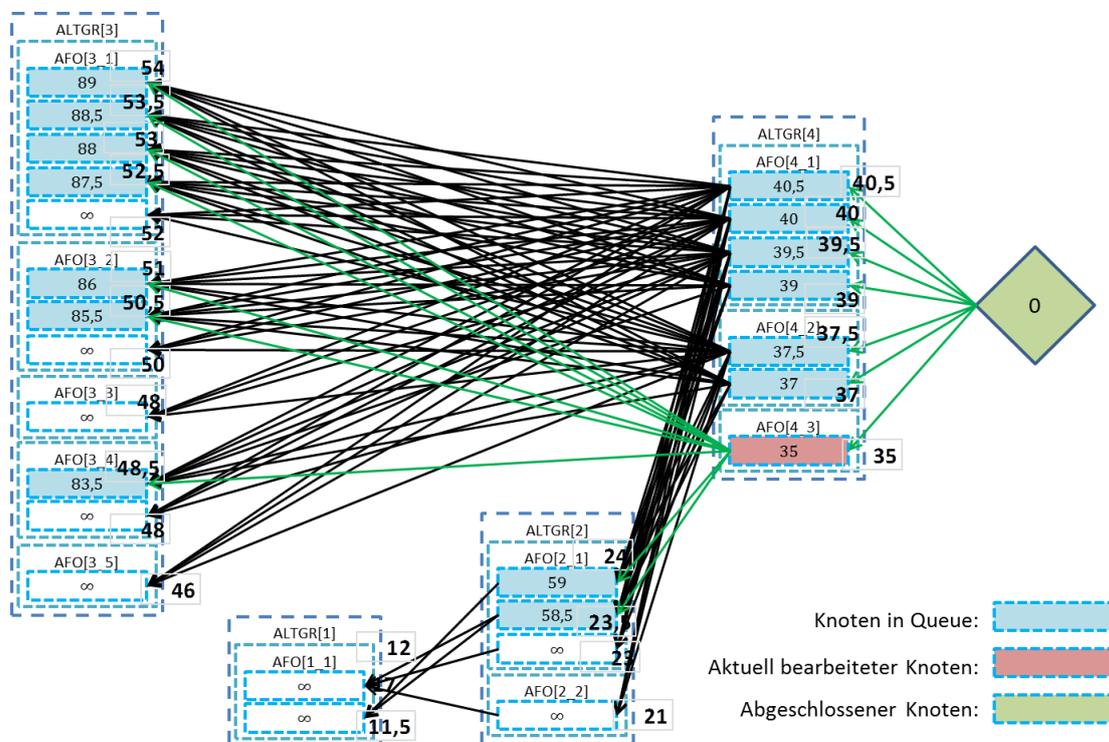


Abbildung 102: Zweiter Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

Der nächste zu untersuchende Knoten ist die *Betriebsmittelvariante 4\_2\_2*. Für diesen Knoten werden wieder die Nachfolger ermittelt. Im Gegensatz zum vorherigen Knoten werden den Nachfolgeknoten jedoch keine neuen Distanzwerte aufgeprägt, da diese sich bereits in der Queue der noch zu bearbeitenden Knoten befinden und sie bereits einen geringeren Distanzwert aufweisen als die Summe der Distanz des aktuellen Knotens und dem Kantengewicht zu den Nachfolgern. Damit ist dieser Knoten ohne eine Aktualisierung der Distanzwerte abgeschlossen. Danach folgt die Untersuchung des

Knotens für die *Betriebsmittelvariante 4\_2\_1*. Dieser besitzt Nachfolgerknoten, die noch nicht in der Queue vorhanden sind, sodass deren unendlicher Distanzwert aktualisiert wird und diese ebenfalls der Warteschlangenliste hinzugefügt werden. Damit ist dieser Knoten auch abgeschlossen. Der Status des Graphen nach diesem Schritt wird in Abbildung 103 dargestellt.

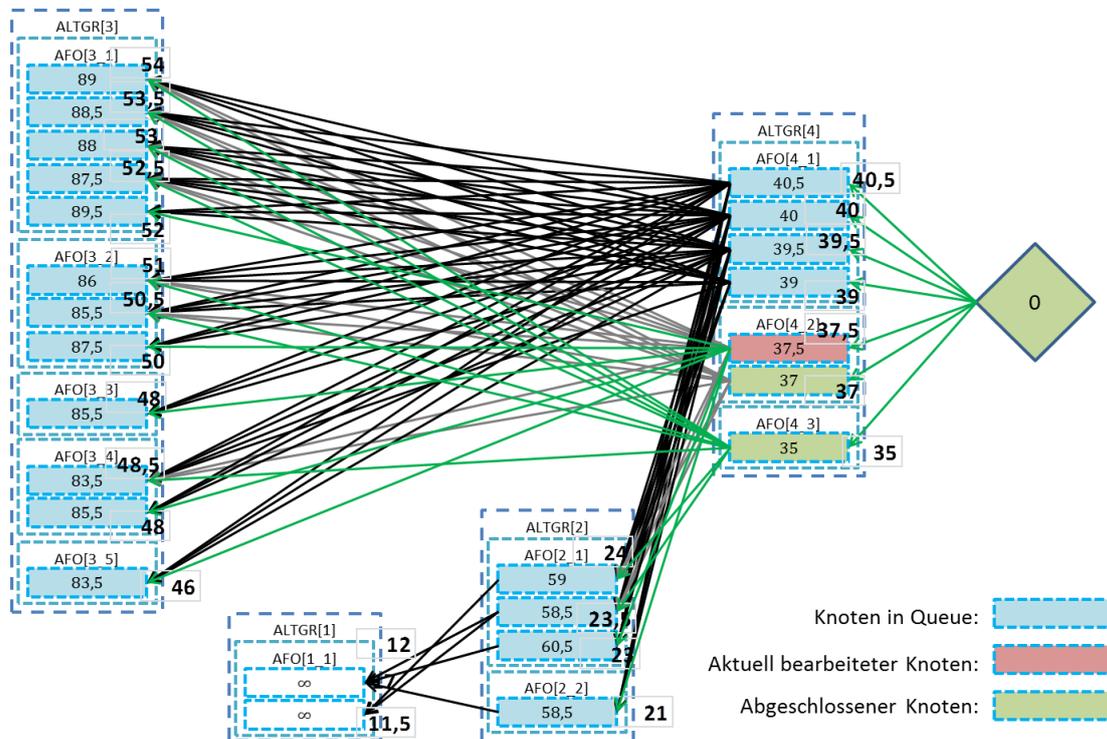


Abbildung 103: Dritter und vierter Schritt des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

Diese Vorgehensweise wird für die weiteren Knoten innerhalb der vierten Alternativen-Gruppe ebenso durchgeführt. Dabei ergibt sich jedoch für keinen der Nachfolgerknoten eine Verbesserung des Distanzwertes. Die Knoten mit der geringsten Distanz in der Queue der zu bearbeitenden Knoten sind die *Betriebsmittelvarianten 2\_1\_2* und *2\_2\_1*. In diesem Fall wird zufällig einer der Knoten als nächster zu untersuchender ausgewählt. Dabei fällt die Wahl hier auf die *Betriebsmittelvariante 2\_1\_2*. Diese prägt den Knoten der ersten Alternativen-Gruppe einen Distanzwert auf, da diese bislang einen unendlichen Wert hatten. Auch dieser Knoten ist damit abgeschlossen. Es erfolgt die Untersuchung des Knotens der *Betriebsmittelvariante 2\_2\_1*. Diese besitzt nur den Nachfolgerknoten der *Betriebsmittelvariante 1\_1\_1*. Außerdem ergibt sich aus der Summe des Kantengewichts zum nachfolgenden Knoten und des Distanzwertes des betrachteten Knotens der gleiche Wert, den der nachfolgende Knoten bereits besitzt. Damit existiert ein alternativer Pfad, der die gleiche Distanz aufweist. Die Untersu-

chung der beiden verbliebenen Knoten in der zweiten Alternativengruppe erzeugt keine Verbesserung der Distanz zu den Nachfolgeknoten, sodass sich der in Abbildung 104 gezeigte Zustand des Graphen ergibt.

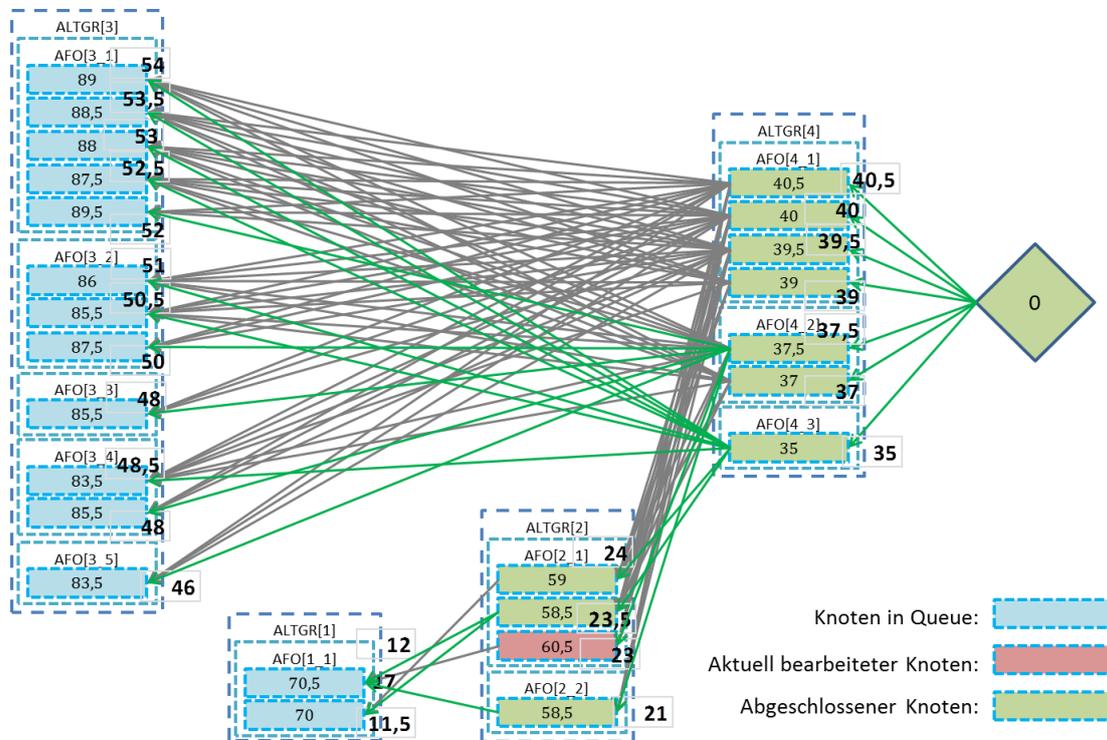


Abbildung 104: Zusammenfassung Schritt 5 bis 12 des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

Die danach in der Queue vorhandenen Knoten besitzen keine Nachfolgerknoten. Somit werden diese auch als abgeschlossen definiert und der Algorithmus von Dijkstra ist beendet. Das Resultat ist in Abbildung 105 angegeben. Diese zeigt die möglichen kürzesten Pfade vom Startknoten zu allen anderen Knoten. Für den Anwendungsfall ist es nun erforderlich den oder die optimalen Pfade der Fertigungsanlage zu ermitteln. Dafür werden innerhalb der Alternativengruppen, die im gebildeten Graphen keine Nachfolger besitzen und somit im Sinne der Fertigungsanlage die Eingangsbereiche darstellen, die Knoten mit den geringsten Distanzwerten ermittelt. Dies betrifft in diesem Fallbeispiel die erste und dritte Alternativengruppe. Daher werden im Ergebnisgraphen zwei kürzeste Pfade zu ermitteln sein, die von diesen Alternativengruppen ausgehen und in ihrem Verlauf zusammenfließen. In der ersten Alternativengruppe wird der Knoten der *Betriebsmittelvariante 1\_1\_2* bestimmt. Dieser besitzt eine gültige Kante zum Knoten der *Betriebsmittelvariante 2\_1\_2*. Für diese existiert eine gültige Kante zur *Betriebsmittelvariante 4\_3\_1*, deren Vorgänger bereits der Startknoten ist. Damit ist dieser Pfad vollständig ermittelt. In der dritten Alternativengruppe besitzen sowohl die *Be-*

triebsmittelvariante 3\_4\_1 als auch die Betriebsmittelvariante 3\_5\_1 den kleinsten Distanzwert. Die gültige Kante zum Vorgänger des letztgenannten Knotens ist jedoch nicht im zuvor gebildeten Pfad, der von der ersten Alternativengruppe ausging, enthalten. Damit ist der Knoten der Betriebsmittelvariante 3\_4\_1 zu wählen. Für diesen existiert eine gültige Kante zum Knoten der Betriebsmittelvariante 4\_3\_1. Damit ist der Graph für die kürzesten Pfade mit den relevanten Knoten ermittelt worden. In der Abbildung 105 sind diese beiden Pfade durch die fett hervorgehobenen, grünen Pfeile dargestellt.

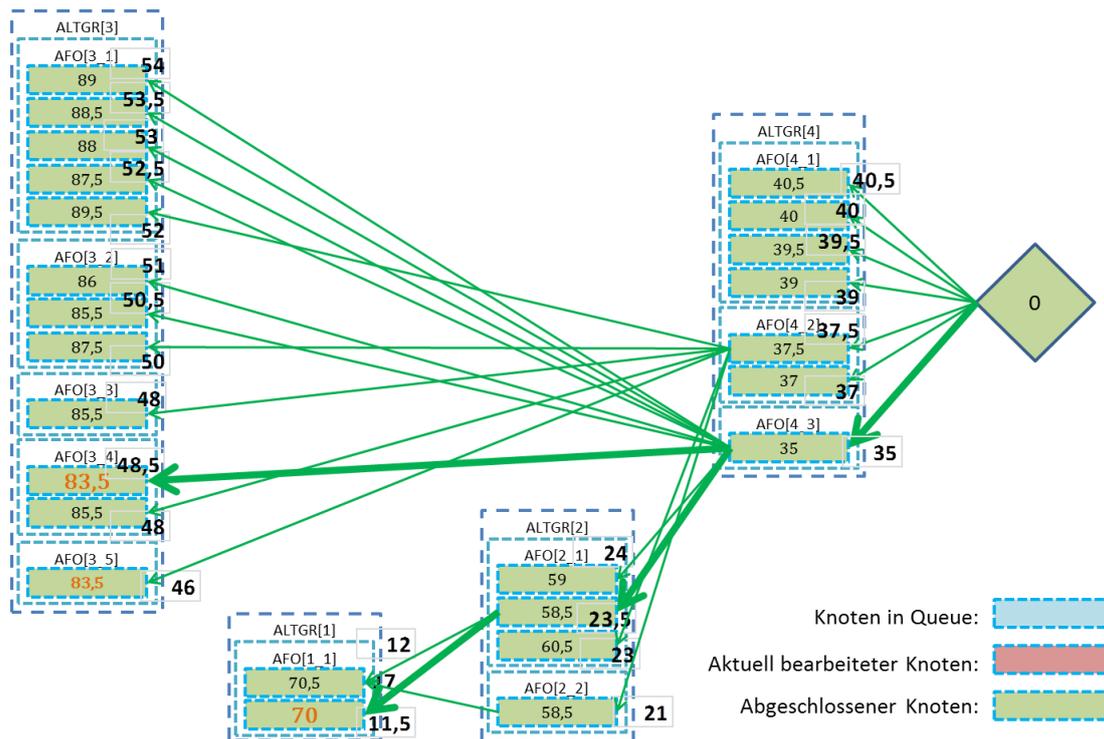


Abbildung 105: Resultat des Dijkstra-Algorithmus (eigene Darstellung)

### 6.5.2 Auswertung des Ergebnisses

Durch die Auswahl der Betriebsmittelvarianten wird mithilfe der Ontologie auf die darin enthaltenen Stationen geschlussfolgert. Die Abbildung 106 zeigt die durch den Dijkstra-Algorithmus ermittelten Betriebsmittelvarianten in der Flussdarstellung. Darunter ist die Abbildung des Graphen in Form des Aktivitätsdiagramms dargestellt. Darin ist erkennbar, dass zunächst die Einzelbauteile 4, 5 und 6 in der Station 1\_1\_2\_1 robotergeführt geclincht werden. Daraus ergibt sich das Zusammenbauteil 3. Zusammen mit dem Einzelbauteil 1 wird dieses zunächst in einer stationären Clinch-Station und danach in einer robotergeführten Clinch-Station zum Zusammenbauteil 2 zusammengefügt. Parallel dazu werden in einem zweiten Strang das Einzelbauteil 2 und 3 zum Zusammen-

*bauteil 1* verbunden. Diese Widerstandspunktschweißverbindung erfolgt in der *Station 3\_4\_1\_1* robotergeführt und anschließend in der *Station 3\_4\_1\_2* stationär. In der letzten Station werden die *Zusammenbauteile 1* und *2* robotergeführt durch Widerstandspunktschweißpunkte miteinander verbunden. Somit ist das Gesamtprodukt komplett.

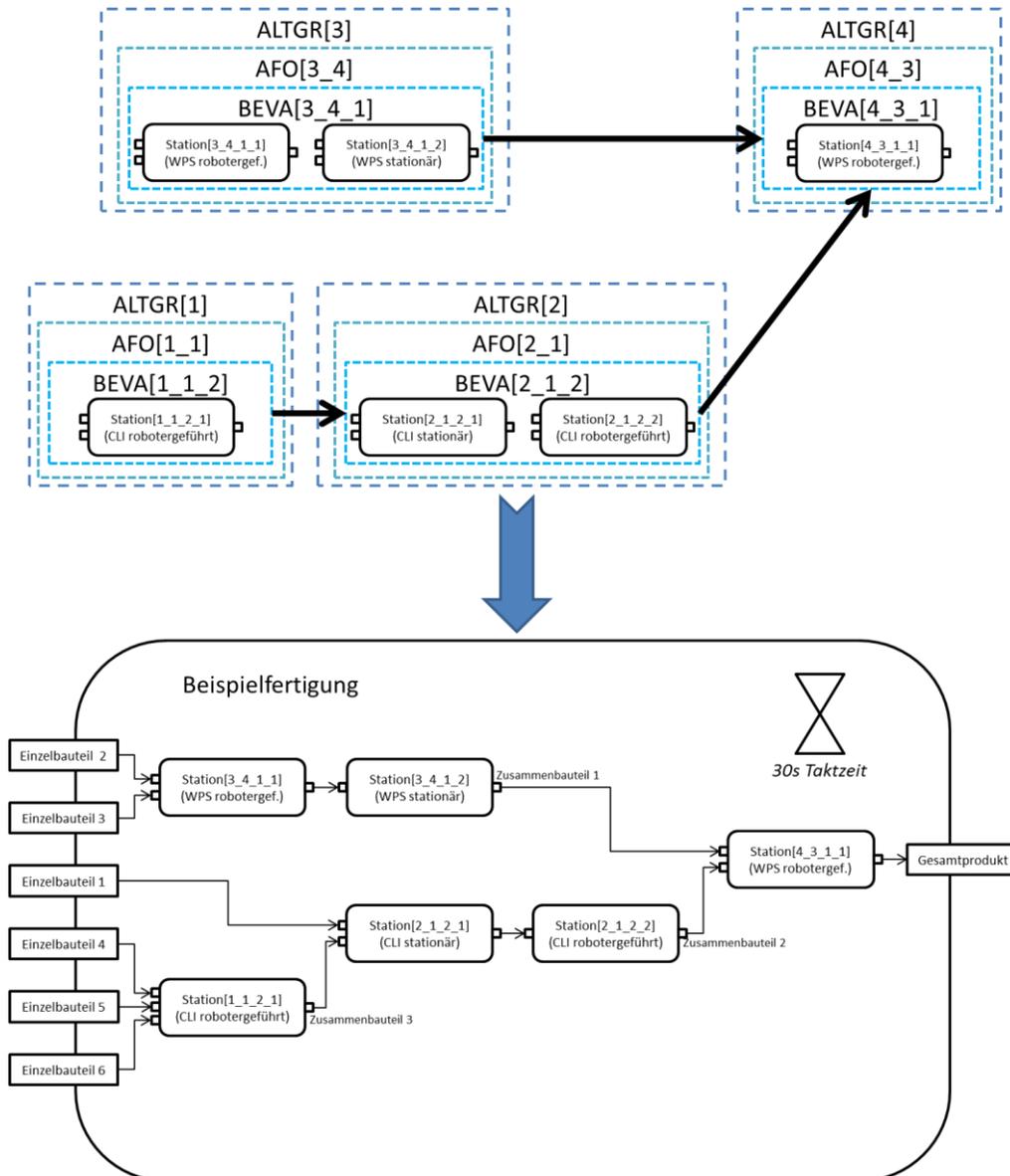


Abbildung 106: Ergebnis des Fertigungsprozesses im Aktivitätsdiagramm (eigene Darstellung)

Durch die in der Ontologie vorhandenen Informationen wird zusätzlich geschlussfolgert, welche Ressourcen in den einzelnen Stationen enthalten sind. Daraus wird ein Mengengerüst gebildet, das in Tabelle 34 aufgelistet ist. Anhand dieses Mengengerüsts ist es möglich die gesamten Investitionskosten und Energieverbräuche der ermittel-

ten Fertigungsanlage zu berechnen. Dazu wird die Menge der einzelnen Ressourcen bestimmt und anschließend mit den dafür vorgegebenen Investitionskosten und Energieverbräuchen multipliziert. Diese Produkte werden aufsummiert und es ergibt sich das Gesamtergebnis.

Ressource	Menge	Investition		Energieverbrauch	
		Einzelwert	Gesamtwert	Einzelwert	Gesamtwert
Schweißzange	7	4	28	6	42
Clinch-Zange	3	3	9	4	12
Industrie-Roboter	10	8	80	3	30
Greifer	2	2	4	2	4
Spannvorrichtung	4	2	8	2	8
Roboterpodest	10	1	10	0	0
Ständer	2	1	2	0	0
<b>Summe</b>			<b>141 IE</b>		<b>96 EE</b>

Tabelle 34: Resultat in Form des Mengengerüsts mit den erforderlichen Ressourcen

In weiteren Schritten ist es möglich diese Fertigungsanlage mit bereits vorhandenen Anlagen anhand ihrer Kennzahlen zu vergleichen und zu beurteilen. Damit ist ausgehend von gegebenen Produkt- und Projektdaten eine Fertigungsanlage entstanden, die alle benötigten Ressourcen beinhaltet. Das durch eine Vielzahl von Fertigungsplanern bereitgestellte implizite Wissen ist in der Ontologie explizit beschrieben. Mit diesem Wissen ist es möglich durch einen Algorithmus ein Mengengerüst zu erzeugen. Gleichzeitig bietet die Ontologie jederzeit die Möglichkeit das darin enthaltenen Wissen auch anderen Fertigungsplanern bereitzustellen und somit die Wissensweitergabe zu unterstützen.

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Zur Bewältigung von sich verkürzenden Entwicklungszyklen und komplexeren Kundenanforderungen innerhalb der Automobilindustrie werden im Rahmen der Fertigungsplanung für den Karosseriebau Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik verwendet. Der Einsatz von standardisierten Fertigungsanlagen als Referenz ermöglicht eine schnelle, produktdatenunabhängige Planung, woraus sich Synergien und beschleunigte Geschäftsprozesse ergeben. Die Integration der Referenzplanung in die generischen Planungsmethoden und -werkzeuge der Digitalen Fabrik stellt eine besondere Herausforderung dar. Durch die Entkopplung des Planungsprozesses von projektspezifischen Produktdaten ist nicht sichergestellt, dass das resultierende Planungsergebnis optimal auf das zu fertigende Produkt abgestimmt ist. Es wird eine Planungsmethodik gesucht, die einerseits projektspezifische Produktdaten berücksichtigt und andererseits so effizient wie die Referenzplanung ist. Ein möglicher Lösungsansatz, ist die Entwicklung eines wissensbasierten Konzepts zur automatisierten Generierung von Fertigungsanlagen auf Basis von Produktdaten.

In diesem Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Erarbeitung von Resultaten im Rahmen dieser Arbeit und eine anschließende kritische Beurteilung. Abschließend wird ein Ausblick gegeben, wie die Ergebnisse im Anschluss genutzt werden und welche weiteren Herausforderungen es im Zusammenhang mit dieser Arbeit zu lösen gilt.

### **7.1 Zusammenfassung und Beurteilung**

Zu Beginn ist mithilfe einer Expertenbefragung der aktuelle Planungsprozess innerhalb der Fertigungsplanung für den Karosseriebau bei der Marke Volkswagen PKW aufgenommen worden, um anhand der IST-Situation einen SOLL-Zustand zu erarbeiten. Die Abbildung dieses IST-Prozess erfolgte mit einer erweiterten Ereignisgesteuerten Prozesskette und anhand dessen wurden die Schwachstellen identifiziert. Diese betreffen hauptsächlich die Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Fertigungsplanung. Dabei kommt es zu Herausforderungen bei der Qualität der Daten und deren Bereitstellung zum erforderlichen Zeitpunkt. Außerdem führt die häufige Änderung von Produkthanforderungen im gesamten Verlauf eines Fahrzeugprojektes zu aufwendigen und kostenintensiven Umplanungen in den Fertigungsanlagen. Bei der Planung einer Fertigungsanlage im Karosseriebau werden standardisierte Fertigungsanlagen, die sowohl die notwendigen Fertigungsprozesse als auch Ressourcen enthalten, als Basis genutzt. Anschließend erfolgt eine Anpassung dieser Anlagen an das jeweilige Produkt. Somit handelt es sich nicht um eine Planung, bei der ausgehend vom Produkt die

notwendigen Fertigungsprozesse ermittelt und anschließend die erforderlichen Ressourcen abgeleitet werden, sondern lediglich um eine Anpassung des Ressourcen-Mengengerüsts der standardisierten Fertigungsanlage auf Grundlage des Produktes. Aufgrund der zuvor beschriebenen Herausforderungen am Punkt der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Fertigungsplanung ist dieses Vorgehen eine gute Methode, um die Planungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Jedoch ergibt sich daraus das Risiko, dass das erzeugte Ressourcen-Mengengerüst nicht optimal ist, da es sich um eine Anpassung handelt, die unter Umständen in Bezug auf Fertigungsprozesse und Ressourcen nicht hinreichend hinterfragt wird. Daher ist die Zielstellung dieser Arbeit die Entwicklung eines Konzeptes, das automatisiert das Vorgehen der Planung unterstützt. Dabei geht es vom Produkt hin zu den nötigen Fertigungsprozessen vor, um daraus ein Ressourcen-Mengengerüst abzuleiten. Dies dient dazu, die aktuell hohe Planungstiefe in der Phase der Grobplanung zu reduzieren und somit sowohl die Reaktionsgeschwindigkeit der Fertigungsplanung zu erhöhen als auch die Planung auf einem abstrakteren Niveau durchzuführen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die Anforderungen an ein mögliches System in Form des Konzeptes erarbeitet und mithilfe von Anwendungsfalldiagrammen dargestellt. Als ein Schritt zum Konzept erfolgten zunächst der Vergleich und die Bewertung von unterschiedlichen Methoden der Modellierung, um einen Fertigungsprozess darzustellen. Dabei wurde das im Rahmen der Unified Modeling Language definierte Aktivitätsdiagramm in Kombination mit dem Objektdiagramm ausgewählt, da diese den zuvor festgelegten Bewertungskriterien im größten Umfang entsprachen. Damit ist eine Art der Modellierung gefunden, die es ermöglicht sowohl den Ablauf als auch die Eigenschaften eines Fertigungsprozesses abzubilden. Anschließend wurde das Konzept zur Generierung von Fertigungsanlagen entwickelt. Dabei ist zuerst eine Ontologie erzeugt worden, die im Rahmen der wissensbasierten Systeme die Wissensbasis darstellt und das Planungswissen explizit und maschinenverwertbar zur Verfügung stellt. Weiterhin ist die Ontologie als Datenmodell durch ihre Erweiterbarkeit und Anpassbarkeit flexibel nutzbar. Sie bildet die Basis für den anschließend erarbeiteten Ablauf, der anhand von gegebenen Produktdaten zunächst automatisiert einen Fertigungsprozess und darauf aufbauend ein Ressourcen-Mengengerüst erzeugt. Dabei werden automatische Schlussfolgerungen in Form von Inferenzen innerhalb der Ontologie und algorithmische Schritte zugleich genutzt. Darauf folgte eine Evaluierung des entwickelten Konzeptes anhand eines konkreten und vereinfachten Beispiels. Dabei wurde die generelle Machbarkeit des Konzeptes nachgewiesen und Herausforderungen ermittelt.

Die Potentiale des erarbeiteten Konzeptes liegen darin, die Arbeitsweise eines Fertigungsplaners aus einem anderen Blickwinkel durchzuführen. Durch die Herleitung ausgehend vom Produkt über den Fertigungsprozess besteht die Möglichkeit, Optimierungspotentiale innerhalb einer Fertigungsanlage zu ermitteln. Außerdem wird dem Anlagenplaner mit wenig Aufwand ermöglicht, ein alternatives Ressourcengengerüst zu erzeugen. Zudem erfolgt eine starke Verbesserung des Wissensmanagements durch die Erschaffung einer Wissensbasis, die das bisher lediglich implizit vorhandene Wissen der Fertigungsplaner in einer expliziten Form bereitstellt. Darauf können sowohl neue Planer als auch IT-Systeme zugreifen und einen Nutzen ableiten. Es gilt jedoch auch hervorzuheben, dass es Herausforderungen zu lösen gilt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden gewisse Restriktionen festgelegt, die zur Erarbeitung des Konzeptes notwendig waren. Zunächst erfordert der vorgestellte Algorithmus einen hohen Rechenaufwand, da eine Vielzahl an Alternativen erzeugt wird, die durch den Algorithmus bewertet werden. Je komplexer ein Produkt ist, umso höher ist auch der Rechenaufwand. Diesen Aspekt gilt es bei der Vielzahl an komplexen Produktinformationen nicht zu unterschätzen. Außerdem benötigt die konsequente Umsetzung des Konzeptes auch eine Integration des Erstellungs- und Pflegeprozesses der Ontologie in den bereits vorhandenen Fertigungsplanungsprozess. Dies erfordert ebenso ein Gremium aus Experten. Es benötigt zum einen Experten für wissensbasierte Systeme, die in der Lage sind, die Ontologie aus methodischer und technologischer Sicht zu füllen und zum anderen Experten aus dem Fachbereich, die das Planungswissen besitzen und zur Verfügung stellen.

Weiterhin gibt es Restriktionen, die im Rahmen des Konzeptes gelten. Unter anderem erfolgt keine Betrachtung von Logistik- oder Transportprozessen, sondern lediglich den rein wertschöpfenden Prozessen zum Fügen von Bauteilen. Außerdem fertigt jede Fügefolge genau ein bestimmtes Zusammenbauteil aus genau zwei anderen Bauteilen. Zudem wurden ausschließlich Fügeverfahren betrachtet, die eine Fügeverbindung schaffen, die in Form eines Punktes gesetzt wird. Das Fügen mit kontinuierlichen Formen, wie einer Klebstoffbahn gilt es zu ergänzen. Zudem ist vorerst eine kleine Auswahl an Fertigungstechnologien und Ressourcen in Form von Instanzen in die Ontologie aufgenommen wurden, um das Anwendungsbeispiel zu vereinfachen. Auch die Betrachtung von verschiedenen Fahrzeugvarianten, die innerhalb einer Fertigungsanlage gefertigt werden erfolgte nicht. Für diesen Umfang ist es erforderlich bei einer

Weiterentwicklung der Resultate dieser Arbeit eine Lösung zu finden, die die Besonderheiten bei der Fertigung von unterschiedlichen Varianten innerhalb einer Fertigungsanlage berücksichtigt.

### **7.2 Ausblick**

Die im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Erkenntnisse dienen als ein Baustein bei der Ermittlung der Anforderungen an ein über die Prozesse der Produktentwicklung und Fertigungsplanung hinweg zu entwickelndes IT-System der Digitalen Fabrik. Somit ergänzen sie die Anforderungsanalyse und stellen wissenschaftliche Erkenntnisse über die untersuchten wissensbasierten Ansätze dar. Diese bieten gerade in Bezug auf die zunehmende Verknüpfung von der realen Fertigung und der Digitalen Fabrik das Potential diese intelligenter zu gestalten. Gerade das automatisierte Befüllen der Wissensdatenbank mit Erkenntnissen aus der realen Fabrik und der automatisierte Lernprozess mithilfe von intelligenten Systemen besitzen die Möglichkeit die Planungsqualität zu erhöhen und den Planungsprozess effizienter zu gestalten. Außerdem erfordert dies Veränderungen im Produktentstehungsprozess, indem Produktdaten zu einem früheren Zeitpunkt mit der erforderlichen Qualität zur Verfügung gestellt werden und ein geringerer Änderungsaufwand entsteht. Dazu sind zurzeit diverse Ansätze innerhalb des Unternehmens in der Analyse- und Umsetzungsphase. Der konsequente Einsatz der Methoden der Digitalen Fabrik kombiniert mit der Nutzung des planerischen Wissens in wissensbasierten und intelligenten Systemen bietet ein enormes Potential zur Effizienzsteigerung im Fertigungsplanungsprozess.

## Literaturverzeichnis

- AMBLER, S. W. (2014), User Stories: An Agile Introduction.  
<http://www.agilemodeling.com/artifacts/userStory.htm#InitialFormal> (27.01.2016).
- BALZERT, H. (2010), Java: objektorientiert programmieren. Vom objektorientierten Analysemodell bis zum objektorientierten Programm. W3L-Verl., Herdecke.
- BECKER, J. (1998), Die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung und ihre Einbettung in ein Vorgehensmodell zur Erstellung betrieblicher Informationsmodelle. Rundbrief. Westfälische Wilhelms-Universität, Münster.
- BECKER, J., MATHAS, C., WINKELMANN, A. & GÜNTHER, O. (Hrsg.) (2009), Geschäftsprozessmanagement. Springer, Berlin, Heidelberg.
- BERNERS-LEE, T. (2000), Semantic Web - XML2000. Architecture.  
<http://www.w3.org/2000/Talks/1206-xml2k-tbl/slide10-0.html> (28.01.2016).
- BOOCH, G., RUMBAUGH, J. & JACOBSON, I. (2006), Das UML Benutzerhandbuch. Aktuell zur Version 2.0. Addison-Wesley, München.
- BORCHERT, R. (2003), GI-Technologien zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Wissensbasen. Teil 1: Einführung: Wissensbasis und Ontologie, Münster.
- BRACHT, U., GECKLER, D. & WENZEL, S. (2011), Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Berlin, New York.
- BRACHT, U. & SPILLNER, A. (2009), Die Digitale Fabrik ist Realität. Ergebnisse einer Umfrage zum Umsetzungsstand und zu weiteren Entwicklungen der Digitalen Fabrikplanung bei deutschen OEM. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (7-8 / 2009), 648–653.
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN / BUNDESVERWALTUNGSAMT (2015), Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung, Berlin / Köln.
- DANGELMAIER, W. (1999), Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung Grundlagen, Algorithmen und Beispiele. Springer, Berlin, Heidelberg.
- DASSAULT SYSTEMES (2016), Delmia. Weltweite Fertigungsabläufe. <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/delmia/> (27.01.2016).
- GAAG, A. (2009), Entwicklung einer Ontologie zur funktionsorientierten Lösungssuche in der Produktentwicklung. Dissertation. Technische Universität München, München.
- GADATSCH, A. (2001), Management von Geschäftsprozessen. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- GADATSCH, A. (2008), Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.

- GRECHENIG, T. (2010), Softwaretechnik. Mit Fallbeispielen aus realen Entwicklungsprojekten. Pearson Studium, München.
- GRUBER, T. R. (1995), Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. In: International Journal of Human-Computer Studies, 43 (5-6), 907–928, doi: 10.1006/ijhc.1995.1081.
- GÜNTHER, H.-O. & TEMPELMEIER, H. (2012), Produktion und Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg.
- HABERHAUER, H. & BODENSTEIN, F. (1996), Maschinenelemente. Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l.
- HACHTEL, G. & HOLZBAUR, U. D. (2010), Management für Ingenieure. Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- HAUN, M. (2000), Wissensbasierte Systeme. Eine praxisorientierte Einführung ; mit CD-ROM. expert-Verl., Renningen-Malmsheim.
- HITZLER, P. (2008), Semantic Web. Grundlagen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- HOLZKAMP, U. (2010), Karosseriebau – vom Einzelteil bis zur fertigen Karosserie. Produkt/Fertigungstechnik, Wolfsburg.
- HORROCKS, I., PATEL-SCHNEIDER, P. F., BOLEY, H., TABET, S., GROSOFF, B. & DEAN, M. (2014), SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission 21 May 2004. <https://www.w3.org/Submission/SWRL/> (01.05.2016).
- KASPROWICZ, M., HEIN, M.-T. & KNABE, S. (2014), Planungsmethodik Basisanlagen ZP5. Interne Unterlage, Wolfsburg.
- KASTENS, U. (2009), Vorlesung Modellierung. Petrinetze, Paderborn.
- KERN, W. (Hrsg.) (1979), Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- KERN, W. (Hrsg.) (1996), Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- KLEUKER, S. (2011), Grundkurs Software-Engineering mit UML. Der pragmatische Weg zu erfolgreichen Softwareprojekten. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
- KÖSTERS, C. (2006), Ein ontologiebasiertes Modell zur Beschreibung der Abläufe in einem Produktionssystem unter besonderer Berücksichtigung einer diskreten Produktion. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn.
- KRÖNING, R. (1998), Petri-Netze, Berlin. [http://www.kroening-online.de/Method/Petrinetz/m\\_petri.php](http://www.kroening-online.de/Method/Petrinetz/m_petri.php) (27.01.2016).

- KRUMKE, S. O. & NOLTEMEIER, H. (2005), Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. Teubner, Wiesbaden.
- LÄMMEL, U. & CLEVE, J. (2008), Künstliche Intelligenz. Lehr- und Übungsbuch. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, s.l.
- LANGEMANN, T. (1999), Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn.
- LINDENBACH, H. & GÖPFERT, J. (2013), Geschäftsprozessmodellierung mit BPMN 2.0. Business Process Model and Notation. Oldenbourg, München.
- LOHSE, N. (2006), TOWARDS AN ONTOLOGY FRAMEWORK FOR THE INTEGRATED DESIGN OF MODULAR ASSEMBLY SYSTEMS. Dissertation. University of Nottingham, Nottingham.
- LÜTJEN, M. (2014), Modellierungskonzept zur integrierten Planung und Simulation von Produktionsszenarien entwickelt am Beispiel der CFK-Serienfertigung. Dissertation. Universität Bremen, Bremen.
- MEIER, M. (2002), Auswählen und Bewerten, Zürich.
- NOY, N. F. & MCGUINNESS, D. L. (2001), Ontology Development 101. A Guide to Creating Your First Ontology, Stanford.
- OESTEREICH, B. & BREMER, S. (2012), Analyse und Design mit der UML 2.5. Objektorientierte Softwareentwicklung ; [inkl. Poster mit UML-Notationsübersicht]. Oldenbourg, München.
- PAWELLEK, G. (2014), Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer Vieweg, Berlin.
- PELLEGRINI, T. & BLUMAUER, A. (Hrsg.) (2006), Semantic Web. Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft ; mit 4 Tabellen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- PROBST, G. (2006), Wissen managen. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- REHÄUSER, J. & KRUMHOLTZ, H. (1996), Wissensmanagement im Unternehmen. In: SCHREYÖGG, G. & CONRAD, P. (Hrsg.), Wissensmanagement: Managementforschung 6, Berlin.
- RIEGEL, F. (1964), Rechnen an spanenden Werkzeugmaschinen. Ein Lehr- und Handbuch zum Gebrauch in Werkstatt, Büro und Schule. Springer, Berlin, Heidelberg.
- SCHEER, A.-W. (1987), Computer integrated manufacturing. CIM. Springer, Berlin u.a.
- SCHEER, A.-W. (1997), Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. Springer, Berlin.
- SCHEER, A.-W. (1998a), ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- SCHEER, A.-W. (1998b), ARIS - Vom Geschäftsprozeß zum Anwendungssystem. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- SCHENK, M., WIRTH, S. & MÜLLER, E. (2014), Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Springer Vieweg, Berlin.
- SCHMIGALLA, H. (1995), Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. Hanser, München.
- SCHNEIDER, G., GEIGER, I. K. & SCHEURING, J. (2008), Prozess- und Qualitätsmanagement. Grundlagen der Prozessgestaltung und Qualitätsverbesserung mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten. Compendio Bildungsmedien, Zürich.
- SCHOLES, R. (1982), Semiotics and interpretation. Yale Univ. Press, New Haven.
- SEIDLMEIER, H. (2015), Prozessmodellierung mit ARIS®. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis in ARIS 9. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- SIEMENS TECNOMATIX (2015), Process Designer. Produktübersicht.  
[http://www.plm.automation.siemens.com/de\\_de/products/tecnomatix/assembly\\_planning/process\\_designer.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/tecnomatix/assembly_planning/process_designer.shtml) (27.01.2016).
- STANFORD UNIVERSITY (2016), Protégé. Stanford Center for Biomedical Informatics Research.
- STUDER, R., BENJAMINS, V. & FENSEL, D. (1998), Knowledge engineering. Principles and methods. In: Data & Knowledge Engineering, 25 (1-2), 161–197, doi: 10.1016/S0169-023X(97)00056-6.
- VELDEN, L. (2014), Graphalgorithmen. Der Dijkstra-Algorithmus. IDP Projekt, München. [https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-dijkstra/index\\_de.html](https://www-m9.ma.tum.de/graph-algorithms/spp-dijkstra/index_de.html) (28.01.2016).
- VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (2009), 3D Datenaustausch in der Fabrikplanung, Frankfurt.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1973), Materialfluß-Untersuchungen (VDI 3300), Düsseldorf (27.01.2016).
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1997), Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren (VDI 2225), Düsseldorf (27.01.2016).
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2008), Digitale Fabrik Grundlagen (VDI 4499), Düsseldorf (26.01.2016).
- VOLKSWAGEN AG KONZERN KOMMUNIKATION (2012), Baukastenprinzip. Vielfalt durch einheitliche Standards. In: VIAVISION, 2012 (02/2012).
- VOLKSWAGEN AG PLANUNG MARKE VOLKSWAGEN (2015), Simulationsdokumentation Boden Hinten Trägerstruktur. Internes Dokument, Wolfsburg.
- WEBER, W., KABST, R. & BAUM, M. (2014), Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Gabler, Wiesbaden.

WIRTSCHAFTSLEXIKON24 (2015), Wirtschaftslexikon. Taktzeit.

<http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/taktzeit/taktzeit.htm> (29.01.2016).

WYTRZENS, H. K. & WYTRZENS, G. (2010), Projektmanagement. Der erfolgreiche Einstieg. Facultas.wuv, Vienna Austria.



## Anhang

### A Interviews mit Betriebsmittelplanern

#### Interview Person 1

Rolle: Fertigungsplaner Karosseriebau für Unterbau

- Prämissen, die die Randbedingungen des Projektes beschreiben: Taktzeit, Produktdaten (evtl. für ein Referenzprodukt), Fertigungstiefe, Fahrzeugvarianten, Mechanisierungsgrad, standortspezifische Prämissen, Logistikkonzept
- Durch die vorhandenen Basisanlagen wird genau gesehen die Phase der Grobplanung schon verfeinert, sodass die Planung einer Fertigungsanlage aktuell bereits mit detaillierteren Informationen beginnt → diese Grobplanungsphase wird durch die Anpassung der Basisanlagen beschrieben → Feinplanungsphase erst durch sehr detaillierte Anpassungen der Anlagen in der Phase nach Vergabe der Anlagen an einen Anlagenlieferanten
- Vorhandene Standardanlagen liefern bereits das erste Betriebsmittel-Mengengerüst → Standardisierer sorgen für Investkontrolle und -wissen
- Die größten Produkt-Konzeptunterschiede bestehen meistens in den Baugruppen Boden hinten, Radhaus hinten und Längsträger hinten → die restlichen Baugruppen im Unterbau meistens sehr ähnlich
- Fügefolgen und -verfahren werden anhand eines Standards festgelegt → dieser Standard gilt für Produkt- und Fertigungsplaner
- Möglichkeiten der Modellierung für Fertigungsprozesse:
  - Zweidimensionales Anlagenlayout mit Pfeilen, die den Fertigungsfluss darstellen
  - Parametrische Darstellung als abstrakte Abbildung
  - PERT-Diagramm im Process Designer (wird im Process Designer automatisch nach Fertigstellung der Planung erzeugt)
- Aufgrund der vorhandenen Basisanlagen kommt keine vollständige Neu-Planung von Fertigungsanlagen anhand des gegebenen Produktes mehr vor
- Prozessbeschreibung:
  - Grundlage der Planung ist die Basisanlage
  - Vergleichen des vorgegebenen Produktes mit dem Referenzprodukt, auf dessen Grundlage die Basisanlage für die zu planende Baugruppe entwickelt wurde
  - Ermitteln der Unterschiede und Auswahl einer Referenzanlage als Grundlage der Planung
    - Wenn keine oder geringe Unterschiede vorhanden sind, dann Basisanlage
    - Wenn große Unterschiede vorhanden sind, dann Anlage einer bereits geplanten Baugruppe als Grundlage
  - Anhand der Prämissen werden die vorhandenen Basisanlagen bewertet und die ähnlichste ausgewählt
  - Die Basisanlagen besitzen dabei einen modularen Aufbau, um auf verschiedene Produkte und Prämissen reagieren zu können
  - Basisanlagen werden produktspezifisch angepasst
  - Sowohl die Erweiterung als auch die Reduzierung um Betriebsmittel innerhalb der Anlage ist möglich → ab einem bestimmten Grad der Unterschiedlichkeit ist es sinnvoll eine andere Basisanlage heranzuziehen
  - Nach ersten Anpassungen findet ein Layout-Workshop mit der bisher erarbeiteten Fertigungsanlage statt
  - Nach der vollständigen Planung einer Anlage fließen positive und negative Erfahrungen in neue Anlagen und die Basisanlagen ein → zusätzlich existiert ein konzernweiter Austausch

## Interview Person 2 und Person 3

Rolle Person 2 und 3: Fertigungsplaner Karosseriebau für Aufbau und für Seitenteil

- Die wichtigsten Prämissen sind die Taktzeit, die stundenweise Ausbringung der Anlage, die zu fertigenden Fahrzeugtypen und standort- bzw. hallenspezifische Merkmale
- Fügefolgen für jedes Bauteil sind standardisiert --> nach Bedarf sind Anpassungen an das Produkt möglich
- Probleme:
  - brauchbare Produktdaten meist erst im Rahmen der Vergabe der Anlagen an den Anlagenlieferanten verfügbar --> bis dahin oft unzureichender Produktdatenstand
  - viele und auch große Änderungen im Laufe des Projektes
  - Produkte sind oft sehr verschieden, sodass man bei den gleichen Bauteilen oft keine Ähnlichkeit und somit keinen Vorteil der Konzeptähnlichkeit der Fertigungsanlagen hat
- Bevor Planung mit den Basisanlagen vorgenommen wurde, fand die Planung mit sogenannter Parametrischer Darstellung statt, die lediglich die grobe Abfolge der Fügeverfahren inkl. Betriebsmittel darstellten --> danach folgte die detaillierte Layout-Planung mit der Platzierung der Betriebsmittel
- Prozessbeschreibung:
  - Produkt, das als Basis für die Planung der Fertigungsanlagen dienen soll, wird selbst definiert anhand der gegebenen Prämissen (für die Planung der Anlagen des neuen Polo wurde z.B. der aktuelle Golf als Referenzprodukt hergenommen)
  - Die Grundlage der Anlagenplanung bilden die vorhandenen Basisanlagen
  - Diese werden anschließend anhand des Produktes angepasst (Anpassungen werden zunächst handschriftlich auf Skizzen vorgenommen --> danach im Process Designer eingepflegt)
  - Wenn keine Basisanlage zu den gegebenen Projekt- und Produktprämissen passt, werden Referenzanlagen als Grundlage hergenommen
  - Kontinuierlich fließen Änderungen des Produktes über die Bereichsprojektleitung ein und werden in den Fertigungsanlagen umgesetzt

## Interview Person 4

Rolle: Fertigungsplaner Karosseriebau für Unterbau

- Vorrangige Prämissen sind die Taktzeit, die Ausbringung, die Fertigungstiefe und die Produkteigenschaften
- Bei kompletter Neu-Planung:
  - Produkt vollständig bekannt
  - Fügefolgen werden grob bestimmt
  - Planung im PD vornehmen --> V-Plan als Excel
- Bevor Basisanlagen vorhanden waren, wurden passende Teilabschnitte aus bereits vorhandenen Anlagen als Referenz zu einer Fertigungsanlage zusammengefügt
- Das Produkt anhand dessen die Basisanlagen entwickelt wurden, war ein aktuell gefertigtes Fahrzeugmodell, da dieser eine der wenigsten Fügeäquivalente hat
- Zum Projektstatus der Planungsfreigabe besitzen die Produktdaten eine gute Qualität --> durch die Einführung des MQB ergibt sich eine größere Planungssicherheit der Produktdaten im Unterbau
- Meinung: Basisanlagen sind die optimale Grundlage zur Ermittlung des Planungsergebnisses
- Prozessbeschreibung:
  - Grundlage für die Planung der Fertigungsanlagen sind die Basisanlagen
  - Sollten zu große Unterschiede bei den Produkteigenschaften und Prämissen bestehen, wird ein Referenzprojekt als Basis hergenommen (z.B. ähnliches Fahrzeug oder Vorgänger-Fahrzeug, bspw. auch von anderen Konzernmarken)
  - Abhängig vom Änderungsbedarf an das Produkt werden die Basisanlagen reduziert oder erweitert das erste Ergebnis für ein Mengengerüst wird aus Basisanlagen ermittelt

## Interview Person 5

Rolle: Fertigungsplaner Karosseriebau für Anbauteile

- in der frühen Phase der Planung sind die Produktdaten meist noch ziemlich unbekannt, sodass ein Standardprodukt zur Planung der Anlagen festgelegt wird → dieses Standardprodukt wird im Laufe des Projektes mit dem realen Produkt abgestimmt
- Basisanlagen entstanden aus den geplanten Fertigungsanlagen eines aktuell gefertigten Fahrzeugmodells
- Prozessbeschreibung:
  - Produktzeichnung und –struktur analysieren
    - Ermittlung der zu fertigenden Baugruppen anhand der Gewichtsliste mit aufgelisteten Haus- und Kaufteilen
    - Ermittlung der erforderlichen Fügeverfahren
  - Anhand der gegebenen Prämissen werden die Basisanlagen als Basis genommen
  - Sollte keine Basisanlage zu den Prämissen passen, wird ein anderes Projekt als Referenz hergenommen
- Enge Zusammenarbeit zwischen den Betriebsmittel- und den Produktplanern führt zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Fertigungsanlage



## C SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Produkt“

Identifizierung der allgemeinen Produkte als Zusammen- oder Einzelbauteile
Produkt(?P), pm_xml_tag(?P, "PmCompoundPart") -> Zusammenbauteil(?P)
Produkt(?P), pm_xml_tag(?P, "PmPartInstance") -> Einzelbauteil(?P)
Identifizierung der Verbindungsarten
Verbindung(?V), pm_xml_tag(?V, "PmWeldPoint") -> Widerstandsschweisspunkt(?V)
Verbindung(?V), pm_xml_tag(?V, "PmClinchPoint") -> Clinchverbindung(?V)
Ermitteln der miteinander verbundenen Bauteile
Produkt(?P1), Produkt(?P2), DifferentFrom (?P1, ?P2), Verbindung(?V1), verbindet(?V1, ?P1), verbindet(?V1, ?P2) -> ist_verbunden_mit(?P1, ?P2)

Tabelle 35: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Produkt"

## D SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Prozess“

<b>Identifizierung der Operationsarten und Spezifizierung der Realisierungsbeziehung</b>
<pre> Operation(?O), Schweissverbindung(?SV), realisiert(?O, ?SV) -&gt; Schweissoperation(?O), schweisst(?O, ?SV) </pre>
<pre> Operation(?O), Clinchverbindung(?CV), realisiert(?O, ?CV) -&gt; Clinchoperation(?O), clincht(?O, ?CV) </pre>
<b>Aufprägen der Dauer der Operation anhand der Referenz</b>
<pre> Schweissoperation(?SO), dauer(WPS_Referenz, ?TD), DifferentFrom (?SO, WPS_Referenz) -&gt; dauer(?SO, ?TD) </pre>
<pre> Clinchoperation(?CO), dauer(CL_Referenz, ?TD), DifferentFrom (?CO, CL_Referenz) -&gt; dauer(?CO, ?TD) </pre>
<b>Ermitteln der in einer Fügefolge enthaltenen Fügeoperationen</b>
<pre> Zusammenbauteil(?ZSB), Fügefolge(?FF), Produkt(?K), Verbindung(?V), Fügeoperation(?FO), gefuegt_in(?ZSB, ?FF), hat_direkte_Komponente(?ZSB, ?K), verbindet(?V, ?K), realisiert(?FO, ?V) -&gt; besteht_aus(?FF, ?FO) </pre>
<b>Ermitteln der Vorgänger einer Fügefolge</b>
<pre> Zusammenbauteil(?ZSB), Produkt(?P), Fügefolge(?FF_V), Fügefolge(?FF_N), hat_direkte_Komponente(?ZSB, ?P), gefuegt_in(?ZSB, ?FF_N), gefuegt_in(?P, ?FF_V) -&gt; hat_Vorgaenger(?FF_N, ?FF_V) </pre>

Tabelle 36: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Prozess"

## E SWRL-Regeln in der Ontologie aus dem Bereich „Ressourcen“

<b><i>Festlegung der direkten Abhängigkeiten für benötigte Ressourcen</i></b>
Fuege-BeMi(?FB), Schweissoperation(?SO), fuehrt_aus(?FB, ?SO) -> Schweisszange(?FB)
Fuege-BeMi(?FB), Clinchoperation(?CO), fuehrt_aus(?FB, ?CO) -> Clinch-Zange(?FB)
Industrie_Roboter(?IR), DifferentFrom (?IR, IR_Referenz) -> benoetigt_notwendig(?IR, PO_Referenz)
Greifer(?GR), DifferentFrom (?GR, GR_Referenz) -> benoetigt_notwendig(?GR, IR_Referenz)
Schweisszange(?SZ), DifferentFrom (?SZ, SZ_Referenz) -> benoetigt_alternativ(?SZ, ST_Referenz), benoetigt_alternativ(?SZ, IR_Referenz)
Clinch-Zange(?CZ), DifferentFrom (?CZ, CLZ_Referenz) -> benoetigt_alternativ(?CZ, ST_Referenz), benoetigt_alternativ(?CZ, IR_Referenz)
<b><i>Festlegung der indirekten Abhängigkeiten für benötigte Ressourcen</i></b>
Staender(?ST), Schweisszange(?SZ), DifferentFrom (?ST, ST_Referenz), hat_direktes_BeMi(?SZ, ?ST) -> benoetigt_notwendig(?ST, GR_Referenz)
Staender(?ST), Clinch-Zange(?CZ), DifferentFrom (?ST, ST_Referenz), hat_direktes_BeMi(?CZ, ?ST) -> benoetigt_notwendig(?ST, GR_Referenz)
hat_direktes_BeMi(?SZ, ?IR), Schweisszange(?SZ), DifferentFrom (?IR, IR_Referenz), Industrie_Roboter(?IR) -> benoetigt_notwendig(?IR, SV_Referenz)
hat_direktes_BeMi(?CZ, ?IR), Clinch-Zange(?CZ), DifferentFrom (?IR, IR_Referenz), Industrie_Roboter(?IR) -> benoetigt_notwendig(?IR, SV_Referenz)

<b>Ermitteln des Inhalts einer Station</b>
<pre> Fuegefolge(?FF), Operation(?OP), Fuege-BeMi(?FB), Alternativengruppe(?AGR), ArbeitsfolgenVariante(?AFO), Betriebsmittelvariante(?BV), Takt(?T), Station(?ST), besteht_aus(?FF, ?OP), fuehrt_aus(?FB, ?OP), hat_Fuegefolge(?AGR, ?FF), hat_AfoVariante(?AGR, ?AFO), hat_BemiVariante(?AFO, ?BV), hat_Takt(?BV, ?T), entspricht(?T, ?ST), gehoeert_zu_Var(?FB, ?BV) -&gt; hat_Inhalt(?ST, ?FB) </pre>
<pre> Gebrauchsobjekt(?GO), Station(?ST), Fuege-BeMi(?FB), hat_Inhalt(?ST, ?FB), hat_indirektes_BeMi(?FB, ?GO) -&gt; hat_Inhalt(?ST, ?GO) </pre>

Tabelle 37: Übersicht der SWRL-Regeln des Bereiches "Ressource"

## F Übersicht der Alternativengruppen, Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten

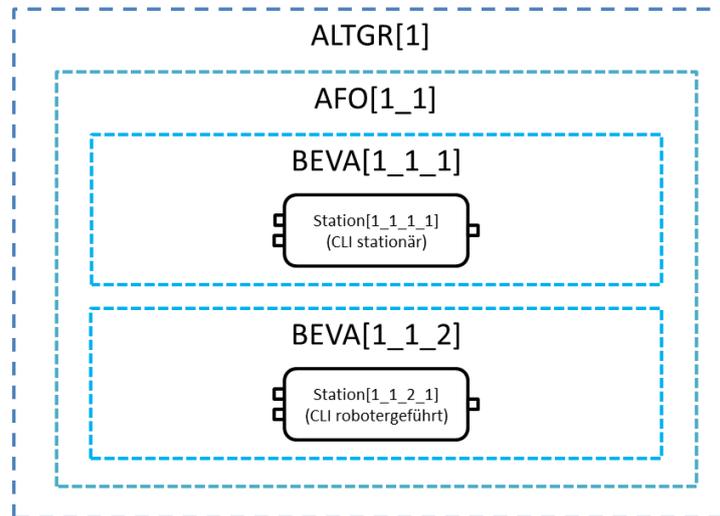


Abbildung 108: Übersicht der Alternativengruppe 1 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung)

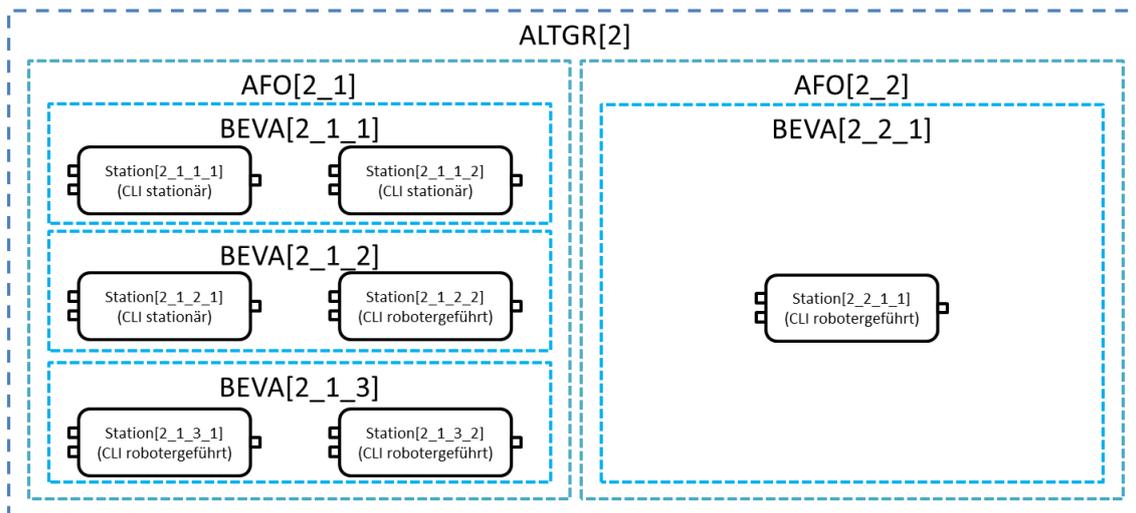


Abbildung 109: Übersicht der Alternativengruppe 2 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung)

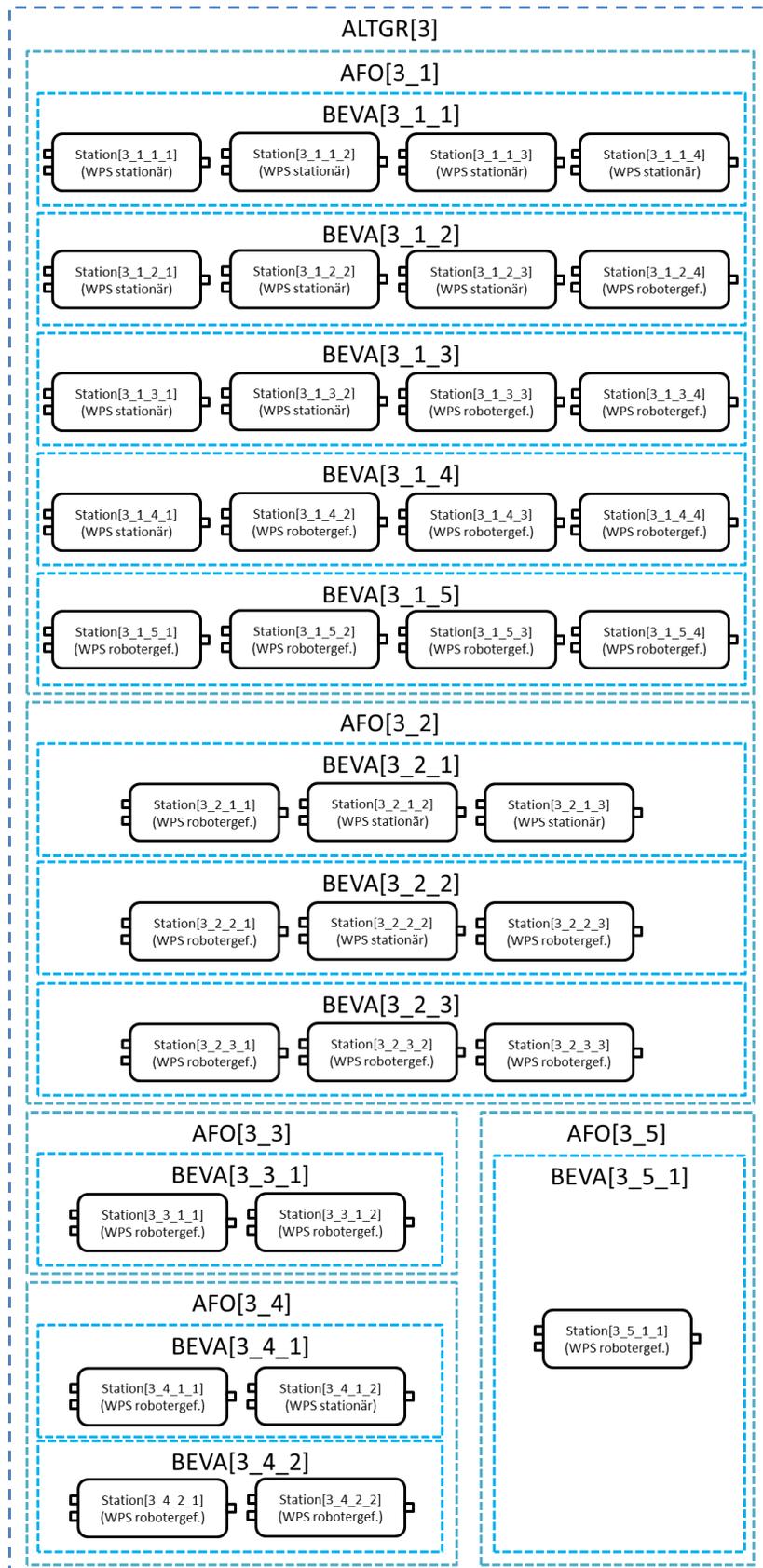


Abbildung 110: Übersicht der Alternativengruppe 3 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung)

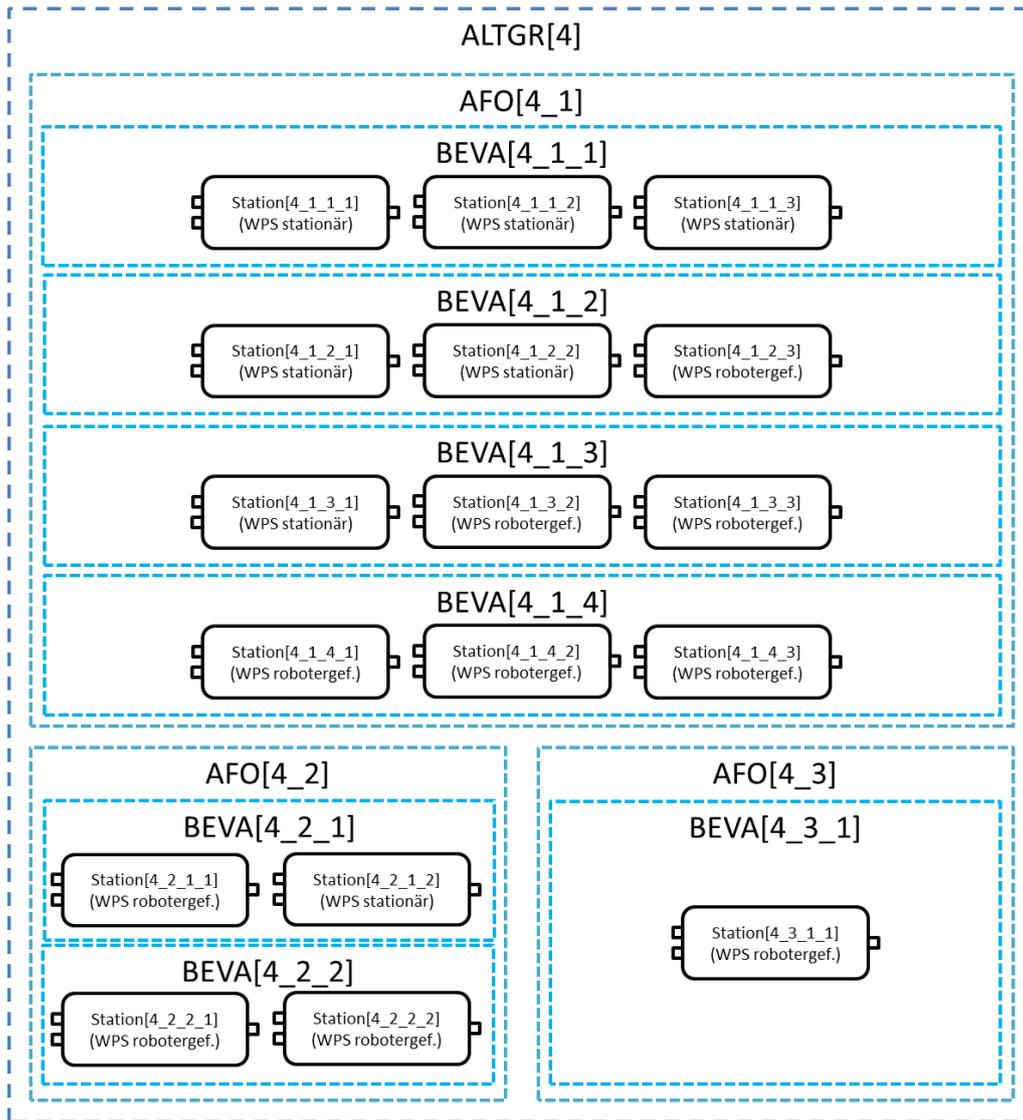


Abbildung 111: Übersicht der Alternativengruppe 4 inklusive der Arbeitsfolge- und Betriebsmittelvarianten (eigene Darstellung)